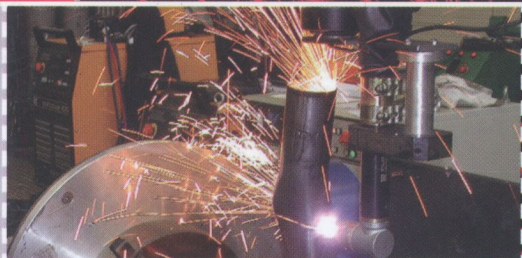


621.791  
Л32

**Г.И. Лащенко**

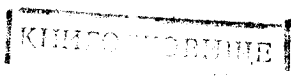
**СОВРЕМЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**



621.791  
132

Г. И. Лащенко

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**



Киев  
«Екотехнологія»  
2012

ББК 34.641  
Л32  
УДК 621.791

**Лашенко Г.И.**

Л32 Современные технологии сварочного производства. —  
К.: «Екотехнологія», 2012. — 720 с.

ISBN 978–966–8409–26–4

Изложены направления развития и совершенствования технического уровня сварочного производства и качества изготовления сварных конструкций. Дана характеристика современных конструкционных материалов, описаны пути повышения точности изготовления сварных конструкций, уровня механизации и автоматизации сварочного производства. Освещены принципы управления качеством сварных конструкций. Приведены современные электродуговые, плазменные, лазерные и фрикционные технологии сварки, наплавки, напыления и резки сталей, алюминиевых сплавов, титановых сплавов и пластмасс.

Рассчитана на инженерно-технических работников, занятых в области сварочного производства. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам технических университетов.

Викладено напрямки розвитку й удосконалювання технічного рівня зварювального виробництва і якості виготовлення зварних конструкцій. Дано характеристику сучасних конструкційних матеріалів, описані шляхи підвищення точності виготовлення зварних конструкцій, рівня механізації й автоматизації зварювального виробництва. Висвітлено принципи керування якістю зварних конструкцій. Наведено сучасні електродугові, плазмові, лазерні, електронно-променеві, фрикційні й ультразвукові технології зварювання, наплавлення, напилювання й різання сталей, алюмінієвих сплавів, титанових сплавів і пластмас.

Розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих в області зварювального виробництва. Може бути корисна викладачам, аспірантам і студентам технічних університетів.

ББК 34.641

*Рекомендовано к печати Советом общества сварщиков Украины  
(протокол №5/11 от 15.09.2011).*

462880

© Г.И. Лашенко, 2012

© Оформление. «Екотехнологія», 2012

**НТБ ВНТУ**  
**м. Вінниця**

## Предисловие

Сварочное производство представляет собой совокупность процессов, образующую самостоятельную законченную технологию изготовления сварной продукции (сварных конструкций, изделий).

Сварочное производство играло ключевую роль в становлении индустриального общества. Именно благодаря технологиям сварки в мире интенсивно развивалось промышленное и гражданское строительство, судостроение, транспортное, энергетическое, нефтяное и химическое машиностроение, автомобилестроение, трубопроводный транспорт и другие отрасли промышленности. На этом этапе основным движущим фактором развития являлись возможности, которые предоставляли технологии сварки в создании новых видов продукции и увеличении масштабов их производства.

Постиндустриальное общество зарождалось в недрах индустриального и на его базе. Поэтому задачи, решаемые сварочным производством в постиндустриальный период, частично сохраняются. Имеется в виду создание новых типов продукции и наращивание объемов их выпуска. Однако на первый план выходит задача обеспечения высокого качества изделий с новыми потребительскими характеристиками, и в том числе качества самой сварочной продукции, т. е. сварных конструкций.

С одной стороны, сварочное производство, являясь одним из элементов постиндустриального общества, участвует через создаваемую продукцию в его формировании, а с другой — использует достижения постиндустриального общества для своего развития. При этом рост наукоемкости сварочного производства способствует повышению качества продукции, ее эффективности и конкурентоспособности. По мнению Американского и Немецкого сварочных обществ, процессы сварки, резки и нанесения покрытий и в перспективе будут наиболее предпочтительными и распространенными способами создания широкого ассортимента конкурентоспособных материалов и изделий.

Главными составляющими, определяющими уровень сварочного производства, являются характер и объемы выпускаемой в кон-

кретной стране продукции, потребление различных видов и марок конструкционных материалов, применяемые технологии, организация работ и квалификация персонала.

В передовых странах с развитой рыночной экономикой основными металлопотребляющими отраслями являются промышленное и гражданское строительство, судостроение, тяжелое машиностроение, автомобилестроение, транспортное машиностроение, трубопроводный транспорт. Для большинства этих стран автомобилестроение и судостроение стали локомотивами современной экономики. В Украине эти отрасли пока не имеют больших перспектив роста. В то же время в Украине существует несколько технически обоснованных направлений увеличения металлопотребления:

- более 15% (5,4 млн т) имеющегося металлофонда строительных конструкций нуждается в срочной замене;
- износ основных фондов на железной дороге превышает 90%, более чем на 80% изношен тяговый и подвижной состав, что требует для его восстановления 2–3 млн т металлопроката;
- неизбежна замена труб на протяженных участках отечественной газотранспортной системы новыми трубами, изготовленными из современных сталей, в объеме нескольких миллионов тонн;
- реконструкция автодорог государственного значения требует около 10 млн т металлопроката.

Общеизвестно, что основным конструкционным материалом в мире является сталь, производство которой составляет около 93% от всего производства конструкционных материалов. Остальные 7% составляют цветные металлы (Al, Cu, Ni, Mg, Ti) и пластмассы. В группе цветных металлов и пластмасс доминирующие позиции занимают алюминий (38%) и пластмассы (23%).

К концу XX века и в последующие годы в таких странах, как США, Германия, Япония, потребление готового стального проката удерживалось на уровне 420–590 кг/чел. В Украине удельное потребление готового проката в 2007 г. достигло примерно 190 кг/чел, а в России — 250 кг/чел. Поэтому динамичное развитие экономики Украины и России невозможно без существенного увеличения металлопотребления, неразрывно связанного с ростом объема производства сварных конструкций. При этом сварка и родственные технологии являются базовыми в производстве конструкций и изделий различного назначения.

Изготовление сварных конструкций представляет собой производственный процесс, состоящий из целого комплекса взаимосвя-

занных операций, отличающихся по своему характеру, сложности, продолжительности и назначению. При этом используют различные технологические процессы. На стадии подготовки проката доминируют правка и очистка. В процессе изготовления деталей для сварных конструкций используют различные технологии резки, гибки, штамповки. Сборочно-сварочные операции выполняют на основе применения различных способов и методов сварки, а после-сварочную обработку реализуют с использованием технологических процессов, снижающих напряженно-деформационное состояние и улучшающих структурные и физико-механические характеристики сварных соединений.

В сварочном производстве передовых стран с развитой рыночной экономикой за последние 15–20 лет произошли существенные изменения, связанные с разработкой и использованием новых конструкционных материалов, современных технологий (электродуговых, плазменных, лазерных, электронно-лучевых, фрикционных, ультразвуковых) и внедрением систем менеджмента качества, в частности:

- на мировом рынке появилось более 1000 новых марок сталей различного назначения, существенно расширилась номенклатура стального проката, в том числе с различными покрытиями;
- отмечается устойчивый рост применения алюминия и разнообразных алюминиевых сплавов (аэрокосмическая отрасль, судостроение, автомобильный и железнодорожный транспорт, электротехника, тара и упаковка и др.);
- растут объемы применения пластмасс различного назначения (трубопроводы, резервуары и цистерны для транспортировки агрессивных продуктов, детали и узлы автомобилей, тара и упаковка и др.);
- отмечается увеличение производства высокоэффективных керамических материалов (информационные технологии, электроника, автомобиле- и самолетостроение и др.);
- для сварных конструкций широко применяют высокоточные детали, полученные с использованием новых технологий плазменной и лазерной резки, высокоточной гибки, вырубки и штамповки;
- механизация и автоматизация технологических процессов изготовления сварных конструкций продолжает оставаться основным направлением повышения эффективности производства и качества изделий. Сварочные роботы интенсивно используют в автомобилестроении, транспортном машиностроении, судостроении, при изготовлении строительных и машиностроительных конструкций различного назначения. Сварочное оборудование и

установки оснащают системами диагностики, регистрации и документирования параметров режима в электронном виде;

- сложившееся соотношение применяемых способов дуговой сварки плавящимся электродом предопределило следующую структуру выпуска сварочных материалов: покрытые электроды — 20%; проволока сплошного сечения для сварки в защитных газах — 50–60%; порошковая проволока — 10–20%; сварочные флюсы — 9–12% (в странах СНГ: покрытые электроды — 78%; проволока сплошного сечения для сварки в защитных газах — 12%; порошковая проволока — 1,1–1,5%; сварочные флюсы — 8–9%);
- постоянно совершенствуется качество сварочных материалов и технологии их производства (покрытые электроды, проволока сплошного сечения и порошковая, флюсы). Примерно 95% всего объема потребляемых флюсов приходится на агломерированные;
- заметное распространение получили работы по использованию высокоскоростного эффективного управления процессом сварки на базе мощных компьютеров и инверторных схем. Созданы инверторные источники питания для дуговой, контактной, плазменной и других способов сварки, отличающиеся высокими КПД, коэффициентом мощности и надежностью, малой массой, возможностью осуществления быстрореагирующего управления. На этой основе разработаны процессы дуговой сварки в защитных газах с прямым управлением переносом электродного металла (STT, CMT) и другие технологии;
- широко используют высокоточную плазменную резку с отдельной подачей двух газов (плазмообразующего и защитного), водоинжекционную плазменную резку. Оборудование для реализации этих технологий включает современные источники питания, высоконадежные плазмотроны и системы управления;
- лазерные технологии (сварка, наплавка, резка) базируются на мощных CO<sub>2</sub>-лазерах, Nd:АИГ-лазерах и диодных лазерах, которые все шире применяют в автомобилестроении, металлургической промышленности, судостроении, транспортном машиностроении и других отраслях. Снижения затрат на лазерную сварку достигают путем использования гибридной лазерно-дуговой сварки;
- продолжает расширяться применение вневакуумной электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в автомобилестроении, и эту технологию начинают использовать в судо- и краностроении. ЭЛС в вакуумных камерах большого объема используют в энергетическом машиностроении и других отраслях;

- среди способов сварки трением наиболее интенсивно развивается сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов и других материалов, используемая в аэрокосмической и электротехнической промышленности, судостроении и вагоностроении, при строительстве трубопроводов и хранилищ ядерных отходов;
- среди ультразвуковых технологий обработки наиболее быстрыми темпами развивается сварка полимерных материалов;
- необходимым условием для достижения высокого уровня конкурентоспособности сварочного производства стало непрерывное повышение квалификации, компетентности и заинтересованности персонала. Реализация системного подхода позволила последовательно и непрерывно повышать качество продукции и достигать положительного экономического эффекта.

По пути реализации этих направлений развития идут, хотя и разными темпами, Украина, Россия, Китай, Польша и другие страны. Поэтому анализ современного состояния технологий сварочного производства представляется весьма актуальным.

В настоящей монографии автор попытался обобщить отечественные и зарубежные достижения в повышении технического уровня сварочного производства и качества выпускаемой продукции на основе применения современных электродуговых, плазменных, лазерных и фрикционных технологий. Основное внимание уделено технологиям сварки, наплавки, газотермического напыления и резки.

*Автор выражает огромную благодарность за помощь в издании книги:*

**Ю.А. Никитюку** — директору НПФ ВИСП;

**Ю.А. Дидусу** — генеральному директору  
фирмы ООО ПИИ «Бинцель Украина Гмбх»;

**М.Ф. Коробу** — директору фирмы ООО «НТЦ «Плазер»;

**А.И. Комисару** — генеральному директору, **В.Л. Бондаренко** —  
исполнительному директору, фирма ООО «Фрониус Украина»;

**А.А. Голякевичу** — генеральному директору  
фирмы ООО «ТМ.Велтек»;

**Н.Я. Осипову** — генеральному директору,

**В.И. Нетяге** — заместителю генерального директора,  
фирма ПАО «Запорожстеклофлюс»;

**А.И. Митюшину, В.В. Понедельченко** —  
ОАО «Межгосметиз», Линкольн Электрик;

**С.Г. Микаеляну** — директору, **О.Г. Козаку** —  
заместителю директора, фирма ООО «НПФ «ЭЛНА».



---

# **Глава 1.**

## **Основные направления совершенствования и развития сварочного производства**

Одной из основных тенденций современного материального производства является широкое применение сварных конструкций [1]. Объемы производства сварных конструкций во всем мире составляют сотни миллионов тонн. При этом, несмотря на непрерывно увеличивающееся применение в сварных конструкциях и изделиях легких сплавов, полимерных материалов, композитов, основным конструкционным материалом по-прежнему остается сталь.

Сварочное производство в своем развитии прошло путь от выполнения отдельной сварочной операции, имеющей вспомогательный характер (заварка дефектов отливок и поковок, ремонт изношенных деталей и т. п.), до выполнения комплекса операций на современных рабочих местах, участках, цехах, заводах-центросварях, формируемым по технологическому, предметному или смешанному принципам.

Эффективность современного сварочного производства определяется рядом факторов, которые носят технологический и организационный характер. Они и являются предметом рассмотрения в настоящей главе.

### **1.1. Роль сварочного производства в развитии национальной экономики**

Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий [1]. При этом до 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений, а толщина свариваемых деталей колеблется от микрометров до

метров, масса сварных конструкций — от долей грамма до сотен и тысяч тонн.

Сварка и родственные технологии позволяют создавать оригинальные конструкции современных автомобилей, самолетов, судов, локомотивов и вагонов, аппаратов и установок для химической промышленности и энергетики, обеспечивают высокую надежность трубопроводного транспорта, многих типов строительных конструкций, средств электроники и приборов, в том числе работающих в экстремальных условиях.

Широкое применение сварных конструкций (СК) обусловлено возможностью:

- совмещать преимущества составной конструкции в производстве с достоинствами монолитных в эксплуатации;
- расширять выбор более рациональных конструктивных решений при создании высококачественных и надежных конструкций;
- применять в конструкциях разнородные материалы, наиболее соответствующие условиям работы различных элементов, что позволяет полноценно использовать свойства материалов, уменьшать массу и металлоемкость конструкций;
- снижать производственные затраты за счет улучшения технологии изготовления деталей.

В зависимости от назначения сварных конструкций и предъявляемых к ним требований используют те или иные конструкционные материалы. При этом основным конструкционным материалом в мире является сталь, производство которой составляет около 93% от всего производства конструкционных материалов.

Сварка и родственные технологии играют важную роль в экономике разных стран. Развитие этих направлений диктуется, с одной стороны, наличием в конкретной стране соответствующего научного и инженерного потенциала, а с другой — потребностями отраслей промышленности. Общеизвестно, что Украина обладает значительным научным и инженерным потенциалом в области сварки и родственных технологий и имеет возможность за счет этого активно влиять на развитие различных секторов отечественной экономики.

**Металлопотребляющие отрасли.** Аналитики международного института чугуна и стали (IIISI) пришли к однозначному выводу о существовании прямой зависимости между ростом потребления стали и общим экономическим уровнем стран с высокими темпами роста внутреннего валового продукта (ВВП) [2]. К концу XX века и в последующие годы в таких странах, как США, Германия, Япо-

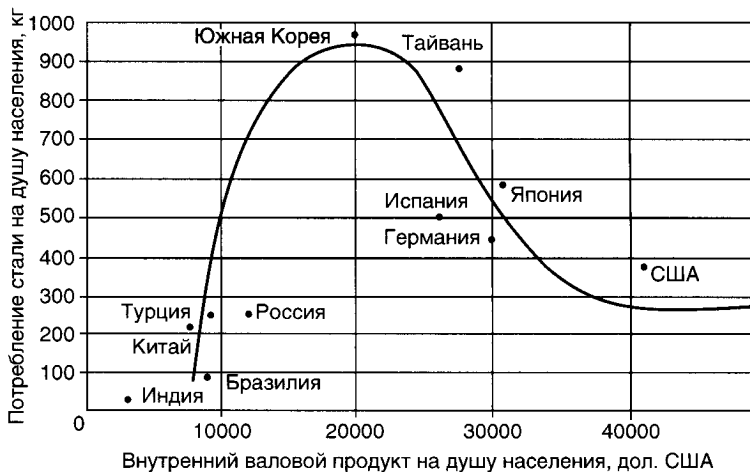


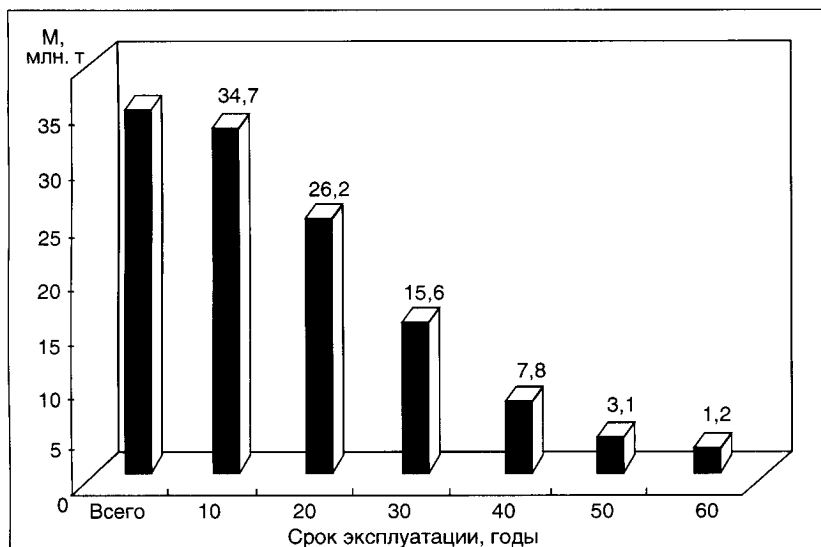
Рис. 1. Кривая интенсивности использования стали

ния, годовое потребление стального проката удерживалось на уровне 420–590 кг/чел. В Украине собственное потребление стального проката в 2007 г. составило примерно 25% от произведенного, т. е. 8,7 млн. т, а удельное потребление проката достигло примерно 190 кг/чел. В России этот показатель находится на уровне 250 кг/чел. Для многих стран увеличение внутреннего потребления стали является важнейшим условием построения высокоразвитой экономики (рис. 1) [2]. Поэтому динамичное развитие экономики Украины и России невозможно без существенного увеличения металлопотребления, неразрывно связанного с ростом объема производства сварных конструкций [8].

В странах с развитой экономикой основными металлопотребляющими отраслями являются промышленное и гражданское строительство, судостроение, тяжелое машиностроение, автомобилестроение, транспортное машиностроение, трубопроводный транспорт. Для большинства этих стран автомобилестроение и судостроение стали локомотивами современной экономики. В Украине эти отрасли экономики пока не имеют больших перспектив роста. В то же время в Украине существует несколько экономически обоснованных направлений увеличения металлопотребления. Прежде всего, речь идет о росте объемов производства сварных строительных конструкций.

На объектах базовых отраслей промышленности Украины (черной и цветной металлургии, машиностроения, энергетической, угледобывающей, нефтегазовой и др.) эксплуатируют 36 млн. т несущих металлических конструкций [3]. Структура фонда эксплуатируемых металлических конструкций приведена на *рис. 2*. Большая часть металлических конструкций — это конструкции зданий и сооружений (около 60%), металлические листовые конструкции (преимущественно стальные резервуары), электросетевые конструкции (мачты, опоры ЛЭП), а также мосты. Основу эксплуатируемого металлофонда составляют металлические конструкции, введенные в эксплуатацию в 1950–1983 гг., т. е. прослужившие 17–50 лет.

Согласно проведенным исследованиям [3], физический износ металлических конструкций на момент выхода их из строя составляет 35–40%. Относительно промышленных зданий это означает, что средний срок их службы составляет 40–50 лет. По оценкам экспертов, к 2001 г. 7–8% существующего металлофонда уже находилось в фазе завершения срока эксплуатации. За последние годы ситуация еще больше усугубилась. Отсутствие средств для замены конструкций заставляет владельцев продлевать срок эксплуатации



*Рис. 2. Диаграмма структуры фонда металлических конструкций, эксплуатируемых в Украине; М — масса конструкции*

конструкций, физический износ которых достигает 35–40%, что нередко приводит к авариям, а материальный ущерб в десятки раз превышает стоимость их восстановления и замены.

Сегодня можно констатировать, что более 15% (5,4 млн. т) имеющегося металлофонда строительных конструкций нуждается в срочной замене. Технически эта задача не вызывает больших сложностей, так как в Украине имеются производственные мощности, способные выпускать ежегодно до 450 тыс. т металлоконструкций различного назначения.

Ведущая роль в транспортной инфраструктуре нашей страны принадлежит железной дороге, на которую приходится около 80% всех грузовых перевозок. При этом в последние 3–4 года наблюдалась устойчивая тенденция к росту перевозок грузов железнодорожным транспортом. Однако чем выше спрос на грузовые перевозки, тем отчетливее проявляется проблема серьезного износа подвижного состава. Сегодня «Укрзалізниця» эксплуатирует 22 тыс. км железных дорог, четверть которых находится в критическом состоянии. Значительно изношен тяговый и подвижной состав: электропоезда — на 78%, дизель-поезда — на 83%, пассажирские вагоны — на 88%, грузовые — на 80%. По оценкам специалистов износ основных фондов на украинской железной дороге может достигнуть 99% к 2011–2012 гг. Учитывая среднюю степень износа полувагонов, до 2015 г. по сроку службы подлежат выведению из эксплуатации 50,1 тыс. единиц, при имеющемся парке 64 тыс. единиц. На изготовление одного вагона расходуют в среднем 20 т металла, т. е. для изготовления 100 тыс. вагонов понадобится не менее 2 млн т металлопроката. Вагоностроительные заводы Украины — ОАО «Крюковский вагонзавод», ОАО «Азоввагонмаш», ОАО «Днепровагонмаш», ОАО «Стахановское ПО вагоностроения» располагают возможностями для ежегодного выпуска новых вагонов в количестве 35–40 тыс.

Огромный металлофонд накоплен в газотранспортной системе (ГТС) Украины, общая протяженность которой составляет 37,6 тыс. км, в том числе длина магистральных газопроводов — 22,2 тыс. км [4]. В составе ГТС эксплуатируют 81 компрессорную станцию с 765 газоперекачивающими агрегатами общей мощностью 5,6 млн. кВт.

Старение основных фондов ГТС не только снижает надежность ее работы, но и чревато внезапными разрушениями, авариями, это ставит под угрозу жизнь и здоровье работающего персонала и людей, проживающих в районах прокладки газопроводов. Вместе с тем газоперекачивающие агрегаты ГТС являются морально уста-

ревшими, энергозатратными, что приводит к чрезмерным расходам газа на собственные нужды, которые в 2006 г. составили 4,6 млрд. кубометров.

За годы независимости Украины, благодаря усилиям ученых и специалистов ИЭС им. Е. О. Патона и других организаций, разработаны методы диагностики и технологии ремонта, способствующие продлению сроков эксплуатации трубопроводов и других ответственных технических систем и конструкций. Однако проблему деградации линейной части трубопроводов нельзя решить только за счет использования ремонтных технологий. Неизбежна замена труб на протяженных участках ГТС новыми трубами, изготовленными из современных сталей. Украина располагает значительными мощностями по производству сварных труб большого диаметра (Харьковский и Новомосковский трубные заводы). Подготовлены также фундаментальные предложения [4] по модернизации компрессорных станций ГТС с использованием научного и производственного потенциала отечественных предприятий «Зоря-Машпроект» (г. Николаев), ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе», АО «Мотор-Січ» (г. Запорожье), располагающих современными технологиями электронно-лучевой сварки, пайки, газотермического напыления и др.

По данным «Укравтодора» автодорожная сеть нашей страны составляет 170 тыс. км, из них 20 тыс. км — дороги государственного значения. Большая часть этих дорог построена в 1950–60-е годы, и их пропускная способность крайне низкая. Поэтому весьма актуален вопрос реконструкции этой дорожной сети, приведения дорог в соответствие с европейскими нормами. На эти цели, согласно расчетам «Укравтодора», потребуется около 10 млн. т металлопроката.

По ориентировочным оценкам автора реализация только изложенных выше направлений увеличения потребления металла в экономике Украины в течение 10 лет позволит довести удельное потребление стального металлопроката до 300–350 кг/чел., существенно обновить основные фонды, увеличить объемы перевозки грузов и людей железнодорожным и автомобильным транспортом, повысить надежность и снизить энергоемкость ГТС, в значительной степени стабилизировать работу черной металлургии и смежных с ней отраслей, способствовать модернизации и развитию экономики страны. Сегодня же существует реальная угроза того, что Украина (даже в отдаленной перспективе) не только не приблизится к построению постиндустриального общества, но и потеряет многие значительные достижения индустриальной державы.

Сварка и родственные технологии являются базовыми в производстве металлоконструкций различного назначения. Возникает вопрос: готово ли отечественное сварочное производство решать столь масштабные задачи в настоящее время? Ответ автора: не в полной мере. Требуется существенное реформирование сварочного производства и повышение его эффективности.

**Повышение эффективности сварочного производства.** В условиях современной экономики эффективность функционирования конкретного сварочного производства в форме участка, цеха, комплекса цехов и т. д. может быть оценена соотношением цена/качество сварных конструкций. Аналогичный подход к оценке эффективности распространяется и на другие субъекты сварочного производства, включая разработчиков технологических процессов, изготовителей сварочного и иного оборудования, сварочных и вспомогательных материалов.

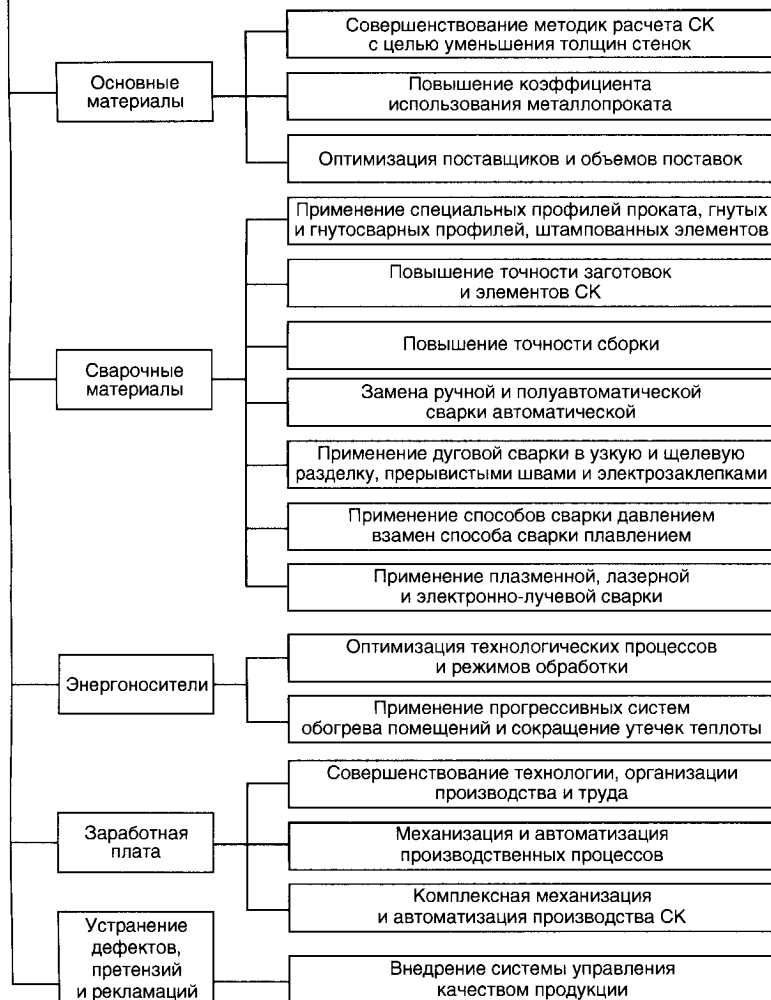
Очевидно, что существует два взаимосвязанных пути повышения эффективности сварочного производства: снижение цены и повышение качества выпускаемой продукции [8].

При формировании цены учитывают не только производственные затраты различного рода, прибыль, но и многие другие косвенные факторы, например, уровень цен на рынке и т. п. Известно, что основное влияние на себестоимость сварных конструкций оказывают: назначение; особенности конструкции; серийность и объемы производства металлоконструкций; стоимость энергоносителей, основных, сварочных и вспомогательных материалов; производительность труда и качество продукции. На *рис. 3* показана схема снижения себестоимости сварных конструкций по основным статьям затрат [8].

Следует отметить, что повышение коэффициента использования металлопроката относится к одной из наиболее актуальных задач снижения затрат на изготовление конструкций. Ее решают за счет применения рациональных схем раскроя, высокоточных способов термической резки (плазменной, лазерной), применения комбинированных заготовок и ряда организационных мероприятий.

Для снижения затрат на сварочные материалы весьма эффективным является уменьшение количества швов в СК за счет применения специальных профилей проката, гнутых и гнутосварных профилей, штампованных элементов. Эти мероприятия также позволяют уменьшить деформации сварных конструкций и повысить их точность. Средний расход сварочных материалов на 1 кг наплавленного металла составляет 1,7 кг электродов при ручной дуговой

**Пути снижения себестоимости  
сварных конструкций (СК)  
по основным статьям затрат**



*Рис. 3. Пути снижения себестоимости изготовления сварных конструкций*



сварке, 1,15 кг сплошной проволоки — при механизированной сварке в  $\text{CO}_2$  и 1,03 кг сплошной проволоки — при сварке под флюсом. Кроме того, при механизированной и автоматической сварке швы равноценной прочности в отличие от швов, выполненных покрытыми электродами, формируются за счет большей глубины провара. Поэтому с позиций минимизации расхода сварочных материалов целесообразно переходить на механизированную и автоматическую сварку.

Серьезный фактор снижения расхода сварочных материалов — повышение точности заготовок и элементов СК, а следовательно, и точности сборки. Применение сварки прерывистыми швами, электрозаклепками (там, где это допустимо) и способов дуговой сварки в узкую и щелевую разделку также позволяет снизить объем наплавленного металла и уменьшить расход сварочных материалов.

В сварочном производстве расход энергоносителей на технологические цели определяется энергоемкостью оборудования, применяемыми технологиями и режимами обработки. С точки зрения расхода энергоносителей на технологические нужды наиболее энергоемкой операцией сварочного производства является термическая обработка металлоконструкций. Радикальным направлением снижения затрат в этом случае становится замена термической обработки другими энергосберегающими технологиями [5].

Расходы на заработную плату зависят от квалификации персонала и его численности. В общем случае чем выше квалификация, тем больше затраты на заработную плату. В то же время высокая квалификация является весьма положительным фактором производственного процесса. На заработной плате квалифицированных работников экономить нельзя. Существенное снижение затрат на заработную плату может быть достигнуто за счет совершенствования организации производства и труда (уменьшения простоев, повышения ритмичности путем «расшивки» узких мест, четкой регламентации функций работников, внедрения бригадной формы организации труда и т. д.).

Механизация и автоматизация производственных процессов, в том числе комплексная, позволяют не только уменьшить трудоемкость и сэкономить расходы на заработную плату, но и более эффективно использовать производственные площади и персонал, обеспечить ритмичный выпуск продукции стабильно высокого качества. Это в итоге ведет к повышению ресурса и эксплуатационной надежности изделий и сооружений, в которых используют сварные конструкции.

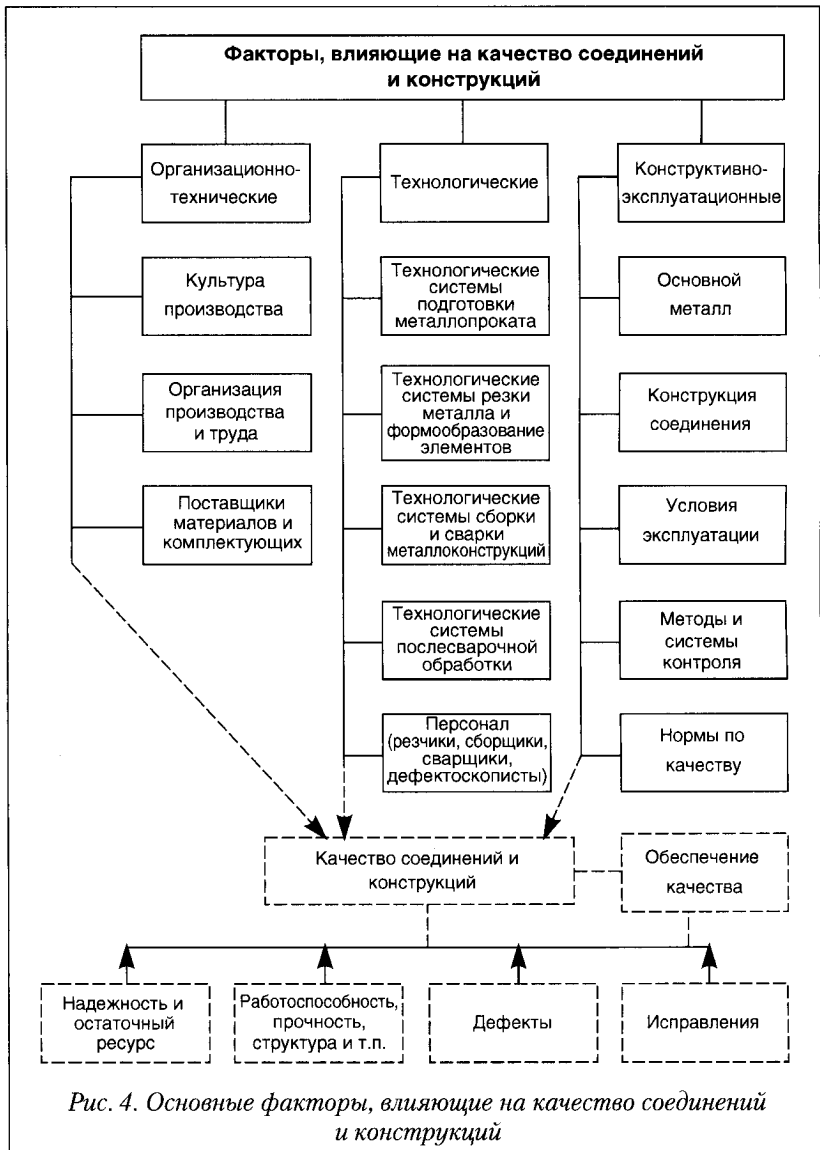
При выпуске любых изделий, в том числе таких сложных, как большинство типов сварных конструкций, неизбежно появление дефектов, которые устраняют в процессе производства. Затраты на устранение дефектов могут существенно увеличить стоимость сварных конструкций, и учет этих реалий в плане уменьшения издержек подобного рода — важное направление повышения эффективности сварочного производства. Поэтому неизменным условием создания высокоэффективного сварочного производства, гарантирующего экономичность, качество, надежность, безопасность и конкурентоспособность продукции, является использование системы обеспечения качества, которая охватывает весь цикл сварочного производства.

На рис. 4 обобщены основные факторы (по группам), влияющие на качество сварных соединений и конструкций, приведенные в работе [6] и частично дополненные автором. В группе организационно-технических факторов важную роль играет культура производства (выдача и контроль производственных заданий, выполнение регламента, своевременная уборка рабочих мест, условия хранения заготовок и деталей, чистота проходов и т. п.), условия труда работников.

Группа технологических факторов включает технологические системы для выполнения различных операций сварочного производства. В зависимости от серийности продукции, ее номенклатуры, степени автоматизации технологических процессов, операций загрузки-разгрузки и транспортировки обрабатываемых элементов и сварных конструкций технологическая система может представлять собой механизированное или автоматизированное рабочее место (рабочий участок), механизированную, автоматизированную или автоматическую линию, робототехнологический комплекс, гибкую производственную систему. Механизированное или автоматизированное рабочее место, средство механизированного или автоматизированного труда (машина) и обслуживающий его человек составляют элементарную технологическую систему.

Высокое качество сварных соединений и конструкций можно обеспечить при условии, что металл, подвергаемый обработке, выправлен, очищен от окалины, ржавчины и других загрязнений, а при вырезке деталей используют высокоточные машины с программным управлением для кислородной, плазменной и газолазерной резки и механической вырубки. Формообразование элементов сварных конструкций производят путем точной гибки, штамповки и вырубки, в том числе с помощью лазер-прессов.

ІНТБ ВІНТУ  
М. Вінниця



Операция сборки сварных конструкций в настоящее время наименее механизирована и автоматизирована, в основном из-за низкой точности элементов и деталей, поступающих на сборку. Поэтому

му повышение точности заготовок не только открывает путь к механизации и автоматизации сборочных операций, но и позволяет исключить сборку металлоконструкций «с натягом» и подгоночные работы, что существенно повышает качество сварных конструкций.

**Технологии сварки.** Улучшение технологии сварки играет определяющую роль в обеспечении качества сварных конструкций и в целом в создании высокоэффективного сварочного производства, в котором лидирующие позиции занимает дуговая и контактная сварка.

В странах ЕС (Западная Европа) с 2000 г. доля дуговой сварки под флюсом остается практически неизменной, увеличились объемы применения механизированной сварки в защитных газах сплошной и порошковой проволокой и сократилась доля ручной дуговой сварки [7].

Соответствующим образом выглядит и структура выпуска сварочных материалов в странах ЕС: покрытые электроды для ручной дуговой сварки – 20%; проволока сплошного сечения для сварки в защитных газах – 63%; порошковая проволока – 9%; сварочные флюсы – 8%.

Судя по структуре потребления сварочных материалов (рис. 5), аналогичная картина имеет место не только в Западной Европе, но и в США, Японии и Республике Южная Корея [2]. По данным ассоциации «Электрод», в 2007 г. в России, Украине и других стра-

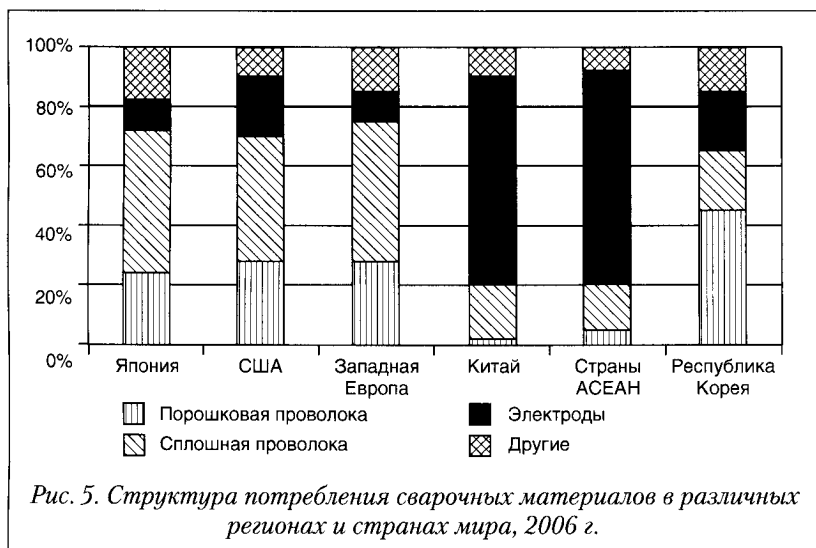


Рис. 5. Структура потребления сварочных материалов в различных регионах и странах мира, 2006 г.

нах СНГ в производстве сварочных материалов доля покрытых электродов составила 78,3%; проволоки сплошного сечения для сварки в защитных газах — 12%; порошковой проволоки — 1,1%; флюсов — 8,6%. Это свидетельствует о том, что удельный вес ручной дуговой сварки в этих странах превалирует над другими способами сварки плавящимся электродом. Большая доля ручной сварки в отечественном сварочном производстве не стимулирует повышения точности изготовления элементов и деталей для сварных конструкций, увеличивает трудоемкость сварочных работ и вероятность появления большего числа дефектов в швах, а также больших деформаций изделия.

На основе изучения отечественных публикаций автором проведен анализ направлений исследований и разработок в области сварки и родственных технологий, выполненных в последние годы [9]. Установлено (табл. 1), что наибольшее количество публика-

**Таблица 1. Доля работ о различных способах сварки и родственных технологиях в общем количестве анализируемых публикаций**

<i>Наименование</i>	<i>Доля в общем количестве публикаций, %</i>	
	<i>В Украине</i>	<i>В странах Западной Европы</i>
Сварка:		
дуговая	42	32
плазменная и плазменно-дуговая	3	3,6
лазерная, лазерно-дуговая, лазерно-плазменная	5	25
электронно-лучевая	5,7	7,3
электрошлаковая	1,6	0,9
контактная	8	2,7
трением	2,4	5,5
взрывом	1,6	0
другая	9	3,9
Наплавка	9	1,8
Пайка	7,3	7,3
Напыление	3	6,4
Резка	2,4	3,6

ций (42%) посвящено способам дуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродом. Наплавке посвящено 9%, контактной сварке — 8%, пайке — 7,3%, электронно-лучевой сварке — 5,7%, лазерной и гибридным способам сварки на ее основе — 5%, а остальным способам сварки и видам обработки — 3% и менее. Наименьшее количество публикаций (1,6%) посвящено электрошлаковой сварке и сварке взрывом.

Анализ информации, приведенной в технических журналах западноевропейских стран (см. табл. 1), показывает, что на долю дуговой сварки приходится 32%, лазерной и гибридных способов сварки на ее основе — 25%, электронно-лучевой сварки — 7,3%, пайки — 7,3%, сварки трением — 5,5%, напыления — 6,4, плазменной сварки и термической резки — по 3,6%, а на остальные технологии — менее 3%.

На Западе большее внимание уделяют дуговой сварке в защитных газах на основе прямого управления переносом электродного металла (STT, CMT) за счет использования современных быстродействующих источников питания и средств электроники. Если сравнить отечественный и западноевропейский массивы информации о лазерных и гибридных технологиях, то в последнем случае количество сообщений в 5 раз больше. Это подтверждает тот факт, что на Западе не ослабевает интерес к лазерным и гибридным технологиям сварки, которые занимают заметное место в производственном процессе. Отечественные публикации этого направления носят преимущественно исследовательский характер, упомянутые технологии мало используют в отечественном производстве, что, вероятно, связано как с тем, что в Украине не выпускают современное лазерное оборудование, так и с соответствующей заинтересованностью отечественных промышленников в его использовании.

Среди контактных способов сварки наибольшим вниманием за рубежом пользуется точечная сварка, многие проблемы которой давно решены, а полученные результаты реализованы в виде технологий и современного оборудования. Основным потребителем такого оборудования является автомобильная промышленность.

Практически все западноевропейские публикации о методе сварки трением посвящены способу сварки трением с перемешиванием («Stir-процесс»). Интерес к этому процессу в мире остается большим. Ряд стран уже используют его в ракетно-космической отрасли, самолетостроении, вагоностроении и др. За последние несколько лет и в отечественной периодике опубликован ряд работ о

сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов. Пока эти работы проводят на стадии лабораторных экспериментов и исследований.

Сравнивая направления работ о сварке и родственных технологиях в Украине и за рубежом, следует отметить, что отечественные специалисты в области инженерии поверхности больше внимания уделяют наплавке, а западноевропейские – напылению.

Доля публикаций о применении сварки и родственных технологий в различных отраслях и подотраслях экономики Украины приведена в *табл. 2* [9].

Наибольший удельный вес публикаций (25%) приходится на промышленное и гражданское строительство. Доля публикаций, касающихся сварки в подотрасли «трубы и трубопроводный транспорт», составила 14,2%, что свидетельствует о понимании специалистами-сварщиками важности этого сектора экономики страны.

**Таблица 2. Доля публикаций о применении сварки и родственных технологий в различных отраслях экономики Украины**

<i>Отрасль экономики</i>	<i>Доля от общего количества публикаций, %</i>
Промышленное и гражданское строительство	25
Железнодорожный транспорт, вагоно- и локомотивостроение	11,7
Трубы и трубопроводный транспорт	14,2
Энергомашиностроение и энергетика	9,2
Авиационная промышленность	6,7
Горнометаллургический комплекс	5,9
Тяжелое машиностроение	5,9
Ракетно-космический комплекс	5,9
Химическое машиностроение и химическая промышленность	3,0
Судостроение	1,6
Медицина и медицинское оборудование	1,6
Нефтегазодобыча	0,8
Подъемно-транспортное машиностроение, строительная и дорожная техника	0,8
Другие	9

От устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в огромной степени зависит состояние отечественной экономики. Применению сварки в этом направлении посвящено 11,7% публикаций. В основном они касаются совершенствования технологии сварки рельсов и изготовления сварных конструкций подвижного состава.

Доля публикаций, посвященных применению сварки в области энергомашиностроения и энергетики, составила 9,2%, авиационной промышленности — 6,7%, ракетно-космическому комплексу, тяжелому машиностроению и горнометаллургическому комплексу — по 5,9%, химическому машиностроению и химической промышленности — 3%. Что касается таких секторов экономики, как судостроение, медицина и медицинское оборудование, нефтегазодобыча, то публикации о применении сварки и родственных технологий в этих областях составляют 0,8–1,6%, а аналогичные работы о применении сварки в автомобилестроении и сельскохозяйственном машиностроении вообще не зафиксированы.

Настораживает также тот факт, что в последние годы снизился интерес к механизации и автоматизации сварочных работ, комплексной механизации и автоматизации сварочного производства. По всей видимости, причины здесь не научно-технического, а экономического плана. Собственники отечественных предприятий пока слабо инициируют заказы на работы такого рода. В то же время хорошо известно, что повышение качества сварных конструкций и эффективности сварочного производства в целом невозможно без широкого внедрения как локальной, так и комплексной механизации и автоматизации. При этом нельзя не согласиться с мнением [2], что роботизация является безальтернативным, наиболее прогрессивным и экономически эффективным путем автоматизации современного сварочного производства, залогом повышения качества и надежности сварных конструкций.

За годы «выживания» отечественной промышленности, в особенности машиностроения, снизился интерес к таким направлениям ресурсосбережения, как повышение коэффициента использования металла (КИМ), обеспечение точности изготовления заготовок и элементов для сварных конструкций. Пути решения этих инженерных задач хорошо известны, но без соответствующих финансовых ресурсов их нельзя реализовать. В рассматриваемом массиве информации эти направления представлены обзорными работами по подготовке кромок для сварки и характеристиками оборудования для точной термической резки (3,8% публикаций).



Как свидетельствует мировая практика, необходимое условие для достижения высокого уровня конкурентоспособности сварочного производства — это соответствующая квалификация, компетентность и заинтересованность персонала сварочного производства. Персонал играет важнейшую роль в обеспечении качества изготовления сварных конструкций. Согласно международному стандарту ISO 14731, задачи и ответственность персонала, деятельность которого связана со сваркой (включая планирование, руководство, надзор и контроль), должны быть четко определены в должностных инструкциях. Идентификация задач при изготовлении конкретной продукции определяет идентификацию должностных функций и ответственность специалистов предприятия. Так как сертификация персонала в соответствии с требованиями действующих европейских и международных стандартов серии ISO 9000:2000, ISO 3834 является обязательным условием сертификации фирмы, руководство предприятий должно быть заинтересовано в повышении квалификации своих специалистов в рамках продолжающегося обучения.

Следует подчеркнуть, что качество сварных конструкций является комплексной проблемой, которую решают реализацией системы качества. Только системный подход позволяет последовательно и непрерывно повышать качество продукции и достигать положительного экономического результата.

Таким образом, преодоление кризисных явлений в украинской экономике возможно путем обновления основных фондов, реализации масштабных инфраструктурных проектов и расширения выпуска современной продукции на основе динамичного роста металлопотребления в строительной, транспортной и машиностроительной отраслях с дальнейшим повышением качества сварных конструкций и оптимизации затрат в сварочном производстве.

Несмотря на кризисные явления в отечественной и мировой экономике, на ближайшие 3–5 лет можно прогнозировать оживление работ в строительной отрасли, железнодорожном и трубопроводном транспорте, энергомашиностроении и энергетике. Это потребует генерирования новых идей и решений по механизации и автоматизации сварочного производства, по применению сварки и родственных технологий с целью обеспечения высокого качества, прочности, надежности и долговечности сварных конструкций различного назначения. По-прежнему будут востребованы технологии ремонта для продления ресурса существующих сооружений, машин и механизмов.

Имеются определенные надежды на оживление в сельскохозяйственном машиностроении, горнометаллургическом комплексе и в авиационной промышленности, а значит, возрастет интерес к сварочным и родственным технологиям в этих отраслях.

## **1.2. Основные конструкционные материалы и особенности их сварки**

Выбор конструкционного материала — важный этап конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций различного назначения, поскольку выбор материала оказывает большое влияние на эксплуатационные характеристики конструкций, массу и экономичность изготовления.

Материал выбирают с учетом назначения конструкции, характера эксплуатационных нагрузок (статических, динамических, ударных), работы в условиях низких и высоких температур, агрессивных сред, износа и т. п. И даже при таком широком спектре требований сталь остается основным конструкционным материалом в строительстве и машиностроении.

Тем не менее все большую роль в качестве конструкционных материалов играют алюминиевые и титановые сплавы, а также пластмассы. Многие из этих материалов используют в наиболее наукоемких отраслях экономики.

**Стали для сварных строительных конструкций.** Как отмечалось выше, строительство — одна из самых металлоемких отраслей в мире. Значительную часть стали в строительстве расходуют на изготовление металлоконструкций, из которых монтируют каркасы промышленных и гражданских зданий, автодорожные и железнодорожные мосты, опоры линий электропередач, резервуары и газгольдеры для хранения нефти, нефтепродуктов и газов, морские стационарные платформы, трубопроводы и многое другое.

Выделяют пять основных свойств, которыми в той или иной мере должна обладать сталь для строительных сварных конструкций [10]: прочность, свариваемость, сопротивление хрупкому разрушению, сопротивление вязкому разрушению, технико-экономическая эффективность.

Считается, что наиболее эффективным для снижения массы (и стоимости) является применение комбинированных конструкций из сталей разной прочности, которые выбирают исходя из конкрет-

**Таблица 3. Классы прочности и категории качества хладостойкого проката строительных сталей**

Класс прочности*	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	Температура, °С, при которой гарантируется $KCU \geq 0,3$ МДж/м <sup>2</sup> , для категории качества хладостойкости		
	не менее			I	II	III
1 (С38/23)	225	375	25	Не гарантируется	-20	Не применяется
2 (С44/29)	285	430	21	Не применяется	-40	-70
3 (С46/33)	325	450	21		-40	-70
4 (С52/40)	390	510	19		-40	-70
5 (С60/45)	440	590	16		-40	-70
6 (С70/60)	590	685	12		-40	-70
7 (С85/75)	735	830	10		-40	-70

\* В скобках — прежнее обозначение.

ных условий нагружения и конструктивных элементов. Для проката стальных конструкций определены семь основных уровней (классов) прочности (табл. 3) [10].

Сталь первого класса ( $\sigma_T \geq 225$  МПа) условно принято называть сталью нормальной прочности, сталь трех следующих классов ( $\sigma_T \geq 285$  МПа,  $\sigma_T \geq 325$  МПа и  $\sigma_T \geq 390$  МПа) — сталью повышенной прочности, а сталь остальных трех классов ( $\sigma_T \geq 440$  МПа,  $\sigma_T \geq 590$  МПа и  $\sigma_T \geq 735$  МПа) — сталью высокой прочности. Первому классу прочности соответствует прокат из углеродистой стали обыкновенного качества в горячекатаном состоянии, классам прочности от второго до пятого — прокат из низколегированной стали в горячекатаном или нормализованном состоянии, шестому и седьмому классам — прокат из экономнолегированной стали, поставляемой, как правило, в термоулучшенном состоянии. Прокат второго и третьего классов получают также термическим и термомеханическим упрочнением или контролируемой прокаткой.

Прокат из углеродистой стали обыкновенного качества является материалом, наиболее широко применяемым в строительных конструкциях. По экспертным оценкам, доля такого проката составляет более 70% всего проката, используемого в сварных конструкциях.

Марки и общие технические требования к углеродистым строительным сталям, применяемым в странах СНГ, содержатся в

ГОСТ 380-94 и ГОСТ 27772-88. Сталь изготавливают горячекатаной сортовой, фасонной, толсто- и тонколистовой, широкополосной и холоднокатаной-тонколистовой. Из стали изготавливают трубы, поковки и штамповки, ленту, проволоку и метизы.

В ГОСТ 27772-88 приведены требования к прокату углеродистых сталей для строительных металлоконструкций, в том числе нормы химического состава и механических свойств.

В табл. 4, 5 приведены требования к прокату углеродистых сталей по ГОСТ 27772-88.

Механические и технологические свойства сталей в значительной степени предопределяются их раскисленностью. По степени раскисленности различают три группы сталей: кипящие (кп), полуспокойные (пс) и спокойные (сп).

**Кипящие стали** — это стали, раскисленные только Mn. В составе кипящих сталей практически отсутствует Si (не более 0,05%). Для этих сталей характерна повышенная неоднородность распределения S и P по толщине проката и пониженная стойкость против

**Таблица 4. Механические свойства фасонного проката углеродистых сталей по ГОСТ 27772-88**

Сталь	Толщина полки, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	Изгиб до параллельности сторон	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	
						при -20°С	после механического старения
		не менее				не менее	
С235	4-20	235	360	26	d=a	-	-
	20-40	225	360	25	d=2a	-	-
С245	4-20	245	370	25	d=a	-	29*
	20-25	235	370	24	d=2a	-	29
	25-30	235	370	24	d=2a	-	-
С255	4-10	255	380	25	d=a	29*	29*
	10-20	245	370	25	d=a	29	29
	20-40	235	370	24	d=2a	29	29
С275	4-10	275	390	24	d=a	-	29*
	10-20	275	380	23	d=a	-	29
С285	4-10	285	400	24	d=a	29*	29*
	10-20	275	390	23	d=a	29	29

\* Для профиля толщиной 5 мм норма ударной вязкости 49 Дж/см<sup>2</sup>.

**Таблица 5. Механические свойства листового и широкополосного универсального проката по ГОСТ 27772-88 для строительных стальных конструкций**

Сталь	Толщина полки, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	Изгиб до параллельности сторон	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	
						при -20°С	после механического старения
		не менее				не менее	
С235	2-3,9	235	360	20	d=a	-	-
	4-20	235	360	26	d=1,5a	-	-
	20-40	225	360	26	d=2a	-	-
	40-100	215	360	24	d=2a	-	-
	100	195	360	24	d=2a	-	-
С245	2-3,9	245	370	20	d=a	-	-
	4-10	245	370	25	d=1,5a	-	29*
	10-20	245	370	25	d=1,5a	-	29
С255	2-3,9	255	380	20	d=1,5a	-	-
	4-10	245	380	25	d=1,5a	29*	29*
	10-20	245	370	25	d=1,5a	29	29
	20-40	235	370	25	d=2a	29	-
С275	2-3,9	275	380	18	d=1,5a	-	-
	4-10	275	380	24	d=1,5a	-	29*
	10-20	265	370	23	d=1,5a	-	29
С285	2-3,9	285	390	17	d=1,5a	-	-
	4-10	275	390	24	d=1,5a	29*	29*
	10-20	265	380	23	d=1,5a	29	29

\* Для профиля толщиной 5 мм норма ударной вязкости 39 Дж/см<sup>2</sup>.

хрупкого разрушения. Они склонны к старению. У кипящих сталей самый низкий уровень качества среди рассматриваемых трех групп сталей, но вместе с тем наиболее низкая стоимость.

В сварных строительных металлоконструкциях кипящую сталь применяют в наименее ответственных элементах (связях, прогонах), а также в элементах, испытывающих при эксплуатации преимущественно сжатие, при котором хрупкое разрушение менее вероятно, например, в колоннах промышленных и гражданских зданий.

**Спокойные стали** получают посредством их полного раскисления кремнием, марганцем и алюминием. При этом N и O<sub>2</sub> в их составе связаны Al. Для спокойной стали характерна повышенная дисперсность феррито-перлитной структуры. Содержание Si в спокойной стали обычно составляет 0,1–0,30%. Она обладает более высокой ударной вязкостью и меньшей склонностью к старению, чем кипящая и полуспокойная.

Спокойную сталь применяют в ответственных элементах сварных металлоконструкций, испытывающих при эксплуатации динамические и переменные силовые воздействия (подкрановых балках, элементах мостов и эстакад, балках рабочих площадок металлургических цехов) или находящихся в сложном напряженном состоянии (узловых фасонках стропильных и подстропильных ферм).

Наиболее широко в сварных строительных конструкциях применяют полуспокойные стали.

**Полуспокойные стали** — это стали, раскисленные Mn и Al. Содержание кремния в них составляет 0,05–0,10%. Эти стали в меньшей степени насыщены газами, у них более однородно распределение примесей по толщине проката по сравнению с распределением примесей по толщине у кипящих сталей. По уровню механических свойств и стоимости полуспокойные стали занимают промежуточное положение между кипящими и спокойными. В то же время следует отметить, что механические свойства углеродистых спокойной, полуспокойной и кипящей сталей в различных профилях проката в большой мере определяются толщиной проката. Практика показывает, что с уменьшением толщины и, следовательно, с увеличением степени обжатия, снижением температуры конца прокатки и повышением скорости охлаждения измельчается зерно феррита горячекатаной стали всех трех степеней раскисления. Это существенно повышает предел текучести и особенно ударную вязкость при отрицательных температурах и после механического старения. С уменьшением толщины листов различие свойств проката сравниваемых сталей значительно уменьшается.

Сопrotивление усталости сварных соединений из сталей СтЗпс, СтЗсп и СтЗкп практически одинаково. По сопротивлению хрупкому разрушению СтЗпс существенно превосходит кипящую сталь СтЗкп, приближаясь к спокойной СтЗсп.

Коррозионная стойкость в различных агрессивных средах углеродистых спокойной, полуспокойной и кипящей сталей практически одинакова. Полуспокойная сталь, дополнительно легированная

марганцем (СтЗГпс), по основным показателям качества проката не уступает спокойной стали.

Прокат углеродистой полуспокойной стали рекомендован для широкой области элементов строительных сварных конструкций (стропильных и подстропильных ферм покрытий, балок и ригелей рамных конструкций и др.), эксплуатируемых в обычном диапазоне климатических температур (расчетные температуры не ниже минус 40°С).

С целью повышения эффективности металлоконструкций созданы **низколегированные стали повышенной прочности**. Для получения низколегированных сталей повышенной прочности используют легирующие элементы, в большей степени упрочняющие твердый раствор  $\alpha$ -железа и в меньшей степени образующие специальные карбиды или нитриды: кремний, марганец, медь, никель, хром, реже молибден. Прокат из этих сталей поставляют, как правило, в состоянии непосредственно после горячей прокатки, и он имеет ферритно-перлитную микроструктуру, хотя возможна поставка и в состоянии после термической обработки — нормализации или термического улучшения.

Предел текучести и временное сопротивление в прокате большинства марок низколегированной стали не превышает соответственно 350 и 500 МПа. Этот уровень обусловлен ограниченностью легирования, которое сдерживается тремя факторами: ухудшением свариваемости, снижением сопротивления хрупкому разрушению и повышением стоимости.

При упрочнении строительной стали для сохранения или повышения стойкости против хрупкого разрушения необходимо одновременное существенное измельчение ее микроструктуры. Величина зерна феррита в прокате горячекатаной низколегированной стали зависит от толщины последнего. Она минимальна для тонкого проката, остывающего с наибольшей скоростью, и увеличивается с увеличением его толщины. Тем не менее в широком диапазоне толщин применяемого проката зерно феррита в прокате низколегированной стали большинства марок остается более мелким, чем в прокате углеродистой стали. Это и обуславливает более высокую хладостойкость низколегированной стали.

Экономическая эффективность применения низколегированной стали зависит от оптовой цены, повышающейся с увеличением содержания легирующих элементов, особенно таких, как никель, медь, молибден.

В табл. 6 приведен химический состав, а в табл. 7 — механические свойства некоторых низколегированных сталей, выпускаемых в Украине и России по ГОСТ 19281-89.

Стали, марки которых условно даны с буквой Д в скобках (см. табл. 6, 7), по требованию заказчика могут быть дополнительно легированы медью с целью повышения коррозионной стойкости. В этом случае буква Д, обозначающая медь, вводится в марочное обозначение.

Стали с добавкой меди являются основным конструкционным материалом для отечественного мостостроения (табл. 8).

Основным нормативным документом, регламентирующим требования к металлопрокату для мостовых конструкций, является ГОСТ 6713-89. Он предусматривает нормирование прочностных, пластических характеристик и характеристик вязкости, однако не гарантирует обеспечение сопротивления хрупкому разрушению (по результатам испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом (KCV)). В то же время нормативным документом ГОСТ 19281-89 гарантируется ударная вязкость сталей 10ХСНД, 15ХСНД по Шарпи (KCV) не ниже 40 Дж/см<sup>2</sup> при температурах 0 и минус 20°С.

Таблица 6. Химический состав низколегированных сталей повышенной прочности, % (по массе)									
Марка стали	C	Si	Mn	S		P	Cr	Ni	Cu
				не более					
09Г2 (Д)	Не более 0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	0,040	0,035	Не более 0,30	Не более 0,90	0,30-0,60	(0,15-0,30)
09Г2С (Д)		0,5-0,7	1,3-1,7	0,040	0,035				(0,15-0,30)
10Г2С1 (Д)		0,8-1,1	1,3-1,65	0,040	0,035				(0,15-0,30)
15ХСНД	0,12-0,18	0,40-0,70	0,40-0,70	0,035	0,035	0,60-0,90	0,20-0,40		
10ХСНД	Не более 0,12	0,80-1,10	0,50-0,80	0,035	0,035	0,60-0,90	0,50-0,80	0,40-0,60	
17ГС	0,14-0,20	0,4-0,6	1,0-1,4	0,040	0,035	Не более 0,30			
17Г1С	0,15-0,20	0,4-0,6	1,15-1,6	0,040	0,035	Не более 0,30			



**Таблица 7. Механические свойства низколегированных сталей повышенной прочности**

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °C					Изгиб до параллельности сторон
					-40	-60	-70	20	-20	
								после механического старения		
09Г2 (Д)	До 5	305	440	21	—	—	—	—	—	d=2a
	5-10	305	440	21	34	—	—	29	—	d=2a
	10-20	305	440	21	29	—	—	29	—	d=2a
	20-32	295	440	21	39	—	—	29	—	d=2a
09Г2С (Д)	До 5	345	490	21	—	—	—	—	—	d=2a
	5-10	345	490	21	39	—	34	29	—	d=2a
	10-20	325	470	21	34	—	29	29	—	d=2a
	20-32	305	460	21	34	—	29	29	—	d=2a
	32-60	285	450	21	34	—	29	29	—	d=2a
	60-80	275	440	21	34	—	29	29	—	d=2a
	80-160	265	430	21	34	—	29	29	—	d=2a
10Г2С1 (Д)	До 5	355	490	21	—	—	—	—	—	d=2a
	5-10	345	490	21	39	—	29	29	—	d=2a
	10-20	335	480	21	29	—	24	29	—	d=2a
	20-32	325	470	21	29	—	24	29	—	d=2a
	32-60	325	450	21	29	—	24	29	—	d=2a
	60-80	295	430	21	29	—	24	29	—	d=2a
	80-100	295	430	21	29	—	24	29	—	d=2a
15ХСНД	8-32	345	490-687	21	29	29	29	29	29	d=2a
	32-50	335	470-667	19	—	29	29	29	29	d=2a
10ХСНД	8-15	392	530-687	19	39	29	29	29	29	d=2a
	15-32	392	530-667	19	—	29	29	29	29	d=2a
	32-40	392	510-667	19	—	29	29	29	29	d=2a
17ГС	До 5	345	510	23	—	—	—	—	—	d=2a
	5-10	345	510	23	44	—	—	29	—	d=2a
	10-20	335	490	23	34	—	—	29	—	d=2a
17Г1С	До 5	355	510	23	—	—	—	—	—	d=2a
	5-10	355	510	23	44	—	—	29	—	d=2a
	10-20	345	510	23	39	—	—	29	—	d=2a

**Таблица 8. Перечень сталей для деталей из прокатного металла  
согласно ДБН В 2.3-14:2006 «Мосты та труби.  
Правила проективання»**

Марка стали	Класс прочности	Толщина проката, мм, вкл.		ГОСТ, ТУ
		листового	фасонного	
16Д	235	До 20		ГОСТ 6713
16Д	225	21...40		
16Д	215	41...60		
15ХСНД	345	8...15		
15ХСНД	335	16...50; 16...32		
15ХСНД	390	8...15		
10ХСНД-2	390	8...40	8...15	
15ХСНД-12	345	До 32	До 10	
10ХСНД-12	390	До 40	До 15	
14Г2АФД	390	До 50	–	
15Г2АФДпс	390	До 32	–	
09Г2Д-12	295Д	До 32	До 20	
09Г2СД-12	295Д	21...32		
09Г2СД-12	325Д	Свыше 10 до 20		
09Г2Д-12	325Д	До 10	–	
09Г2СЮЧ-2	325	8...50	–	ТУ У 322-16-127
09Г2СЮЧ-2	355	8...50	–	
09Г2СЮЧ-3	390	8...50	–	
Е36	355	8...50	–	ГОСТ 5521
Е40	390	8...40	–	
06ГБД	355	8...50	–	ТУ У 27.1-05416923-085:2006
06ГБД	390	8...50	–	
06Г2БД	440	8...50	–	
06Г2БД	490	8...50	–	

Выше уже отмечалось, что прочность является одним из основных свойств, которым должна обладать строительная сталь. Для повышения прочности стали необходимо дальнейшее измельчение ее структуры. В практике производства стального проката приме-

няют различные способы упрочнения с одновременным измельчением структуры [10]:

- горячую обработку давлением с большим обжатием при пониженных температурах — контролируемая прокатка;
- термическую обработку с ускоренным охлаждением от высоких температур — закалка, часто с последующим отпуском;
- специальное микролегирование в сочетании с термической обработкой — карбонитридное упрочнение.

Все эти способы в той или иной мере реализуют на практике, но наибольшее распространение получил способ карбонитридного упрочнения, основанный на введении в сталь небольших добавок сильных карбидо- и нитридообразующих элементов с обязательной термической обработкой. Он обеспечивает упрочнение в результате дисперсного выделения карбонитридов в сочетании с сильным измельчением зерна стали, что позволяет при значительном повышении механической прочности сохранить и даже существенно повысить сопротивление хрупкому разрушению. При этом добавки карбидо- и нитридообразующих элементов в сумме не превышают 0,2% по массе.

Для упрочнения низколегированной феррито-перлитной стали могут быть использованы карбиды и нитриды алюминия, ванадия, ниобия, тантала, бериллия, лантана, молибдена и вольфрама. Из экономических и технологических соображений в Украине и России для этих целей используют в основном карбонитриды ванадия, ниобия и нитриды алюминия.

**Таблица 9. Химический состав феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением, % (по массе)**

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	N
14Г2АФ(Д)	0,12–0,18	0,3–0,6	1,2–1,6	≤0,40	≤0,30	0,15–0,30	0,07–0,12	0,015–0,025
15Г2АФДпс	0,12–0,18	≤0,17	1,2–1,6	≤0,30	≤0,30	0,2–0,4	0,08–0,15	0,015–0,30
16Г2АФ(Д)	0,14–0,20	0,3–0,6	1,3–1,7	≤0,40	≤0,30	0,15–0,30	0,08–0,14	0,015–0,025

*Примечания. 1. Содержание фосфора в стали должно быть не более 0,035%, серы — не более 0,040%; по требованию заказчика фосфора может быть не более 0,030%, серы — не более 0,035%. 2. Стали, в марку которых входит буква Д, по требованию заказчика дополнительно легируются медью; при отсутствии этого требования содержание меди не должно превышать 0,3% и буква Д из обозначения исключается. 3. В готовом прокате допускаются отклонения в химическом составе, указанные в табл. 6.*

**Таблица 10. Механические свойства феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением в листовом прокате**

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_T$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta_5$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		
					-40	-70	-20 после механического старения
					не менее		
14Г2АФ(Д)	До 5	390	540	20	—	—	—
	5–10	390	540	20	44	34	29
	10–32	390	540	20	39	29	29
	32–50	390	540	20	39	29	29
15Г2АФДпс	До 5	390	540	19	—	—	—
	5–10	390	540	19	44	34	29
	10–20	390	540	19	39	29	29
	20–32	390	540	19	39	29	29
16Г2АФ(Д)	До 5	440	590	20	—	—	—
	5–10	440	590	20	44	34	29
	10–32	440	590	20	39	29	29
	32–50	410	570	20	39	29	29

*Примечания. 1. По требованию заказчика значения временного сопротивления разрыву не должны превышать 690 МПа для стали марок 14Г2АФ(Д) и 15Г2АФДпс и 780 МПа – для стали марки 16Г2АФ(Д). При заказе проката можно предусматривать испытание на образцах с V-образным концентратором напряжения при 0 или -20°С для сталей 14Г2АФ(Д) и 15Г2АФДпс. 2. Изгиб до параллельности сторон d=2a.*

В табл. 9 приведен химический состав, а в табл. 10 – механические свойства по ГОСТ 19281-89 трех марок листовой высокопрочной феррито-перлитной стали с карбонитридным упрочнением, используемой уже более 30 лет в Украине и России для изготовления сварных металлоконструкций [10].

Следует отметить, что низколегированную сталь, упрочненную ванадием, можно подвергать горячей вальцовке, штамповке и т. д. При этом температурный режим горячего деформирования (температура нагрева и скорость охлаждения) должен по возможности соответствовать принятому режиму нормализации; т. е. речь идет о том, что число таких нагревов должно быть ограниченным, их не должно быть более двух-четырех во избежание появления локальных участков с крупнозернистой микроструктурой. Превышение

температур нагрева, принятых для нормализации, или увеличение скорости охлаждения повышает прочность, но снижает пластичность, вязкость и хладостойкость вследствие образования неблагоприятной микроструктуры.

При соответствующем подборе сварочных материалов и соблюдении основных технологических требований сварку стали марок 14Г2АФ(Д), 16Г2АФ и 15Г2АФДпс можно выполнять любым способом, принятым при изготовлении и монтаже строительных металлоконструкций [11].

В то же время установлено, что стали, легированные ванадием, не следует применять для конструкций, подвергающихся высокому отпуску. В металле, легированном ванадием, после такой термической обработки ударная вязкость снижается, критическая температура хрупкости перемещается в сторону положительных температур на 15–20°С. Аналогично влияет высокий отпуск и на свойства стали, легированной ниобием.

Относительно высокая стоимость ванадия вызвала необходимость изменения химического состава микролегированных сталей. В последние годы особенно широкое распространение как микролегирующий элемент приобрел ниобий, который в два раза дешевле ванадия [12]. Будучи чрезвычайно полезным элементом при процессах упрочнения, типа контролируемой прокатки, ниобий не столь эффективен при горячей прокатке, нормализации, термическом улучшении, поскольку обладает относительно меньшей по сравнению с ванадием способностью к дисперсионному упрочнению. В качестве примера приводят сталь с ниобием (0,04%), природнолегированную никелем и хромом (массовые доли, %: 0,15 С; 0,52 Si; 0,98 Mn; 0,011 P; 0,006 S; 0,30 Cr; 0,25 Ni; 0,12 Cu; 0,031 Al; 0,10 N), имеющую следующие механические свойства после нормализации [12]:

Толщина, мм	$\sigma_T, Н/мм^2$	$\sigma_B, Н/мм^2$	$\delta_5, \%$	$\delta_p$
16	409	566	25	14
25	392	547	28	13
30	386	551	34	20
40	371	522	31	14

В этом варианте микролегирование ниобием обеспечивает мелкозернистость структуры и в определенной степени дисперсионное упрочнение, но в меньшей степени, чем при использовании ванадия (табл. 11) [12].

**Таблица 11. Механические свойства толстолистовой низколегированной стали, микролегированной ванадием**

Толщина, мм	Состояние поставки	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	KCU <sub>-40</sub> , Дж/см <sup>2</sup>
32	Горячая прокатка	460	620	21	40
	Нормализация от 930°C	426	590	24	88
	Закалка от 930°C + отпуск 650°C	490	610	21	60
50	Горячая прокатка	390	570	22	57
	Нормализация от 930°C	400	580	25	90
	Закалка с прокатного нагрева + отпуск 650°C	500	620	17	78
60	Горячая прокатка	445	620	22	57
	Закалка от 930°C + отпуск 650°C	450	580	24	110

Согласно приведенным выше данным, микролегированная сталь с ниобием в толщинах до 40 мм имеет свойства класса прочности С345 ( $\sigma_T \geq 345$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B \geq 490$  Н/мм<sup>2</sup>), свойства нормализованной стали с ванадием в толщинах до 60 мм соответствуют классу С390 ( $\sigma_T \geq 390$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B \geq 540$  Н/мм<sup>2</sup>).

Под влиянием экономических факторов были разработаны стали для ответственных металлоконструкций с ниобием и ванадием. Наиболее распространенную сталь 09Г2ФБ с ниобием и ванадием поставляют после контролируемой прокатки. Она отличается высокой чистотой по вредным примесям и газам. Особое внимание уделяют возможно более полному удалению из твердого раствора азота, ослабляющего эффективность действия ниобия.

В России и Украине находят применение природнолегированные стали 15ХСНДА и 10ХСНДА нового поколения для металлических конструкций с высокими эксплуатационными свойствами, отличающиеся от известных стандартных сталей 15ХСНД и 10ХСНД прежде всего микролегированием ванадием и ниобием, пониженным содержанием углерода, серы и фосфора (табл. 12) [12, 13].

Служебные характеристики проката стали 10ХСНДА и 15ХСНДА приведены в табл. 13 [13].

Благодаря наличию в составе вышеупомянутых сталей сильных карбидообразующих элементов ванадия и ниобия удается одновременно повысить прочностные свойства по механизму дисперсион-

**Таблица 12. Хромоникелевые стали для металлических конструкций\***

Сталь	Класс прочности	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Nb
15ХСНД	С345	0,18	0,70	0,70	0,035	0,035	0,90	0,60	0,40	–	–
10ХСНД	С390	0,12	0,80	1,10	0,035	0,035	0,90	0,80	0,60	–	–
15ХСНДА	С345	0,15	0,90	0,70	0,010	0,015	0,60	0,50	0,40	0,12	0,06
10ХСНДА	С390	0,10	0,95	1,10	0,010	0,015	0,60	0,50	0,60	0,12	0,04

\* Максимальная массовая доля элементов, %.

**Таблица 13. Служебные характеристики проката стали 10ХСНДА, 15ХСНДА**

Марка стали	Толщина проката, мм	Механические характеристики			КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С			Угол загиба, град.	Доля волокнистого строения в изломе, %
		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	-60	-20	-20 после механического старения		
10ХСНДА	12	568... 574	429	27,0... 30,0	135... 159	147... 162	148...160	120	100
	16	565... 567	370... 386	27,0... 27,3	60... 85	62... 74	90...125	120	100
15ХСНДА	16	528... 532	370... 377	26,6... 29,3	160... 207	168... 200	174...217	120	95...98
10ХСНДА	20	558... 569	359... 397	28,8... 35,8	200... 209	198... 205	209...222	120	97... 100
	32	593... 605	400... 405	27,0... 37,0	161... 230	170... 218	213...237	120	95... 100

ного твердения и пластичность путем измельчения конечной феррито-перлитной структуры.

По сравнению со сталями по ГОСТ 6713 прокат 15ХСНДА и 10ХСНДА при равном уровне прочностных свойств имеет более высокие пластические характеристики и ударную вязкость. Порог хладноломкости сталей в нормализованном состоянии составляет соответственно минус 70 и минус 60°С. Испытания проката на растяжение в Z-направлении показали практически одинаковый уровень прочности и пластических свойств как в плоскости прокатки, так и в направлении толщины.

В то же время при сварке микролегированных сталей переход в наплавленный металл ниобия, ванадия, а также нитридов и карбонитридов может способствовать повышению твердости наплавленного металла и оказывать неблагоприятное влияние на ударную вязкость и температуру перехода металла шва в хрупкое состояние.

Кроме того, при повышенных погонных энергиях сварных соединения упомянутых выше сталей чувствительны к низкотемпературному охрупчиванию по линии сплавления.

Выбор соответствующих сварочных материалов и режимов сварки на пониженных погонных энергиях обеспечивает хладостойкость и равнопрочность сварных соединений сталей 15ХСНДА и 10ХСНДА (табл. 14) [13].

Сталь с карбонитридным упрочнением

**Таблица 14. Служебные характеристики сварных соединений стали 15ХСНДА, 10ХСНДА (сварочные материалы: проволока Св-10НМА, диаметр 5 мм, флюс АН-47, для выполнения корневых проходов — электроды УОНИ-13/55)**

Марка стали, толщина, мм	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	КСУ <sub>60</sub> , Дж/см <sup>2</sup>		Шов			Твердость по Виккерсу		
		ось шва	линия сплавления	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{т}}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	ОМ	ОПЗ	Шов
15ХСНДА, 12	561...570	45...53	52...100	736...778	598...644	20...22	135...140	163...174	178...185
15ХСНДА, 16	641...647	62...89	36...75	637...662	513...584	21...23	158...166	170...172	190...210
15ХСНДА, 20	767...773	61...71	47...86	587...658	460...478	23...27	152	159...165	171...174
15ХСНДА, 40	565...597	49...72	37...133	736...799	705...720	18...23	138...145	160...173	186...195
10ХСНДА, 12	541...554	51...59	81...110	753...771	647...690	21...22	148...155	174...177	200...209
10ХСНДА, 16	680...692	49...55	35...42	688...700	595...603	20...23	154...162	171...177	201...217
10ХСНДА, 20	602...606	70...84	38...65	612...685	402...484	24...30	159...165	174...177	197...209
10ХСНДА, 40	649...652	66...85	30...99	675...688	420...425	21...22	159...171	177...186	209...217

Примечание. Образцы всех соединений разрушились при испытании по основному металлу (ОМ), угол загиба составлял 120°.



**Таблица 15. Химический состав и механические свойства**

Марка стали	Доля элементов,									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Nb
AC-50	0,08	0,27	1,37	—	—		0,01	0,054	0,007	0,03
06Г2БД	0,04... 0,08	0,20... 0,50	1,30... 1,60	<0,20	<0,03 5	0,05... 0,08	0,15... 0,30	0,02... 0,05	0,02	0,03... 0,05
09Г2СЮЧ	0,08... 0,11	0,30... 0,60	1,90... 2,20	—	—	—	0,30... 0,60	0,04... 0,07	—	—
S460ML	0,115	0,37	1,55	0,04	0,03	0,002	—	0,031	—	—
09ХГ2СЮч	0,08... 0,11	0,30... 0,60	1,90... 2,20	1,00... 1,30	—	—	—	0,04... 0,7	—	—
HSLA-80	0,05	0,37	0,48	0,68	1,02	0,22	1,26	0,015	0,004	<0,03
10Г2НФБ	0,10	0,40... 0,60	1,60... 1,80	—	0,30... 0,60	—	—	—	0,02... 0,06	0,03... 0,08
09ХГНФБ	0,10	0,40... 0,60	1,60... 1,80	0,70... 0,80	0,70... 0,90	0,2	—	—	0,02... 0,06	0,03... 0,08
15Г2МФЮТРА	0,12... 0,18	0,17... 0,40	1,40... 1,80	—	—	0,01... 0,08	—	0,02... 0,09	0,02... 0,06	—
Alform 700 MC	0,08	—	1,35	—	—	—	—	0,03	0,18	0,06
Bissalloy 80	0,17	0,40	1,15	0,85	—	—	—	—	—	—
8СНТ80 ОР	0,11	0,27	0,86	0,54	0,88	0,44	0,24	—	—	—
NK-HITEN-780B	0,12	0,25	0,92	0,44	1,04	0,32	0,21	—	—	—
09ХГ2НМФБ	0,10	0,40... 0,60	1,60... 1,80	0,60... 0,80	0,70... 0,90	0,20	—	—	0,02... 0,06	0,03... 0,08
15Г2ХНМФЮТРА	0,12... 0,18	0,17... 0,40	1,40... 1,80	0,30... 0,60	0,30... 0,60	0,10... 0,25	—	0,02... 0,09	0,02... 0,06	—
8АНТ80	0,13	0,24	0,75	0,55	0,94	0,40	0,25	—	—	—
St E 890	0,16	0,45	1,00	0,80	2,00	0,50	—	—	—	—
WELDOX-900	0,15	0,22	1,40	0,25	—	0,50	—	—	—	—
DQ-125	0,11	0,10	0,79	0,52	1,46	0,52	0,03	0,05	0,01	<0,03

### сталей нового поколения повышенной и высокой прочности

% по массе					Другие элементы	$P_{CM}$	$C_{ЭКВ}$ ИВ	Механические свойства		
$N_2$	$V$	$B$	$S$	$P$				$\sigma_{0,2}$ , МПа	$T_{исп}$ , °C	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>
0,002	0,003	0,001	0,001	0,008	W, Sn, Zr	0,16	0,32	440	-50	>40
<0,012	0,04... 0,07	-	<0,010	<0,020	-	0,13... 0,20	0,33... 0,43	440	-70	>50
-	-	-	<0,015	<0,020	Ce, Ca	0,20... 0,27	0,41... 0,51	450	-70	>30
0,005	0,05	-	0,003	0,014	-	0,21	0,39	460	-20	>31
-	-	-	<0,01	<0,020	Ce, Ca	0,23... 0,30	0,59... 0,73	550	-70	>30
0,01	0,005	0,002	0,002	0,004	W, Sn, Zr	0,22	0,46	572	-50	>59
-	0,08	-	<0,01	<0,020	Ca, Zr, PЗМ	0,20... 0,22	0,40... 0,46	590	-50	>40
-	0,08	-	<0,01	<0,020		0,24... 0,27	0,60... 0,68	685	-50	>40
-	0,08	0,001... 0,005	<0,01	<0,020		0,20... 0,32	0,37... 0,51	685	-40	>30
-	0,02	0,002	0,002	0,006	-	0,17	0,31	700	-20	>40
-	-	0,002	<0,01	<0,020	-	0,29	0,59	750	-20	>60
-	0,05	0,0016	0,004	0,013	-	0,25	0,53	751	-35	196
-	-	0,001	0,002	0,008	-	0,25	0,51	768	-40	200
-	0,08	-	<0,01	<0,020	Ca, Zr, PЗМ	0,27... 0,32	0,59... 0,68	785	-50	>40
-	0,16	0,001... 0,005	<0,01	<0,020		0,22... 0,38	0,48... 0,72	785	-40	>30
-	0,05	0,002	0,01	0,013	-	0,26	0,53	834	-35	147
-	0,1	-	<0,02	<0,025	-	0,30	0,74	890	-60	>27
-	-	0,002	<0,01	<0,030	-	0,30	0,53	900	-40	>40
0,002	0,07	0,001	0,001	0,003	W, Sn, Zr	0,25	0,56	903	-50	>40

является весьма эффективной и при производстве проката с использованием закалки и отпуска [10]. При этом легирование молибденом, ванадием, а также некоторыми другими элементами, способствуя сохранению высокой прочности в состоянии после закалки и отпуска, позволяет существенно уменьшить степень разупрочнения и ширину разупрочненной зоны сварного соединения. Из высокопрочных закаленно-отпущенных сталей (класс прочности С590 и С590К по ГОСТ 27772-88) для различных строительных конструкций рекомендуют стали марок 12Х2СМФ, 12ГН2МФАД, 12ХГН2МФБАЮ.

В последние годы в мире разработано новое поколение марок экономнолегированных сталей повышенной и высокой прочности [14]. Эти стали содержат до 0,12% углерода, ограниченное количество марганца, молибдена, ниобия, титана, бора, дополнительно могут быть легированы никелем, хромом и другими элементами (в суммарном количестве до 3–4%).

В *табл. 15* приведены химический состав и механические свойства ряда марок сталей нового поколения с пределом текучести 440–900 МПа [14]. Эти стали отличаются более высокой хладостойкостью и более экономным легированием по сравнению с известными ранее материалами. Однако при работе с ними необходимы повышенные требования к выбору сварочных материалов и технологии сварки. При этом основным требованием является снижение доли основного металла в металле шва с целью минимизации в нем суммарного содержания  $\Sigma \text{Al, V, Nb}$ . В *табл. 16* приведена ударная вязкость швов при дуговой сварке сталей с различным содержанием  $\Sigma \text{Al, V, Nb}$  [14].

Снизить долю участия основного металла с содержанием  $\Sigma \text{Al, V, Nb} = 0,07\text{--}0,27\%$  в металле шва довольно легко удавалось при ручной и механизированной сварке в защитных газах. Что касается сварки под флюсом, то ее рекомендуют применять при  $\Sigma \text{Al, V, Nb} < 0,15\%$ , поскольку в остальных случаях это связано со значительным усложнением технологических процессов и снижением их производительности.

Для сварных строительных конструкций применяют и ряд других марок сталей, сведения о которых приведены в [10].

Те или иные стали для сварных строительных конструкций зданий и сооружений выбирают в соответствии с их служебными свойствами, ответственностью конструкций и условиями эксплуатации, регламентированными соответствующими нормами и правилами [10].

**Таблица 16. Ударная вязкость швов при дуговой сварке сталей с различным содержанием  $\Sigma$  Al, V, Nb**

Способ сварки	$\Sigma$ Al, V, Nb в стали, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , при T, °C			T <sub>ХР1</sub> , °C	Особенности сварки соединений
		+20	-40	-70		
Ручная электродуговая	0,07	71...78	40...44	33...38	-70	Сварку соединений осуществляли при использовании традиционных технологических процессов
	0,18	70...77	35...40	30...32	-50	
	0,27	65...74	31...37	23...28	-40	Изменяли режимы и технологию сварки
		69...76	35...40	28...33	-55	
Механизированная в защитных газах	0,09	75...105	45...65	35...50	-70	Сварку соединений осуществляли при использовании традиционных технологических процессов
	0,18	67...95	45...60	30...37	-70	
	0,27	65...95	35...52	25...32	-50	Изменяли режимы и технологию сварки
		75...95	48...53	27...37	-65	
Автоматическая под флюсом	0,07	75...79	47...52	35...42	-70	Сварку соединений осуществляли при использовании традиционных технологических процессов
	0,17	61...64	25...35	16...23	-30	
	0,27	60...62	22...33	15...19	-20	Изменяли режимы и технологию сварки
		71...88	54...73	32...42	-70	

*Примечание. Приведены результаты испытаний 4...5 образцов.*

Для конструкций специальных сооружений — комплекса доменных цехов, специальных резервуаров и газгольдеров, морских стационарных платформ, железнодорожных и автодорожных мостов и т. п. — имеются ведомственные рекомендации по выбору марок сталей.

**Стали для сварных машиностроительных конструкций.** Углеродистые стали являются одним из наиболее распространенных материалов для сварных машиностроительных конструкций. Их применяют при изготовлении оснований рам, станин, поперечин и других узлов деталей металло- и деревообрабатывающего, металлургического и подъемно-транспортного оборудования, автомобилей,

Таблица 17. Химический состав и механические свойства малоуглеродистых сталей

Марка стали	Пределы содержания химических элементов, %			$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> , при		
	C	Mn	Si			+20°C	-20°C	-40°C
ВСтЗкп	0,14–0,22	0,30–0,60	≤0,07	200–240	340–470	–	–	–
ВСтЗпс	0,14–0,22	0,40–0,65	0,05–0,17	210–250	380–490	0,3	0,3	0,3
ВСтЗсп	0,14–0,22	0,40–0,65	0,12–0,30	210–250	380–490	0,5	0,5	–
ВСтЗГпс	0,14–0,22	0,80–1,10	0,15	210–250	380–500	0,3	0,3	0,3
ВСт4пс	0,18–0,22	0,40–0,70	0,12–0,30	240–270	420–540	0,4	0,4	0,4
ВСт6пс	0,28–0,37	0,50–0,80	0,05–0,17	–	–	–	–	–
ВСт6пс	0,28–0,37	0,50–0,80	0,15–0,35	–	–	–	–	–
08кп	≤0,01	0,25–0,45	≤0,03	–	260–370	–	–	–
10	0,07–0,14	0,35–0,65	0,17–0,37	≤220	≤380	–	–	–
20	0,17–0,24	0,35–0,65	0,17–0,37	≤240	–	–	–	–
15К	0,12–0,20	0,35–0,65	0,15–0,30	210–230	380–490	–	0,3	–
16К	0,12–0,20	0,45–0,75	0,17–0,37	240–260	410–500	0,7	0,3	–
18К	0,14–0,22	0,55–0,85	0,17–0,37	280–470	440–580	0,6	0,3	–
20 К	0,16–0,24	0,35–0,65	0,15– 0,30	230–250	410–520	0,6	0,3	–

тракторов, сельскохозяйственных и других машин. Температурная область применения углеродистых сталей охватывает диапазон от минус 40 до плюс 425°С в зависимости от состава, степени раскисления и структурного состояния, обеспеченного термообработкой.

По соображениям обеспечения благоприятной свариваемости содержание углерода в сталях ограничивают верхним уровнем, соответствующим 0,22–0,25%. Реже применяют углеродистые стали с содержанием углерода до 0,30–0,40%.

Химический состав и механические свойства некоторых марок низкоуглеродистых сталей, наиболее широко применяемых в машиностроении, представлены в *табл. 17* [21].

Основными требованиями, предъявляемыми к свойствам сварных соединений из углеродистых сталей, являются их равнопрочность с основным металлом и отсутствие дефектов в металле шва и зоне термического влияния.

Низкоуглеродистые стали имеют благоприятные показатели свариваемости и при соблюдении определенных условий для их сварки могут быть использованы все виды сварки, имеющие промышленное значение. При этом сварные швы обладают необходимой стойкостью против образования кристаллизационных трещин вследствие пониженного содержания углерода. Образование кристаллизационных трещин возможно лишь при неблагоприятной форме провара, например в угловых швах, первом слое многослойного стыкового шва, односторонних швах с полным проваром кромок, когда содержание углерода приближается к верхнему пределу (0,22–0,25%).

Низкоуглеродистые низколегированные стали применяют в различных сварных машиностроительных конструкциях взамен углеродистых, обеспечивая снижение металлоемкости на 20–50%.

Содержание углерода в низколегированных сталях не превышает 0,23%. В зависимости от легирующих элементов, суммарное содержание которых в составе стали не превышает 5%, различают марганцовистые, кремнемарганцовистые, хромокремнемарганцовистые и другие стали, представленные в *табл. 18* [21]. По содержанию S и P эти стали можно отнести к качественным сталям.

В последние десятилетия расширяется производство и применение рафинированных сталей посредством электрошлакового, вакуумного переплава, обработки сталей в ковше синтетическими шлаками с целью снижения содержания серы в их составе для повышения сопротивляемости образованию слоистых (ламинарных) трещин.

**Таблица 18. Химический состав и механические свойства  
низколегированных сталей**

Марка стали	Содержание химических элементов, % (по массе)				Механические свойства		
	C	Si	Mn	Другие	$\sigma_T$ ,	$\sigma_B$ ,	$KCU-40$ , МДж/м <sup>2</sup>
					МПа	МПа	
14Г	0,12–0,18	0,17–0,37	0,7–1,0	–	290	460	0,35
19Г	0,16–0,22	0,17–0,37	0,8–1,15	–	320	480	0,35
09Г2	≤0,12	0,17–0,37	1,4–1,8	–	310	450	0,30
14Г2	0,12–0,18	0,17–0,37	1,2–1,6	≤0,3	340	470	0,35
18Г2	0,14–0,20	0,25–0,55	1,2–1,6	≤0,3	360	520	0,40
12ГС	0,09–0,15	0,5–0,8	0,8–1,2	–	320	470	–
16ГС	0,12–0,18	0,4–0,7	0,9–1,2	–	330	500	0,4
17ГС	0,14–0,20	0,4–0,6	1,0–1,4	–	350	500	0,4
09Г2С	≤0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	–	350	500	0,4
10Г2С1	≤0,12	0,9–1,2	1,3–1,65	(0,15–0,3) Cu, ≤0,3Ni	380	520	–
10ХСНД	≤0,12	0,8–1,1	0,5–0,8	(0,6–0,9) Ce, (0,5–0,8) Ni, (0,4–0,65) Cu	400	540	0,5
15ХСНД	0,12–0,18	0,4–0,7	0,4–0,7	(0,6–0,9) Cr, (0,3–0,6) Ni, (0,2–0,4) Cu	350	500	0,3

Применяемые в машиностроении стали продолжают совершенствоваться и обновляться. Так, в Украине и России достаточно широкое промышленное применение при изготовлении сосудов высокого давления, грузоподъемного и шахтного оборудования, экскаваторов и дорожных машин, а также мостов получила сталь марки 09Г2СЮч, выпускаемая МК «Азовсталь» [15].

Листовой прокат стали 09Г2СЮч поставляют толщиной 8–40 мм со стабильным химическим составом (табл. 19).

Для обеспечения коррозионной стойкости стали, что важно для мостостроения, в состав может дополнительно вводиться медь в количествах 0,3–0,6%.

Химический состав стали в сочетании с термической обработкой обеспечивает гарантированные механические свойства (табл. 20).

**Таблица 19. Химический состав листовой стали 09Г2СЮч**

Содержание элементов, мас. доля, %

Углерод	Марганец	Кремний	Алюминий	Церий	Сера, не более	Фосфор, не более
0,08–0,11	1,9–2,2	0,3–0,6	0,025–0,065	0,002–0,005	0,015	0,02

**Таблица 20. Механические свойства листовой стали 09Г2СЮч**

Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCU/KCV <sup>-70</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
325–450	480–570	19	69/29

Сталь 09Г2СЮч не имеет в своем составе дорогостоящих легирующих элементов (никеля и хрома), но в то же время обеспечивает высокое сопротивление хрупкому разрушению до температуры минус 70°С (на образцах Шарпи). Ударная вязкость проката толщиной 12 мм:  $KCV^{-40} = 87–150$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCU^{-70} = 55–69$  Дж/см<sup>2</sup>.

Механические свойства металла шва сварных соединений из стали 09Г2СЮч приведены в табл. 21 [15].

При правильно выбранных величинах погонной энергии сварки ударная вязкость KCV металла зоны термического влияния находится на уровне основного металла.

Для стран ЕС, США, Японии характерно расширение марочного состава и номенклатуры стального проката, что позволяет решать

**Таблица 21. Механические свойства металла шва сварных соединений из стали 09Г2СЮч**

Сварочный материал	Толщина проката, мм	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		
					+20	-40	-70
Проволока Св-10НМА Ø3 мм, флюс АН-22	17	543	668	23,6	160	158	52,7
	40	520	665	24,4	172	123	53,9
Проволока Св-10НМА Ø3 мм, флюс АН-43	17	454	562	29,0	214	100	36,7
	40	444	533	29,0	154	114	63,0
Проволока Св-08Г2С Ø1,6 мм, смесь 80%Ag + 20%CO <sub>2</sub>	17	461	556	33,7	204	127	60,6
	40	489	571	21,6	–	131	122



современные задачи в энергетическом машиностроении, транспортной отрасли, судостроении, строительстве морских платформ и др.

С 1960 г. в локомотиво- и вагоностроении СССР началось широкое использование низколегированных сталей, таких как 09Г2С, 10Г2С1 и др. Применение в вагоностроении низколегированных сталей взамен углеродистых позволило сэкономить более 2 млн т металлопроката [16], а кроме того, повысило надежность и прочность выпускаемых вагонов при одновременном улучшении важного эксплуатационного показателя — коэффициента тары.

Необходимо отметить, что в Украине вагоны эксплуатационного парка имеют грузоподъемность 68–71 т, массу тары 20–23 т, осевую нагрузку 215–225 кН. В то же время в США серийные вагоны имеют грузоподъемность 90–100 т, массу тары 19–20 т, осевую нагрузку 300–315 кН.

Дальнейшего увеличения грузоподъемности отечественных вагонов, их надежности и долговечности, уменьшения коэффициента тары и затрат на ремонтно-восстановительные работы можно достичь применением в вагоно- и локомотивостроении сталей класса прочности 400–500 МПа. Считают перспективными для этих целей стали с карбонитридным упрочнением [16].

С целью повышения коррозионной стойкости сварных конструкций вагонов и локомотивов в Украине и России расширяют применение высоколегированных нержавеющей сталей (хромоникелевых Х18Н10Т и безникелевых 10Х13Г18ДУ).

В мировом автомобилестроении, приборостроении и строительстве широко применяют стальные оцинкованные листы, получаемые электролитическим и горячим способами, на которые с целью улучшения коэффициента трения при штамповке наносят тонкие органические пленки. Хорошими свойствами обладают двухслойные цинковые покрытия с наружным слоем из сплава Fe–Zn (15–25% Fe). В качестве материала для сварных автомобильных баков предложены стальные листы, в которых традиционные покрытия 92% Pb + 8% Sn заменены бессвинцовыми покрытиями 90% Zn + 10% Fe + хроматная пленка + слой смазочного покрытия, и бесхромистые покрытия, получаемые электроцинкованием. С внутренней стороны на лист наносят тонкий слой органической смолы, хорошо сопротивляющийся воздействию топлива. Добавки в него металлических порошков способствуют улучшению свариваемости, а наличие смазочного слоя обеспечивает лучший коэффициент трения при штамповке.

**Таблица 22. Наиболее распространенные марки трубных теплоустойчивых сталей и критические условия их эксплуатации**

Марка стали	Стандарт на сталь	Страна-изготовитель	Максимальная температура, °С	Максимальное давление пара, МПа
13CrMo44	DIN 17175	Германия	520	–
10CrMo9 10	DIN 17175	Германия	540...545	20...28
P22/T22	ASTM, A-335/ A-199, A-213	США		
12Х1МФ	ТУ 14-3-460-75	СНГ	545...550	21...25,5
14MoV63	DIN 17175	Германия		
Сталь 15128 (CrMoV)	N415128	Чехия/ Словакия		
15Х1М1Ф	ТУ 14-346-75	СНГ	550	25,5
15CrMoV510	VdTUV-Wb506	Германия		
X20CrMoV121	DIN 17175	Германия	550...560	20

Интенсивное развитие тепловой энергетики в мире в условиях реализации стратегии минимизации ущерба, наносимого окружающей среде, требует повышения температуры в топках и рабочих органах котельных агрегатов, что, кроме снижения выделения вредных оксидов, сопровождается повышением их КПД [17]. Поэтому остро стоит вопрос выбора свариваемых сталей, работающих в условиях сверхкритических параметров пара ( $T \leq 600\text{--}610^\circ\text{C}$ ,  $P \leq 30\text{--}31$  МПа).

В табл. 22 приведены марки наиболее широко применяемых отечественных и зарубежных теплоустойчивых сталей [17].

Согласно [17], функциональные возможности стали с ферритной  $\alpha$ -решеткой, упрочненной дополнительным легированием хромом, молибденом, ванадием, вольфрамом, исчерпываются при  $T > 600^\circ\text{C}$ . Выше этой температуры более эффективными являются высоколегированные аустенитные стали и сплавы.

Однако изготовление узлов теплоэнергетического оборудования из аустенитных сталей сопряжено с рядом проблем, связанных с их физическими свойствами и свариваемостью. Поэтому технические, экологические и экономические причины потребовали создания новых сталей с  $\alpha$ -решеткой, имеющих достаточную технологичность и пригодность для работы при  $T \sim 560\text{--}600^\circ\text{C}$ . Такие ферритно-мартенситные стали типа P91/T91 (X10CrMoVNb91) и P92

были разработаны в США и получили мировое признание [17, 18]. Эти стали по физическим и функциональным свойствам характеризуют достаточно низкая теплоемкость, низкие коэффициенты теплопроводности и термического расширения, удовлетворительная (применительно к условиям производства и эксплуатации) длительная прочность, коррозионная стойкость, пластичность, свариваемость, обрабатываемость и пригодность наиболее распространенных ультразвукового и магнитно-порошкового методов для контроля сварных соединений, а также более низкая по сравнению с высоколегированными материалами стоимость.

Благодаря более высокому уровню длительной прочности применение стали P91 вместо ранее используемых низколегированных сталей и стали X20 позволяет уменьшить толщины стенок компонентов котельных установок (рис. 6), что обеспечивает значительное снижение металлоемкости, массы конструкций и экономию средств при их изготовлении [17]. Путем правильного выбора сварочных материалов и технологии сварки удастся обеспечить высокие эксплуатационные характеристики сварных соединений из стали P91 [18].

Испытаниями под нагрузкой при температурах от 610 до 630°C установлено, что при орбитальной сварке ТИГ с подачей горячей присадочной проволоки показатели выше, чем при подаче холодной проволоки и при ручной ТИГ/МИГ сварке.

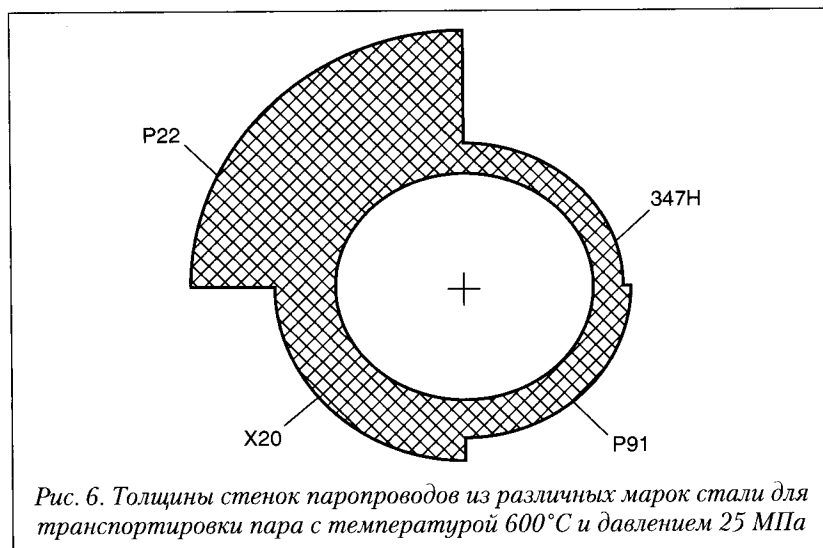


Рис. 6. Толщины стенок паропроводов из различных марок стали для транспортировки пара с температурой 600°C и давлением 25 МПа

**Алюминий и алюминиевые сплавы.** Промышленное применение алюминия обусловлено его малой плотностью ( $2,7 \text{ г/см}^3$ ), примерно в три раза меньшей, чем у стали, повышенной хладостойкостью, коррозионной стойкостью в окислительных средах и на воздухе. Чистый алюминий обладает малой прочностью (до 100 МПа), поэтому из него изготавливают изделия, для которых требуется только высокая коррозионная стойкость.

Алюминий и его сплавы обладают низкой температурой плавления (температура плавления чистого алюминия  $660^\circ\text{C}$ ), высокой тепло- и электропроводностью, повышенным по сравнению со сталью коэффициентом линейного расширения и более низким значением модуля упругости.

Алюминиевые сплавы разделяют на литейные и деформируемые. Деформируемые алюминиевые сплавы, в свою очередь, подразделяют на сплавы неупрочняемые и сплавы, упрочняемые термической обработкой (*табл. 23*) [21].

В сварных конструкциях в основном используют полуфабрикаты (листы, профили, трубы и т. д.) из деформируемых сплавов. Механические свойства различных полуфабрикатов представлены в *табл. 24* [21]. В *табл. 25* представлены сопоставимые марки деформируемых алюминиевых сплавов отечественного и зарубежного производства [20].

Сплавы АМг1–АМг6, содержащие в качестве основного легирующего элемента магний (0,9–6,3%), широко используют в качестве конструкционного материала в судостроении, вагоностроении, автомобилестроении и в нефтегазовой промышленности.

В настоящее время в системе легирования Al-Mg разработана новая группа сплавов с дополнительным введением скандия (до 0,25%) [20]. Такие сплавы сочетают высокую прочность с хорошей пластичностью и эксплуатационными характеристиками, а также с достаточной коррозионной стойкостью (*табл. 26*).

Алюминиевые сплавы, содержащие скандий, благодаря хорошей свариваемости и высокой коррозионной стойкости являются перспективным материалом для производства транспортных средств и строительных сварных конструкций.

В последние два десятилетия большое внимание уделяли разработке алюминиево-литиевых сплавов [20]. При добавке 1 ат.% лития плотность алюминиевого сплава снижается на 3–4%, а жесткость увеличивается на такую же величину. Поэтому алюминиево-литиевые сплавы обладают на 8–15% меньшей плотностью по срав-

Таблица 23. Марки, химический состав и свариваемость алюминиевых деформируемых сплавов

Система	Марка сплава	Химический состав, % (по массе)	Свариваемость (сварка плавлением)			Рекомендуемые марки сварочной проволоки	Горячеломкость	
			без при- садки	с при- садкой, гр. А	с при- садкой, гр. Б		крестовая проба, К, %	проба МВТУ, А, мм/мин
А. Термические неупрочняемые алюминиевые сплавы								
Al	АД1	99,3 Al	св	св	св	св А97; св. А85	5,0	9,0
Al-Mn	АМц	1,3 Mn	св	св	—	свАМц	0,7	7,0
Al-Mg	АМг1	1,1 Mg	св	св	—	св. АМг1	12,0	6,0
	АМг2	2,2 Mg; 0,4 Mn	нс	нс	св	св. АМг3	12	6,0
	АМг3	3,6 Mg; 0,6 Si; 0,5 Mn	св	св	—	св. АМг3	8,0	8,0
	АМг4	4,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti	св	св	св	св. АМг4	10	7,0
	АМг5	5,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti	св	св	св	св. АМг5	10	7,0
	АМг6	6,3 Mg; 0,6 Mn; 0,06 Ti	св	св	св	св. АМг6	8,0	8,0
Б. Термически упрочняемые алюминиевые сплавы								
Al-Cu	Д20	6,5 Cu; 0,6Mn; 0,15 Ti	св	св	—	Д20	15	6,0
	1201	6,3 Cu; 0,3 Mn; 0,06 Ti; 0,17 Zr; 0,1 V	св	св	—	св. 1201	5,0	10
	01205	6,3 Cu; 0,6Mn; 0,06 Ti; 0,11 Zr; 0,15Cd	нс	нс	св	св. 1201	12	6,0
Al-Mg-Si	АД31	0,6 Mg; 0,5 Si	нс	нс	св	св. АК5	15	6,0
	АД33	1,1 Mg; 0,25 Cu; 0,6 Si; 0,25 Cr	нс	нс	св	св. АК5	12	6,0

Система	Марка сплава	Химический состав, % (по массе)	Свариваемость (сварка плавлением)			Рекомендуемые марки сварочной проволоки	Горячеломкость	
			без присадки	с присадкой, гр. А	с присадкой, гр. Б		крестовая проба, К, %	проба МВТУ, А, мм/мин
Al-Mg-Si	АД35	1,1 Mg; 1,0 Si; 0,7 Mn; 0,25 Cr	нс	нс	св	св. АК5	12	6,0
	АВ	0,7 Mg; 0,3 Cu; 0,85 Si; 0,25 Mn	нс	нс	св	св. АК5	10	7,0
Al-Zn-Mg	В92ц	4,4 Mg; 3,2 Zn; 0,8 Mn; 0,13 Zr; 0,14Cr	св	св	нс	св. В92ц	12	6,0
	1915	1,1 Mg; 3,7 Zn; 0,4 Mn; 0,18Zr	нс	нс	св	св. 1557	10	7,0
Al-Mg-Cu	ВАД1	2,5Mg; 4,1 Cu; 0,6 Mn; 0,06 Ti; 0,15Zr	св	св	нс	ВАД1	10	7,0
	Д1	0,6 Mg; 4,3 Cu; 0,6 Mn	нс	нс	нс	Д1	40	2,0
	Д16	1,5Mg; 4,3 Cu; 0,6 Mn	нс	нс	нс	Д16	50	1,0
	Д19	2,0 Mg; 4,0 Cu; 0,75 Mn	нс	нс	нс	Д19	45	2,0
Al-Mg-Cu-Zn	В95	2,3 Mg; 1,7Cu; 6,0 Zn; 0,4 Mn; 0,18Cr	нс	нс	нс	В95	50	1,0
	В96	2,6Mg; 2,3 Cu; 8,5 Zn	нс	нс	нс	В96	60	1,0
Al-Mg-Si-Cu	АК6	0,6 Mg; 2,2 Cu; 0,9 Si; 0,6 Mn	нс	нс	нс	АК6	45	—
	АК8	0,6 Mg; 4,3 Cu; 0,9 Si; 0,7 Mn	нс	нс	нс	АК8	50	—
Al-Mg-Cu-Fe-Si	АК4	1,6Mg; 2,2 Cu; 1,2 Fe; 1,3 Ni	нс	нс	нс	АК4	60	—
	АК4-1	1,6Mg; 2,2 Cu; 1,2 Fe; 1,2 Ni	нс	нс	нс	АК4	65	—

Примечание: «св» — свариваемые; «нс» — несвариваемые.

Таблица 24. Механические свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

Сплав	Состояние	Лист $S=2$ мм			Лист $S=10$ мм			Плита $S=20$ мм			Профиль			Поковка $m=80-100$ кг		
		$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$
АД0	М	80	3,5	35	80	3,5	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АД1	Н	150	100	6	150	100	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АМц	М	120	60	40	110	60	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	П	170	130	25	170	130	25	150	120	22	-	-	-	-	-	-
	Н	220	280	5	220	180	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АМг1	М	120	65	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Н	200	180	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АМг2	М	190	80	25	170	-	16	180	-	7	-	-	-	150	130	-
	Н	270	220	4	220	-	15	-	-	-	230	-	12	-	-	-
АМг3	М	220	100	25	190	80	15	190	-	15	180	80	12	170	-	12
	П	250	200	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АМг4	М	280	140	20	260	120	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Н	340	160	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АМг5	М	300	150	20	280	130	15	-	-	-	-	-	-	300	150	15
	Н	-	-	-	340	160	14	320	170	23	270	120	15	-	-	-
АМг6	М	340	170	20	320	160	15	-	-	-	345	170	20	340	180	21
	Н	400	300	9	-	-	-	400	310	7	355	190	19	-	-	-
Д20	Т1	400	300	10	380	280	8	380	280	8	350	240	8	400	320	12
1201	Т1	430	320	60	400	300	10	450	350	7	420	350	8	380	270	10
	Т1Н	450	350	55	420	340	6	460	350	5	-	-	-	-	-	-
01205	Т1	440	350	9	420	330	7	420	320	7	465	370	8	445	365	7

Продолжение таблицы 24

Сплав	Состояние	Лист S=2 мм			Лист S=10 мм			Плита S=20 мм			Профиль			Поковка т=80-100 кг		
		$\sigma_{B,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{B,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{B,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{B,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma_{B,1}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$
Д21	T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	430	350	9
АД31	T	170	80	22	170	80	22	-	-	-	140	70	13	-	-	-
	T1	240	190	11	240	190	11	235	200	13	255	227	12	240	200	11
АД33	T	250	110	19	250	110	19	-	-	-	180	110	15	-	-	-
	T1	310	260	14	310	260	14	290	270	10	290	260	12	270	20	8
АД35	T	240	140	18	240	140	18	270	200	13	270	200	13	-	-	-
	T1	320	250	12	320	250	12	330	300	10	330	300	10	330	300	10
АВ	T	250	160	23	250	160	23	-	-	-	180	-	14	-	-	-
	T1	320	270	13	320	270	13	330	290	13	335	295	12	300	260	10
В92ц	T	400	250	15	400	250	15	420	280	12	440	320	10	420	280	10
	T1	420	300	12	420	300	12	-	-	-	470	360	8	430	300	8
1915	T	350	220	17	350	220	17	-	-	-	370	250	11	350	220	14
	T1	380	300	10	380	300	10	420	260	14	400	320	10	370	290	12
ВАД1	T	420	290	8	440	340	7	420	270	7	430	310	10	-	-	-
	T1	430	300	7	450	360	6	-	-	-	-	-	-	410	290	7
Д1	T	370	200	15	380	200	15	380	220	11	380	230	12	360	180	6
Д16	T	420	280	13	440	280	10	420	280	6	430	310	15	-	-	-
	T1	465	355	12	465	360	8	-	-	-	445	370	11	-	-	-
Д19	T1	430	280	12	435	280	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
В95	T1	520	440	14	-	-	-	-	-	-	600	550	8	610	550	10
В96	T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	680	640	7	-	-	-



**Таблица 25. Сопоставление марок деформируемых алюминиевых сплавов  
отечественного и зарубежного производства**

<i>Международ- ный стан- дарт (ISO)</i>	<i>Украина, Россия (ГОСТ 4784)*</i>	<i>США (AA), Япония (JS)</i>	<i>Канада (CSA)</i>	<i>Англия (BS)</i>	<i>ФРГ (DIN)</i>	<i>Франция (AFNOR)</i>	<i>Италия (UNI)</i>	<i>Венгрия (MSZ)</i>
–	A99	1199	9999	1	Al99,99R	–	–	Al99,99
Al99,7	A7	1170	9970	–	Al99,7	A7	P–Al99,7	Al99,7
Al99,5	АД0 (1011)	1150	–	1B	Al99,5	A5	P–AP7	–
–	A5	–	9950	–	–	–	–	Al99,5
AlMn1	АМц (1400)	3103	M1	N3	AlMn	A–M1	P–AM1,2	AlMn1
–	АМцС (1401)	–	–	–	–	–	–	–
AlMg1	АМг1 (1510)	5005	–	–	AlMg1	A–G6	–	AlMg1
AlMg2	АМг2 (1520)	5051	GR20	N4	AlMg2Mn0,3	A–G2	P–ARG2	AlMg2
AlMg2	АМг2 (1520)	5061	–	–	–	–	–	–
AlMg3	АМг3 (1530)	5754	Gr40	N5	AlMg3	A–G3	–	AlMg3
AlMg4	АМг4 (1540)	5086	–	–	AlMg4Mn	A–G4MG	–	AlMg4
AlMg4	АМг4 (1540)	5082	–	–	AlMg4,5	–	–	–
AlMg5	АМг5 (1540)	5056A	GM50R	N6	AlMg5	A–G5	P–AG5	AlMg5
AlMgSi	АД31 (1310)	6063	GS10	H9	AlMgSi0,5	A–GS	P–ASO,4G	AlMgSi
–	АД33 (1330)	6061	GS11N	H20	–	–	–	–

Продолжение таблицы 25

Международный стандарт (ISO)	Украина, Россия (ГОСТ 4784)*	США (AA), Япония (JS)	Канада (CSA)	Англия (BS)	ФРГ (DIN)	Франция (AFNOR)	Италия (UNI)	Венгрия (MSZ)
AlSi1MgMn	АД35 (1350)	6351	GS11R	H30	AlMgSi1	A-SGM	P-AS11G	AlMgSi1
AlCu2Mg	Д18 (1180)	2117	-	-	AlCu2,5Mg0,5	A-U2G	-	AlCu2Mg
AlCu4MgSi	Д1 (1110)	2017A	-	H14	AlCuMg1	-	-	AlCu4Mg1
AlCu4Mg1	Д16 (1160)	2024	-	-	AlCuMg2	A-U4G1	-	AlCu4Mg2
AlCu4SiMn	АК8 (1380)	2014	GS14N	H15	AlCuSiMn	A-U4SG	P-AC4GM	-
AlZn4Mg	1915	7020	-	-	AlZn4,5Mg1	A-Z5G	-	-
AlZn4Mg	1915	7005	-	-	AlZn5Mg1	-	-	-
AlZn6MgCu	В95 (1950)	7075	-	L95	AlZn5Mg1,5	A-Z5U	-	-

\* ГОСТ 4784. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые.

**Таблица 26. Сравнительные результаты механических испытаний листов толщиной 3 мм и сварных соединений из сплавов 1570 (Sc) и АМг6**

Сплав	Механические свойства основного материала			Характеристики сварного соединения		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Присадочная проволока	$\sigma_B$ , МПа	Угол изгиба, °
1570	421,4	313,6	20,0	1571	398,0	140
АМг6	343,0	166,6	25,0	СвАМг6	336,1	140

нению с традиционными алюминиевыми сплавами, большим значением  $\sigma_{\text{в}}/\rho$  и  $E/\delta$ , хорошей свариваемостью, что делает их весьма привлекательными для авиа- и ракетостроения.

В мире продолжается разработка и совершенствование алюминиевых сплавов различного назначения с использованием разнообразных систем легирования [20]. При этом одну из ключевых позиций при разработке и усовершенствовании материалов на алюминиевой основе занимают вопросы прочности, долговечности, обеспечения высокой эффективности, что в конечном итоге определяет конкурентоспособность изделия.

Технологический процесс изготовления ответственных сварных конструкций из алюминиевых сплавов требует тщательного выполнения ряда последовательных операций [20]:

- подготовительных — расконсервации, правки полуфабрикатов, разметки и маркировки деталей;
- резки, гибки и штамповки полуфабрикатов;
- химической и механической подготовки основного металла и сварочных материалов;
- сборки соединяемых элементов в специальных приспособлениях;
- сварки деталей и узлов;
- контроля качества соединений;
- послесварочной обработки изделий.

Схему выполнения подготовительных работ для обеспечения качества и высокого уровня показателей надежности при изготовлении изделий из алюминиевых сплавов см. на *рис. 7* [20].

При изготовлении сварных алюминиевых конструкций перво-степенное значение приобретает культура производства. В сборочно-сварочных цехах не допускают выполнения работ, связанных с интенсивным образованием пыли и дыма. Сварку алюминиевых сплавов выполняют в чистых помещениях, чистота которых достигается их отделкой и тщательной уборкой. Все подгоночные и сварочные работы выполняют в чистой специальной одежде и в сухих чистых хлопчатобумажных перчатках. Сварные изделия изготавливают в цехах с относительной влажностью воздуха не более 70%, в районах с повышенной влажностью не более 80%. При этом температуру цеха поддерживают для холодного периода в пределах плюс  $18\pm 2^\circ\text{C}$  и теплого — плюс  $20\pm 2^\circ\text{C}$ .

Для изготовления заготовок из алюминиевых сплавов часто используют гибку и штамповку. Показатели деформируемости различных алюминиевых сплавов приведены в *табл. 27* [23].

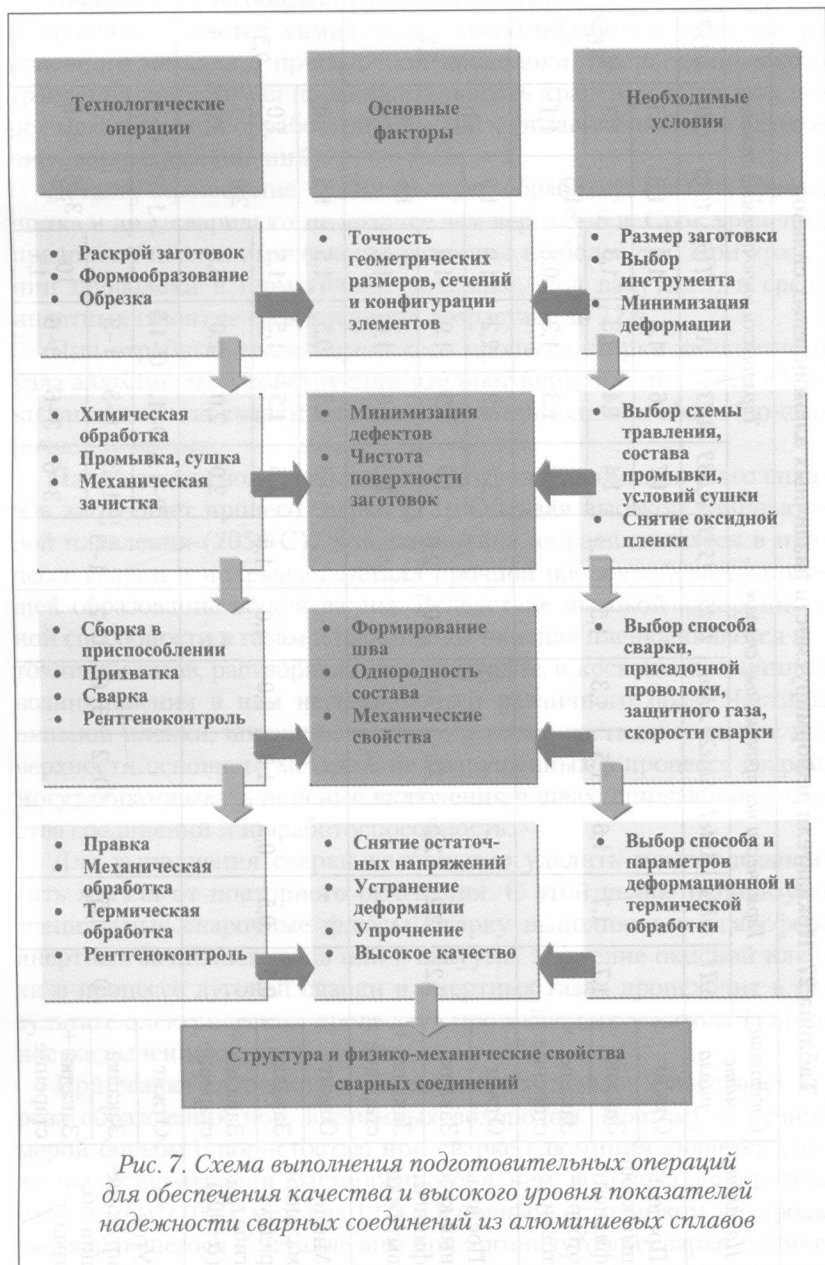


Таблица 27. Показатели деформируемости различных алюминиевых сплавов

Параметр	Состояние материала	Термически неупрочняемые сплавы						Термически упрочняемые сплавы							
		АД1	АМц	АМг1	АМг2	АМг6	1515	1523	АД33	АД35	АВ	Д16	1915	1201	АД37
Предельный коэффициент отбортовки	Отжиг	1,7	1,7	1,6	1,5	1,3	1,5	1,4	1,7	1,6	1,6	1,4	1,3	1,5	1,6
	Закалка								1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	
	Закалка + старение								1,3	1,3	1,3	0,8		1,1	
Предельный коэффициент вытяжки	Отжиг	2,2	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,2	1,9	1,9	2,0	2,2
	Закалка								1,9	1,9	1,9	1,9	1,6		
	Закалка + старение								1,6	1,6	1,6	1,2		1,4	
Минимальный радиусгиба $r_{\min}$ ( $\alpha=90^\circ$ )	Отжиг	0,5	0,5	0,5	1,0	2,0	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	0,5
	Закалка								1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	1,0	
	Закалка + старение								2,0	2,0	2,0	5,0		3,0	
Угол пружинения $\Delta\alpha$ , градус	Отжиг	0	1,5		0-2	3-6	0-2	1-3	0-1,5	0-1,5	0-1,5	1-3	1-3	0-2	
	Закалка								1-3	1-3	1-3		3-6	4-8	
	Закалка + старение								3-6	3-6	3-6	10-15		4-8	

Наиболее целесообразным с точки зрения качества сварных соединений является химический способ обработки поверхности основного металла и присадочной проволоки. После химического травления допустимая продолжительность хранения заготовок перед механической обработкой 120–200 ч (в зависимости от категории сварных соединений).

Детали, прошедшие механическую обработку (шабер, фреза, щетка и др.), сваривают не позднее чем через 3–8 ч. Срок хранения проволоки после химического травления не более 8 ч. При хранении проволоки в герметичной упаковке (под вакуумом, в среде инертных газов) ее срок хранения возрастает до 72 ч.

При обработке технологического процесса сварки конкретного узла алюминиевой конструкции уделяют внимание точности сборки заготовок для сварки и возможности применения сборочно-сварочной оснастки.

Наличие окисной пленки на поверхности алюминия и его сплавов затрудняет процесс сварки [22]. Обладая высокой температурой плавления (2050°C), окисная пленка не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл прочной оболочкой, затрудняющей образование общей ванны. Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды окисная пленка является источником газов, растворяющихся в металле, и косвенной причиной возникновения в нем несплошностей различного рода. Частицы окисной пленки, попавшие в ванну, а также частицы пленок с поверхности основного металла, не разрушенных в процессе сварки, могут образовывать окисные включения в швах, снижающие свойства соединений и их работоспособность.

Для выполнения сварки необходимо удалить пленку и защитить металл от повторного окисления. С этой целью используют специальные сварочные флюсы, сварку выполняют в атмосфере инертных защитных газов или в вакууме. Удаление окисной пленки в процессе дуговой сварки в инертных газах происходит в результате электрических процессов, протекающих у катода (катодное распыление).

При сварке алюминия и алюминиевых сплавов существует угроза образования пор, вызванных водородом. Поэтому основной мерой борьбы с пористостью при сварке алюминия является снижение концентрации растворенного в нем водорода до предела 0,69–0,7 см<sup>3</sup>/100 г металла [22]. Основным источником водорода, растворяющегося в металле шва при аргонодуговой сварке, являет-

ся влага, адсорбированная поверхностью металла и входящая в состав окисной пленки в виде гидратированных окислов. Количество ее определяется состоянием поверхности металла и зависит от качества обработки его перед сваркой.

Снижения пористости сварных швов достигают за счет применения рациональной обработки поверхности проволоки и основного металла перед сваркой, оптимизации режимов сварки и сварочных материалов, дополнительного перемешивания металла с помощью магнитного поля, вибрации, ультразвука.

Алюминий и его сплавы отличаются высокой тепло- и электропроводностью, поэтому для электроконтактной сварки этих материалов необходимы мощные машины и большая сила тока, особенно при точечной сварке. Для повышения эффективности нагрева и плавления целесообразно сваривать эти металлы при малой длительности импульсов тока или на больших скоростях при сварке плавлением.

Большинство алюминиевых сплавов склонны к образованию горячих трещин в шве или на границе его сплавления с основным металлом [20, 21].

Необходимость повышения качества соединений традиционных и новых алюминиевых сплавов требует постоянного совершенствования существующих способов дуговой сварки и поиска новых альтернативных технологий соединений.

**Сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в аргоне** ведется преимущественно синусоидальным током промышленной частоты. Однако лучшие результаты обеспечивает применение пульсирующего сварочного тока прямоугольной формы в сравнении с синусоидальным. Пульсация дуги достигается асимметрией сварочного тока, низкочастотной модуляцией переменного тока или изменением амплитуды импульсов тока прямой полярности.

Лучшие результаты по катодному разрушению исходной оксидной пленки и предотвращению ее образования получают при сварке импульсной дугой, питаемой разнополярным импульсным током [20].

Применение асимметричного разнополярного тока прямоугольной формы способствует также эффективной дегазации расплава в сварочной ванне.

В *табл. 28* приведены типичные механические свойства сварных соединений различных алюминиевых сплавов, выполненных ТИГ-сваркой в аргоне [23].

**Таблица 28. Механические свойства сварных соединений  
из алюминиевых сплавов\***

Сплав**	Присадочная проволока	Предел прочности, МПа	Угол изгиба, градус	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	
				металла шва	ЗТВ
АМгМ	Св-АМг1	120	180	215	180
АМг1М	Са-АМг2	155	140	270	180
АМг2М	Св-АМг3	170	120	280	195
АМг4М	Св-АМг63	240	115	275	190
АМг6М	Св-АМг63	315	102	303	185
1515	Св-1523	210	180	285	218
1523	Св-1535	250	150	290	215
1535	Св-1535	307	120	307	218
1545	Св-1545	367	108	322	211
1570	Св-1571	389	96	325	205
1970	Св-1970	440	30	300	202
АВТ	Св-АМг63	240	98	200	135
АД33	Св-АМг63	260	110	240	145
АД37	Св-АМг63	300	135	265	185
1419	Св-1557	225	85	185	145
ВАЛ16	Св-АМг63	315	35	280	90
ВАЛ14	Св-1217	280	23	180	70

\* Приведены средние значения результатов испытаний пяти образцов.  
\*\* Лист толщиной 1,0–2,0 мм.

**Сварку неплавящимся электродом в защитном газе** обычно применяют, когда необходимо выполнить многослойные швы Х-образной формы или с узкой разделкой кромок (сварка в узкий зазор) за несколько проходов. Она также эффективна при изготовлении тавровых и нахлесточных соединений. Для снижения пористости сварку ведут импульсной дугой. Наиболее существенное уменьшение количества пустот в наплавленном металле отмечается при защите дуги гелием или гелий-аргоновой смесью.

**Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом** в среде аргона, гелия или их смеси благодаря меньшему уровню тепловложения по сравнению с тепловложением при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом обеспечивает хорошие результаты при



изготовлении современных конструкций из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Сварку алюминиевых сплавов толщиной 0,8–3,0 мм **плазменной дугой** обычно выполняют на постоянном токе обратной полярности в аргоне. При этом качество сварных соединений существенно повышается за счет полного разрушения и удаления окисной пленки, улучшаются условия формирования металла шва, а также резко снижается геометрический концентратор напряжения на границе перехода шва к основному металлу, что способствует повышению ресурса сварных соединений при переменном нагружении.

В настоящее время в промышленных условиях реализована технология **электронно-лучевой сварки (ЭЛС)** разнообразных деталей и типовых элементов конструкций из алюминиевых сплавов толщиной от долей миллиметра до 200 мм и более (авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, общее машиностроение и др.). Расширению внедрения ЭЛС алюминиевых сплавов способствует создание установок, позволяющих работать в условиях низкого или локального вакуума, разработка систем автоматического управления процессом сварки, позволяющих получать высококачественные сварные соединения [20].

**Лазерная сварка**, в отличие от ЭЛС, не требует вакуумных камер, а по технологическим возможностям приближается к этому процессу. Применение лазерной и лазерно-дуговой сварки при изготовлении алюминиевых сварных конструкций непрерывно растет.

**Сварка трением с перемешиванием (STIR)** является новым технологическим процессом, позволяющим получать соединения алюминиевых сплавов без расплавления основного металла [20]. Для нее характерно малое тепловложение в процессе соединения, что позитивно проявляется на степени разупрочнения металла в зоне нагрева, а также малая деформация сварных изделий.

**Контактную сварку** (точечную и шовную) применяют для соединения листов и профильного проката преимущественно из деформируемых алюминиевых сплавов. Процесс ведут на жестких режимах.

Контактную стыковую сварку различных деталей из алюминиевых сплавов осуществляют преимущественно оплавлением. Режимы сварки отличаются большими скоростями оплавления и осадки.

Для соединения заготовок из алюминиевых сплавов применяют также сварку под флюсом плавящимся электродом, диффузионную сварку и пайку различными способами.

Сварные конструкции из алюминия и его сплавов склонны к короблению, что объясняется высоким коэффициентом теплового расширения. Снижение деформаций в конструкциях может быть достигнуто за счет использования различных технологических мероприятий (выбор соответствующего способа сварки и оптимальных режимов, рациональный порядок наложения швов, силовое нагружение свариваемых элементов, нагрев и др.).

Алюминиевые сплавы широко используют во многих отраслях машиностроения, а также гражданского и промышленного строительства [20]. При этом в летательных аппаратах доля конструкционных материалов из алюминиевых сплавов занимает до 80% по массе. В последнее десятилетие особое внимание уделяют использованию алюминиевых сплавов в автомобилестроении, вагоностроении, судостроении. Значительная часть алюминиевой продукции в виде особо тонкого проката и фольги идет на производство тары и упаковки.

Среднее потребление в 2003 г. алюминия и его сплавов на душу населения в Украине составило 2,0 кг, в России – 2,5 кг, в Западной Европе – 19,8 кг, Германии – 27,1 кг, Японии – 27,9 кг, США – 29,2 кг [20]. Рост потребления алюминиевых сплавов в различных странах, как правило, связан с выпуском новой продукции. При этом следует отметить, что по показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и титановым сплавам (табл. 29) [22].

Фактором, сдерживающим объемы производства алюминия, считают его стоимость, определяемую высоким энергопотреблением металлургического производства алюминия.

Согласно [20] в настоящее время внутренний спрос на алюминиевую продукцию в Украине составляет около 360 тыс. т в год. Основные потребители: стройиндустрия – 275–280 тыс. т и авиакосмическая промышленность – 52 тыс. т. Остальное – изготовление кабельной продукции и упаковочной фольги.

Алюминиевая промышленность Украины включает Николаевский глиноземный завод (НГМЗ, производство глинозема 1,2 млн т в год), Запорожский алюминиевый комбинат (ЗАЛК, производство первичного алюминия 110 тыс. т в год), заводы по производству вторичного алюминия (АВТ «Интерсплав», «Обимет», «Укрчер-

**Таблица 29. Относительные показатели свойств различных материалов**

<i>Материал</i>	<i>Масса при постоянном объеме</i>	<i>Предел</i>		
		<i>прочности</i>	<i>текучести</i>	<i>выносливости</i>
АМц	0,35	0,88	0,55	–
АМг6	0,34	2,45	1,95	–
Д16	0,352	3,2	3,83	1,44
М40	0,352	3,28	4,8	–
Низкоуглеродистая сталь 20	1	1	1	1
Низколегированная сталь 30ХГСА	1	2,62	3,14	3,12
Легированная сталь ВНС-2	0,98	2,98	4,4	2,0
Титан чистый	0,57	0,94	0,86	–
Титан технический	0,57	2,82	4,3	–
Сплав ОТ4	0,58	3,06	4,12	2,9

мет» и др.) общей мощностью 165 тыс. т, а также Броварской завод алюминиевых строительных конструкций (мощность 15 тыс. т в год).

В Украине существуют объективные предпосылки для увеличения производства и потребления алюминия и алюминиевых сплавов, особенно в таких областях, как строительство, энергетика, авиакосмическая промышленность, упаковка.

**Титан и титановые сплавы.** Среди новых конструкционных материалов, освоенных промышленностью за последние десятилетия, особое место занимает титан и сплавы на его основе [24, 25, 155].

Плотность титана  $4,11 \text{ г/см}^3$ , что почти в два раза ниже, чем у железа. Титан обладает весьма высокой температурой плавления и кипения (1668 и  $3260^\circ\text{C}$  соответственно). Скрытая теплота плавления, а также испарения титана почти в два раза больше, чем у железа, поэтому расплавление титана требует больших затрат энергии. По удельной теплоемкости титан занимает промежуточное место между алюминием и железом.

Промышленная технология получения титана достаточно сложна. Первоначально получают титановую губку, которая служит сырьем для производства компактного титана. Затем ее прессуют вместе с легирующими элементами и обратными материалами в рас-

ходуемый электрод, который плавят в вакуумных дуговых печах. Для этих целей применяют также электронно-лучевые, плазменные и электрошлаковые печи.

Титан высокой степени чистоты весьма пластичен ( $\delta \approx 60\%$ ), но не находит эффективного применения как конструкционный металл, поскольку обладает невысокой прочностью ( $\sigma_{\text{в}} \approx 250$  МПа). В качестве конструкционного металла используют технический титан, содержащий ряд примесей, из которых важнейшими являются примеси внедрения: кислород, азот, водород, а также углерод. Эти примеси повышают прочность титана до 300–550 МПа, снижая относительное удлинение до 25%.

Основной легирующий элемент в титановых сплавах — алюминий. Следующими по важности легирующими элементами являются ванадий и молибден. В качестве легирующих элементов промышленных сплавов используют хром, марганец, железо, медь, олово, цирконий. Для повышения стойкости титановых сплавов в активных средах применяют катодное легирование небольшими добавками рубидия, платины, рения, рутения.

В мировой практике получили промышленное применение титановые сплавы различных групп прочности [155]. К группе малопрочных сплавов относят сплавы с пределом прочности до 750–800 МПа; среднепрочные сплавы имеют прочность без термообработки 1100–1200 МПа; высокопрочные титановые сплавы после упрочняющей термической обработки — закалки и последующего старения — могут иметь прочность более 1400 МПа. Состав и механические свойства некоторых титановых сплавов приведены в *табл. 30* [155].

К основным достоинствам титана и его сплавов относят [24, 155]:

- высокую коррозионную стойкость во многих природных, биологических и технологических средах, в которых использование традиционных сталей и сплавов невозможно либо требует дополнительных способов защиты;
- более высокую или равноценную удельную прочность и усталостную долговечность по сравнению с коррозионностойкими сталями и сплавами;
- экологическую чистоту и хорошую биологическую совместимость с живыми тканями, что позволяет успешно использовать титан и его сплавы для изготовления эндопротезов.

В то же время факторами, сдерживающими применение титана и его сплавов, являются:

**Таблица 30. Состав и механические свойства промышленных титановых сплавов**

Сплавы	Марка сплава	Средний химический состав, %	Механические свойства	
			$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
$\alpha$	BT1-00	Нелегированный титан	294–442	25
	BT1-0		393–539	20
	BT1-1		442–563	25
	BT5	4,3–6,2 Al	735–932	10
	BT5-1	4,3–6,0 Al; 2,0–3,0 Sn	785–981	10
	4200	0,15–0,3 Pd	471–539	25
	OT4-0	0,2–1,4 Al; 0,2–1,3 Mn	490–637	20
	OT4-1	1,0–2,5 Al; 0,7–2,0 Mn	588–735	15
	OT4	3,5–5,0 Al; 0,8–2,0 Mn	686–785	10
	BT-20	5,5–7,5 Al; 0,5–2,0 Mo; 0,8–1,8 V; 1,5–2,5 Zr	932–1128	10
Псевдо- $\alpha$ -сплавы	AT-3	2,0–3,5 Al; 0,2–0,5 Cr; 0,2–0,4 Si; 0,2–0,5 Fe	588–735	15
	AT6	5,0–6,5 Al; 0,3–0,9 Cr; 0,2–0,4 Si; 0,3–0,6 Fe	785–932	12
	ПТ-3В	3,5–5,0 Al; 1,5–2,5 V	686–785	12
	ПТ-7М	1,8–2,5 Al; 2,0–3,0 Zr	490–686	15
	BT4	5,0 Al; 1,5 Mn	821–981	12
	TC-5	5,0 Al; 2,0 Zr; 3,0 Sn; 2 V	931–1079	8
	BT6C	5,0 Al; 4,0 V	875–932	10
	BT6	6,0 Al; 4,5 V	932–987	7
$\alpha+\beta$	BT3-1	6,0 Al; 2,5 Mo; 2,0 C; 0,3 Si; 0,5 Fe	981–1180	10
	BT9	6,0–7,3 Al; 2,8–3,8 Mo; 0,2–0,4 Si	981–1180	10
	BT14	3,5–6,3 Al; 2,0–3,8 Mo; 0,9–1,9 V	883–1030	10
	BT16	1,8–3,8 Al; 4,5–5,5 Mo; 4,0–5,5 V	834–932	8
	B22	2,3–3,6 Al; 4,0–5,5 Mo; 4,0–5,5 V; 0,5–2,0 Cr; 0,5–1,5 Fe	1079–1226	8
	BT23	4,5 Al; 2,0 Mo; 4,5 V; 0,6 Fe; 1 Cr	1370	5
	BT15	2,3–3,6 Al; 6,8–8,0 Mo; 9,5–11,5 Cr	1270–1470	3
Псевдо- $\beta$ -сплавы	TC6	3,0 Al; 5,0 Mo; 6,0 V; 11,0 Cr	1370–1470	4
	4201	31–35 Mo	834–883	16

- высокая стоимость металла;
- более сложная, а потому и более дорогая, технология изготовления полуфабрикатов и изделий (в особенности сварка) по сравнению с большинством конструкционных коррозионностойких сталей и сплавов;
- высокая чувствительность к водородному охрупчиванию и газопоглощению;
- сильное адгезионное схватывание трущихся поверхностей при нарушении поверхностной защитной пленки.

Основную специфику сварки титановых сплавов определяют высокая химическая активность титана по отношению к газам, находящимся в атмосфере (кислород, азот, водород), и необходимость максимально исключить их попадание в зону сварки. При насыщении металла шва газами происходит его охрупчивание и снижение механических свойств. Поэтому зону сварки, ограниченную изотермой 250°С, необходимо тщательно защищать от взаимодействия с воздухом. Эту задачу решают с помощью бескислородных флюсов, чистых газов (аргона, гелия и их смесей), а также сварки в вакууме. При сварке давлением дополнительную защиту не применяют.

Поскольку коэффициент теплопроводности у титана в четыре раза меньше, чем у железа, и в 13 раз меньше, чем у алюминия, при сварке титана, во-первых, меньше потерь энергии, чем при сварке стали, а во-вторых, имеет место весьма концентрированный нагрев при значительном градиенте температур. В ряде случаев это может привести к заметному возрастанию внутренних напряжений, что необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов сварки конструкций из титана.

Обязательным условием получения качественных соединений из титановых сплавов является регулирование механических свойств и структуры металла швов и ЗТВ путем выбора рациональной технологии и режимов сварки, обеспечивающих ее выполнение при минимальной погонной энергии. Качество сварных соединений в многом определяет правильность подготовки кромок для сварки.

Наиболее распространенным и универсальным способом сварки плавлением сплавов титана является дуговая сварка в инертных газах (аргон и гелий) неплавящимся электродом (TIG), которая позволяет получить соединения металла в широком диапазоне толщин с высокими показателями механических свойств. Сварку можно

выполнять на воздухе со струйной защитой либо в камерах с контролируемой инертной атмосферой.

Для защиты зоны перегрева остывающих участков соединения при сварке трубчатых конструкций и кольцевых поворотных и неповоротных стыков применяют накидные камеры малых размеров.

При плазменной сварке используют те же способы защиты зоны сварки, что и при сварке ТIG.

Все большее применение в различных отраслях промышленности для соединения титановых сплавов находят электронно-лучевая и лазерная сварка.

Способы сварки титановых сплавов плавящимся электродом в среде инертных газов (MIG) и под бескислородными флюсами являются высокопроизводительными, обеспечивающими необходимые свойства сварных соединений: без пор, трещин и несплавлений. Электрошлаковой сваркой соединяют изделия большой толщины.

Среди способов сварки титана давлением без нагрева металла внешним источником теплоты распространены сварка взрывом, трением, ультразвуковая.

Из способов сварки давлением с нагревом металла наиболее распространена контактная сварка (точечная, шовная, стыковая).

Благодаря своим уникальным свойствам титан находит применение как конструкционный материал для строительства подводных лодок, самолетов, ракет и космических летательных аппаратов, автомобилей, судов малого каботажного плавания, изготовления мачт и корпусов яхт, а также при производстве товаров народного потребления. Используют титановые сплавы для изготовления теплообменной аппаратуры АЭС, подводных крыльев, гребных винтов, напряженных элементов донной части морских платформ, бурильных труб и др.

Среди новых быстрорастущих областей применения титана следует отметить строительство заводов по производству сжиженного газа и регазификационных терминалов (до 250 т титанового проката на одну установку), а также атомную промышленность (в частности, теплообменная аппаратура для АЭС) [25].

Одним из ведущих мировых производителей титановых полуфабрикатов ответственного назначения является ОАО «Корпорация «ВСМПО–Ависма»» (Россия), которая обеспечивает 100% потребности в титановых деталях судостроительных предприятий России, Украины и Узбекистана, 40% — фирмы «Boeing», 60% — фирмы «EADS» (включая «Airbus»). ОАО «Корпорация «ВСМПО–Ависма»» выполняет полный технологический цикл

выпуска титановой продукции: от производства губчатого титана до изготовления труб, прутков, листа и поковок.

В Украине губчатый титан производит КП «Запорожский титаномагнийевый завод». На этом предприятии завершается введение в эксплуатацию электронно-лучевой установки для производства титановых слитков и слябов массой до 5 т, изучается возможность создания прокатного цеха для дальнейшего передела выплавляемых слитков в лист.

**Пластмассы.** Пластмассы — это материалы, полученные на основе синтетических или естественных полимеров [26]. Обычно их применяют как конструкционный материал, альтернативный стали или алюминию. В полимеры с различной целью можно вводить наполнители, стабилизаторы, пигменты, можно составлять композиции с добавкой органических и неорганических волокон, сеток и тканей.

По структуре пластмассы делятся на два вида — кристаллические и аморфные.

В зависимости от поведения полимера при нагревании различают два вида пластмасс: термопласты — материалы, которые можно многократно нагревать и они переходят при этом из твердого в вязкотекучее состояние, и реактопласты, которые могут претерпевать этот процесс лишь однократно. Для сварных конструкций и деталей пригодны только термопласты (*табл. 31*) [26].

Наиболее распространенными конструкционными пластмассами являются группы термопластов на основе полиолефинов: полиэтилена высокого и низкого давления, полипропилена, полиизобутилена.

**Полиэтилен** высокого и низкого давления — кристаллические термопласты, отличающиеся прочностью, жесткостью, температурой текучести.

**Полипропилен** более термостоек, чем полиэтилен, и обладает большей прочностью и жесткостью.

В значительных объемах используют хлорсодержащие пластики на основе полимеров и сополимеров винилхлорида и винилиденхлорида.

**Поливинилхлорид** (ПВХ) — аморфный полимер, который в исходном состоянии является жестким материалом. При добавке к нему пластификатора можно получить очень пластичный и хорошо сваривающийся материал — пластикат. Из жесткого ПВХ — винилпласта — изготавливают листы, трубы, прутки, а из пластиката — пленку, шланги и другие изделия. Из ПВХ изготавливают также вспененные материалы (пенопласты).



**Таблица 31. Наименование и свойства основных термопластичных полимерных материалов, выпускаемых отечественной промышленностью**

Наименование	ГОСТ, ТУ	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Текучесть расплава	Механические свойства				Термофизические свойства			Электрические свойства	
				Предел прочности, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость (по Шарпи без надреза), кДж/м <sup>2</sup>	Твердость, НВ	Температура плавления, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц
				при растяжении	при статическом изгибе							
Полиэтилен высокого давления	ГОСТ 16337-77Е	0,918–0,93	0,2–20 (при 190°С)	10–17	12–17	500–600	Не разрушается	14–25	108–115	0,296	2,2–2,3	0,0002–0,0003
Полиэтилен низкого давления	ГОСТ 16338–85	0,949–0,955	0,2–22	22–30	20–35	300–800		45–58	120–125	0,395	2,4	0,0002–0,0005
Полипропилен	ТУ 6-05-1756-78	0,9–0,91	0,2–2,5	25–40	–	200–800		60–65	160–170	0,295	2,2	0,0002–0,0005
Капрон	ГОСТ 7850–86	1,13	–	65	90	80–150	100–120	140–150	210–218	0,246	3,6–4	0,03
Полиамид-66	ТУ 6-05-211-1404–85	1,14	–	80	100	20–40	90–100	–	225–265	0,24	3,6–4	0,02
Поливинилхлорид (винипласт)	ГОСТ 9639–71	1,34–1,4	–	45–70	70–120	10–50	7–15 (с надрезом)	130–160	180–220	0,13–0,15	3,1–3,4	0,015–0,018

Продолжение таблицы 31

Наименование	ГОСТ, ТУ	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Текучесть расплава	Механические свойства				Теплофизические свойства		Электрические свойства		
				Предел прочности, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость (по Шарпи без надреза), кДж/м <sup>2</sup>	Твердость, НВ	Температура плавления, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц
				при растяжении	при статическом изгибе							
Пластикат ПВХ	ОСТ 6-19-503-79	1,18-1,3	-	10-15	4-20	160-200	-	-	-	0,13-0,14	3,1-3,4	-
Полистирол	ГОСТ 20282-86Е	1,05-1,07	2-8 (при 200°С и нагрузке 50 Н)	40-42	100	2	20-22	140-160	-	-	2,7	0,0003-0,0004
Поликарбонат	ТУ 6-05-1668-80	1,2	-	60-70	90-100	50-100	120-140	100-110	220-240	-	-	-
Полиметилметакрилат	ГОСТ 15809-70Е	1,206	-	60-70	99	2,6-3,3	1,8-16	215	-	-	-	-
Фторопласт-4 (Ф-4)	ГОСТ 10007-80Е	2,12-2,28	-	14-34,5	10,7-13,7	250-500	125	29,4-39,2	327	0,25	1,9-2,1	0,0002-0,00025

Значительную группу полимеров и пластмасс на их основе составляют **полиамиды**. Это в большинстве кристаллические термопласты с четко выраженной температурой плавления. К полиаидам относятся, в частности, широко известные поликапролактам, капрон и полиамид-66.

Наибольшую известность из группы фторлонов получил политетрафторэтиленфторлон-4 (**фторопласт-4**). В отличие от других термопластов при нагреве он не переходит в вязкотекучее состояние даже при температуре деструкции (около 415°C), поэтому его сварка требует особых приемов [26].

В настоящее время химической промышленностью освоен выпуск хорошо сваривающихся фторлонов: Ф-4М, Ф-40, Ф-42 и др. Сварные конструкции из фторсодержащих пластиков обладают исключительно высокой стойкостью к агрессивным средам и могут воспринимать рабочие нагрузки в широком диапазоне температур.

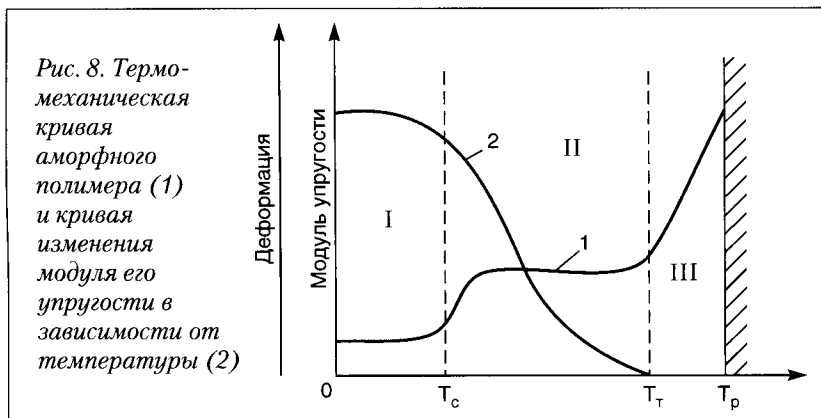
На основе акриловой и метакриловой кислоты производят **акриловые пластики**. Наиболее известная в практике производная на их основе — пластмасса полиметилметакрилат (торговая марка «плексиглас»). Эти пластики, обладающие высокой прозрачностью, используют как светопроводящие изделия (в виде прутков, листов и т. п.).

Нашли применение также сополимеры метилметакрилата и акрилонитрила, обладающие большей прозрачностью и твердостью. Все пластики этой группы хорошо свариваются.

Хорошей прозрачностью отличается группа пластиков на основе **полистирола**. Этот полимер хорошо сваривается тепловыми способами.

Для изготовления сварных конструкций преимущественно в электротехнической промышленности используют сополимеры стирола с метилстиролом, акрилонитролом, полиметилметакрилатом и акрилонитрил-бутадиен-стирольные (АБС) пластики. Последние отличаются от хрупкого полистирола высокой ударной прочностью и теплостойкостью.

В зависимости от температуры полимеры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном (I), высокоэластичном (II) и вязкотекучем (III), определяемых термомеханической кривой полимеров (рис. 8) [26]. Температура перехода из высокоэластичного состояния в вязкотекучее называется температурой текучести  $T_T$ , из высокоэластичного состояния в стеклообразное — температурой стеклования  $T_C$ . Температура разложения  $T_p$  — тем-



пература перехода полимера в вязкотекучее состояние при возникновении необратимой деформации.

Участок III (см. рис. 8) определяет возможный температурный интервал переработки изделия и сварки.

Термопласты поставляют для переработки в гранулах размером 3–5 мм. Основными технологическими процессами изготовления полуфабрикатов и деталей из них являются экструзия, литье, пресование, каландрирование, производимые в температурном интервале вязкотекучего состояния.

Процесс сварки термопластов состоит в активации свариваемых поверхностей деталей, находящихся уже в контакте либо приводимых в контакт после и одновременно с активацией.

Основные способы сварки для соединения полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), поливинилхлорида (ПВХ), полистирола (ПС), сополимера стиролакрилонитрила (САН), сополимеризата акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС), полиметилметакрилата (ПММА), полиацеталя (ПОМ), полиамида (ПА), поликарбоната (ПК), политетрафторэтилена (ПТФЭ) приведены в табл. 32 [27].

Широкое применение получили трубопроводы из полиэтиленовых и поливинилхлоридных труб для транспортировки агрессивных продуктов, в том числе нефти и газа с содержанием сероводорода и углекислоты, а также химических (неароматических) реагентов в химическом производстве. Резервуары и цистерны для перевозки кислот и щелочей, травильные ванны и другие сосуды облицовывают пластмассовыми листами, соединяемыми с помощью сварки. Герметизация пластикатом помещений, загрязняемых изо-

**Таблица 32. Способы сварки пластмасс**

Способ сварки	ПЭ	ПП	ПВХ	ПС	САН	АБС	ПММА	ПОМ	ПА	ПК*	ПДФЭ	ПФЭП
Нагретым газом	+	++	++	+	+		++	+	(+)	++	-	-
Нагретым элементом	++	++	++	+	+	+	(+)	++	+	+	(+)	+
Трением	++	+	++	+	+	+	(+)	+	+	++	(+)	+
Токами высокой частоты	-	-	+	-	-	+	(+)	-	+	+	-	-
Ультразвуком	-	-		+	(+)	+	(+)	+	+	+	(+)	-

++ — применяется преимущественно; + — применение возможно;  
 (+) — применяется редко; — — не применяется.  
 \* При сварке ПК токами высокой частоты требуется очень высокая частота.

топами, покрытие полов линолеумом также осуществляют с помощью сварки. Консервация продуктов в тубы, коробки и банки, упаковка товаров и почтовых посылок резко ускоряется с применением сварки [26].

В химическом машиностроении сваривают корпуса и лопатки различного рода смесителей, корпуса и роторы насосов для перекачки агрессивных сред, фильтры, подшипники из фторопласта, из полистирола сваривают осветительную арматуру, из капрона — неэлектропроводные шестерни, валики, муфты, штоки, из фторлона — несмазывающиеся подшипники, вытеснители топлива и т. п.

### **1.3. Обеспечение точности изготовления сварных конструкций**

Точность является одним из главных показателей, характеризующих качество сварной конструкции [28]. Под точностью сварных конструкций подразумевают соответствие формы, расположения поверхностей и геометрических размеров требованиям чертежей и технических условий.

Стандарт «Конструкции сварные. Разряды точности, предельные отклонения линейных размеров, допуски формы и расположе-

**Таблица 33. Относительные степени точности**

Вид отклонения	Разряд точности					
	1 <i>t</i>	1	2	3	4	5
От линейных размеров	Высокая	Повышенная	Нормальная		Пониженная	Низкая
От прямолинейности	—					—
От плоскости	—					—
От перпендикулярности	—					—
От круглости и профиля продольного сечения	Высокая					Низкая

ния поверхностей» (ДСТУ 2099–92, ГОСТ 30021–93) устанавливает единые требования к точности механически необработанных машиностроительных сварных конструкций общего назначения, изготавливаемых из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Стандарт предусматривает шесть разрядов, устанавливающих предельные отклонения линейных размеров, допуски круглости и профиля продольного сечения, в том числе четыре разряда, определяющих допуски прямолинейности и перпендикулярности. Относительные степени точности изготовления сварных конструкций, устанавливаемые разрядами точности по видам отклонений, приведены в *табл. 33*.

В основу построения системы предельных отклонений и допусков положены принятые в производственной практике соотношения между допусками размеров, формы и расположения поверхностей.

Основные закономерности построения рядов числовых значений предельных отклонений и допусков стандарта следующие:

- предельные отклонения линейных размеров в пределах одного разряда точности изменяются пропорционально  $A$  (произведение крайних значений интервала номинальных размеров) с коэффициентом снижения 1,2;
- предельные отклонения в одном интервале размеров увеличиваются по геометрической прогрессии со знаменателем примерно 1,52, при этом значение отклонений 5-го разряда в восемь раз больше значения разряда 1*t*;
- расчетные значения отклонений в ряде случаев округлены до чисел, удобных для отсчета по шкалам измерительных средств.

Предельные отклонения линейных размеров  $L_p$ , допуски прямолинейности  $P_p$  изменяются в диапазоне номинальных размеров сварных конструкций от 100 до 40 000 мм.

Изменения и значения допусков прямолинейности  $P_r$  и перпендикулярности  $P_{\perp}$  в пределах одной степени точности соответствуют значениям предпочтительных чисел ряда  $R_a 10$ . Допуски плоскостности  $P_{\text{л}}$  рассчитаны пропорционально площадям контролируемых поверхностей. Допуски круглости и профилей продольного сечения  $K_p$  приняты равными 50% от допуска на линейные размеры соответствующих разрядов.

Выбор и назначение точности изготовления сварной конструкции осуществляют на этапе конструкторского проектирования и разработки технологий с учетом требований, предъявляемых к изделию (эксплуатационных, к внешнему виду, возможности ремонта и др.). При назначении норм точности обязательно учитывают экономическую целесообразность, т. е. определяют затраты на изготовление изделия в зависимости от выбранного варианта для достижения поставленной цели. Возможны несколько вариантов:

- первый — изготовить сварную конструкцию высокой точности и минимизировать, а в некоторых случаях полностью исключить последующую механическую обработку перед сборкой изделия (машины, агрегата, установки и т. д.);
- второй — изготовить сварную конструкцию пониженной точности, а требуемой точности изделия (узла) достигнуть за счет механической обработки, которая во многих случаях является достаточно трудоемкой;
- третий — комбинация первого и второго, когда изготавливают конструкцию нормальной точности с небольшим объемом последующей механической обработки.

В современном производстве предпочтение отдают первому и третьему вариантам.

Решение проблемы обеспечения заданной точности изготовления сварной конструкции требует реализации комплексного подхода на этапах ее проектирования и изготовления (рис. 9).

На этапе конструктивно-технологического проектирования выполняют необходимые прочностные расчеты, выбирают основной материал, конструктивную форму и типы соединений. На этом этапе также определяют базовые технологии изготовления сварной конструкции и оценивают технологичность изделия.

Выбор материала конструкции осуществляют с учетом действующих нагрузок и условий работы. При этом увеличивают толщину стенок с учетом финишной механической обработки в зависимости от разряда точности изготовления сварной конструкции. В конст-





рукциях высокой и повышенной точности изготовления допуски на толщину стенок минимальны или вообще отсутствуют. Конструкции пониженной точности изготовления в ряде случаев требуют значительного увеличения толщины стенок. Это влечет за собой снижение коэффициента использования металла и повышение общей трудоемкости изготовления изделия.

Применение в элементах и узлах конструкции сталей различной прочности или износостойкости, а также сталей различных свойств и толщин для разных элементов одной и той же конструкции является важной составляющей повышения точности изготовления и общей эффективности использования металлопроката, в особенности, если речь идет о прогрессивных технологиях формообразования. Именно к таким относится получившая распространение в мировой практике технология производства сварных составных тонколистовых заготовок «Tailored Blanks». Она предусматривает раскрой листовых заготовок различных марок сталей с разными толщинами и качеством поверхности на заданные элементы, которые сваривают в единый лист или заготовку для последующей штамповки. При производстве данных заготовок применяют контактную роликовую сварку с раздавливанием кромок, аргонодуговую сварку неплавящимся электродом, лазерную сварку.

Такие сварные составные заготовки (ССЗ) наиболее широко распространены в производстве легковых автомобилей [29]. Использование сварных составных заготовок из листов позволяет повысить точность геометрии конструктивных и сборочных элементов, оптимизировать допуски, сократить количество отдельных деталей, различных накладок и усиливающих элементов, стабилизировать качество и надежность конструкции за счет обеспечения равнопрочности элементов при статической и динамической нагрузках и др.

По мнению специалистов, подобная технология производства ССЗ может быть распространена и на изготовление сварных заготовок для последующей штамповки корпусных конструкций сельскохозяйственной техники, мебели, бытовой техники и др.

Сварные составные заготовки используют также при изготовлении цилиндрических деталей (валов, валов-шестерен, валиков, осей, пальцев и т. д.). Такие комбинированные заготовки получают обычно сваркой трением из высоко- и менее прочных сталей, а также разнородных материалов. После сварки ССЗ с целью дальнейшего формообразования подвергают холодной или горячей штамповке.

Конструирование стержневых заготовок по элементам из сталей разных марок или других материалов, прочность которых отвечает условиям фактического нагружения, способствует выравниванию эксплуатационных ресурсов деталей по элементам, повышению точности их изготовления и долговечности в целом. При этом на 25–50% снижается удельное усилие штамповки, повышается стойкость изделия и экономятся более дорогие конструкционные материалы.

Комбинирование в сварных конструкциях заготовок различных видов позволяет с максимальным эффектом использовать преимущества проката, поковок, отливок, штамповок, уменьшить количество сборочных единиц, оптимизировать конструктивную форму и повысить геометрическую точность изделий. Уменьшение сечения и протяженности сварных швов способствует как повышению точности изготовления сварной конструкции, так и снижению затрат на производство.

Минимизацию объема наплавленного металла осуществляют также за счет использования экономичных профилей проката, гнутых элементов, точных заготовок, швов уменьшенного сечения, замены ручной дуговой сварки на механизированную и автоматическую, а также применения сварки давлением взамен сварки плавлением.

На этапе конструктивно-технологического проектирования определяют базовые технологии получения элементов и деталей для сварных конструкций (правка, термическая и механическая резка, обработка кромок и др.), определяют схемы сборки-сварки, способы сборки и базирования, формулируют требования к сборочно-сварочным приспособлениям.

Базовыми технологиями, обеспечивающими высокую точность заготовок и деталей для сварных конструкций, являются плазменная и лазерная резка на машинах с программным управлением, вырубка на штамповочных станках, лазер-прессах и др. При выборе базовых технологий изготовления сварных конструкций предпочтение отдают менее энергоемким. Технологические процессы с меньшей удельной энергоемкостью позволяют не только уменьшить затраты, но и обеспечить более высокую точность изготовления сварных конструкций. Кроме того, процессы с меньшей энергоемкостью являются, как правило, более приемлемыми по экологическим характеристикам.

Важным этапом проектирования является разработка комплекса мер по минимизации деформаций и перемещений при сварке за

счет различных приемов и способов, а также принятие технологических решений, связанных с послесварочной обработкой металлоконструкций. О правильности принятых конструкторско-технологических решений на этапе проектирования судят по результатам комплексной оценки технологичности сварной конструкции. Существуют различные методики оценки технологичности сварных конструкций, отличающиеся количеством показателей и критериев. Но обязательными оценочными показателями являются металлоемкость, коэффициент использования металла, объем наплавленного металла, трудоемкость изготовления и себестоимость.

Комплексный характер проблемы обеспечения точности сварных конструкций предопределяет необходимость решения этой задачи на всех этапах изготовления металлоконструкций с учетом минимизации трудовых, материальных и энергетических затрат.

Установлено, что для обеспечения заданного разряда точности сварной конструкции, изготавливаемой с применением дуговой сварки, точность линейных размеров ее деталей должна быть выше примерно на два разряда.

**Точность изготовления деталей.** Основными технологическими операциями, определяющими точность изготовления деталей, являются правка, механическая и термическая резка, механическая обработка кромок, вырубка и другие операции при создании деталей.

**Правка.** При изготовлении сварных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей правке подлежат:

- листовая сталь и детали из этой стали, имеющие кривизну более 1,5 мм/м, местные погнутости кромок, заломленные кромки;
- широкополосная (универсальная) сталь и детали из нее, имеющие кривизну по плоскости более 1,5 мм/м и саблевидность более 1/100 длины или более 5 мм;
- угловая сталь, двутавровые балки, швеллеры, круглая и квадратная сталь при кривизне более 1/100 длины или более 5 мм.

Обычно сталь правят в холодном состоянии на листопрямильных и сортопрямильных машинах и прессах. При значительной кривизне металлопроката правку осуществляют после нагрева до 900–1100 °С.

На листопрямильных машинах можно править саблевидность, хлопуны. При правке саблевидности, перед тем как пропустить полосы через вальцы, на вогнутой стороне укладывают прокладки толщиной 1,5–2 мм, шириной 100–150 мм и длиной 600–700 мм. При правке хлопунов такие прокладки укладывают по обеим кракам на поверхности листов.

Мелкие листовые детали правят на малых листопрямительных машинах. При правке на больших листопрямительных машинах применяют подкладной лист толщиной 20–25 мм. Детали одной толщины раскладывают на листе и пропускают через вальцы.

При изготовлении конструкций нормальной и повышенной точности требования к правке листов и деталей следующие:

- кривизна листовой и универсальной стали толщиной 4–8 мм после правки может быть вдоль проката не более 2 мм/м, при толщине 9–20 мм — 1,5 мм/м, свыше 20 мм — 1 мм/м;
- кривизна двутавровых балок, швеллеров, угловой стали после правки не должна превышать 1/100 длины, но должна быть не более 5 мм, саблевидность универсальной стали после правки балок должна составлять не более 1/100 длины, но должна быть не более 10 мм, для стенок балок — не более 1/100 длины, но не более 5 мм.

При выборе правильного оборудования максимальную толщину листа из условий отсутствия смятия поверхности листа или валков машины контактными напряжениями определяют по формуле

$$\delta_{\max} = 3,4 \sigma_T^k \sqrt{t R_B / \sigma_T E}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\max}$  — максимальная толщина выправляемого листа, мм;  $\sigma_T^k$  — наименьший предел текучести листа или валков машины, МПа;  $\sigma_T$  — расчетный предел текучести для выправляемого листа, МПа;  $t$  — шаг валков;  $R_B$  — радиус валков, мм;  $E$  — модуль упругости стали, МПа.

Минимальная толщина листа  $\delta_{\min}$ , который может быть выправлен на заданной листопрямительной машине, по условию развития необходимых пластических деформаций

$$\delta_{\min} = t^2 / R_B [0,01 + (\sigma_T + E_1(0,01 - \sigma_T/E)) : (E - E_1)], \quad (2)$$

где  $E_1$  — модуль упрочнения, МПа (зависит от свойств стали).

Для холодной правки листового металла толщиной более 5–6 мм обычно применяют 7–11-валковые машины.

Зависимость шага валков от толщины листа приведена в *табл. 34*, а зависимость скорости правки от размера листов — в *табл. 35*. Характеристика некоторых моделей листопрямительных машин, применяемых в нашей стране, приведена в *табл. 36*.

Правку сортового проката выполняют на сортопрямительных машинах с 5–11 роликами, обычно число нижних роликов нечетное, а верхних — четное. Чем меньше сечение выправляемого профиля,

Толщина листа, мм	Шаг валков, мм
0,4–1,5	50
0,6–2,5	65
1–4	85
2–8	125
4–16	200
5–20	220
8–30	300
12–50	400

Размеры листа*, мм	Скорость правки, м/с
$\frac{2-10}{500-1500}$	0,15–0,2
$\frac{10-20}{1500-2500}$	0,1–0,15
$\frac{20-50}{2000-4000}$	0,06–0,1

\* В числителе толщина листа, в знаменателе – ширина.

Параметр	391П72	49П	URRK– 25/3200	UBRK– 40/3200	МЛЧ 1725
Толщина листа, мм	16	32	25	40	25
Ширина листа, мм	2500	2500	3200	3200	1700
Предел прочности стали при растяжении, МПа	700	600	500	500	500
Наименьшая толщина листа, мм	6	–	6	6	6
Количество валков, шт.	9	7	7	7	9
Скорость правки, м/мин	8	8	12	9	9,3
Диаметр рабочих валков, мм	230	320	270	340	–
Мощность электродвигателя, кВт:					
главного привода	2×75	2×110	63	100	22
нажимного устройства	11	30	10	19	–
регулировки крайних валков	2×2,2	2×7,5	2×1,1	2×1	–
Габаритные размеры, мм:					
длина	10357	10670	9500	10800	3200
ширина	3225	4340	2750	3200	2100
высота над полом	3670	4420	2905	3520	1750
Масса, кг	86800	142000	67140	130180	1500

тем меньше диаметр роликов и шаг между ними. Чем больше роликов и чем меньше шаг между ними, тем выше точность правки.

Скорость правки зависит от сечения профиля и прочностных свойств металла. Для среднесортных и крупносортных профилей она ниже, чем для мелкосортных, для высокопрочных легированных и высоколегированных сталей она также невысока, что дает возможность избежать разрушений. Средние скорости правки сортовых и фасонных профилей приведены ниже.

Высокая производительность правильных многовалковых машин и соответствующее качество правки при благоприятной экологической обстановке и низких энергетических затратах (600–1300 кДж/м<sup>2</sup> выправляемой поверхности) значительно сужают область альтернативных технических решений по использованию других высокоэффективных способов правки.

*Форма и размер сечения* *Скорость правки, м/с*

*Квадрат (круг), мм*

До 50 .....	1,4–2
50–90 .....	1,2–1,6
100–125 .....	1–1,4
135–160 .....	0,6–1

*Двутавровый профиль, мм*

До 10 .....	1,4–2
12–18 .....	1,2–1,6
18–36 .....	1–1,4
40–55 .....	0,6–1
60 .....	0,4–0,8

*Рельсы, кг/м*

9–18 .....	1,2–1,6
20–38 .....	1–1,4
44–55 .....	0,6–1
60 .....	0,4–0,8

К числу недостатков рассмотренной технологии правки следует отнести большие капитальные затраты на приобретение и монтаж листо- и сортоправильного оборудования. Поэтому его загрузка должна составлять не менее 30–50%. В ряде случаев при обработке фасонных профилей и тонких листов используют правку в холодном состоянии растяжением. Листы и детали толщиной более 40–50 мм обычно правят под прессом либо термическими способами.



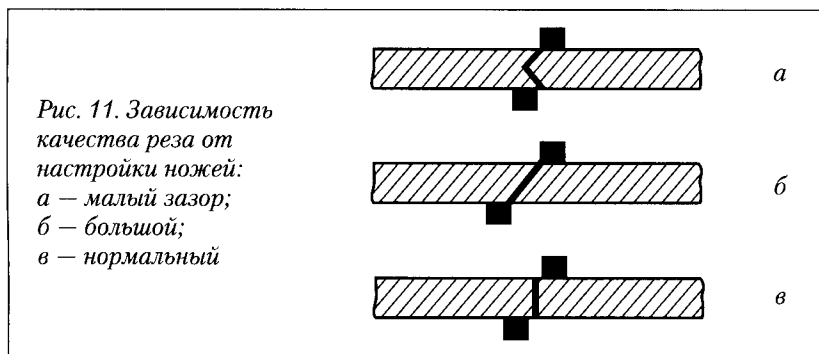
*Рис. 10. Способы резки при изготовлении деталей для сварных конструкций*

Базовыми способами изготовления деталей для сварных конструкций являются способы механической, термической и термомеханической резки (рис. 10).

**Механическая резка.** Механические способы резки используют при роспуске листов, вырезке деталей из листового и сортового проката, пазов, окон и др.

Резку деталей с прямолинейными кромками из листов толщиной до 40 мм, как правило, производят на ножницах с наклонным ножом (гильотинных).

При резке на гильотинных ножницах металл подвергается значительной пластической деформации. Если кромка реза в дальнейшем попадает в зону сварки и полностью переплавляется, то дополнительной ее обработки не требуется. Если же кромка остается сво-



бодной, а конструкция работает при переменных нагрузках, то слой пластически деформированного металла нужно удалить последующей механической обработкой.

Существенным недостатком этого способа резки является возникновение в плоскости реза сколов и затяжек металла. На *рис. 11* показана зависимость качества реза от настройки ножей.

Одним из параметров резки является угол наклона ножа. В зависимости от толщины разрезаемого металла он колеблется от 0,5 до 4–5°. Для металла малых толщин требуется минимальный угол наклона ножа, в противном случае вырезаемая деталь будет иметь большое коробление.

В *табл. 37* приведена техническая характеристика гильотинных ножниц, выпускаемых предприятиями Украины. Приведенные значения толщины листов относятся к стали с пределом прочности до 500 МПа.

Дисковые ножницы позволяют вырезать листовые детали толщиной до 20–25 мм с прямолинейными кромками. Для получения листовой заготовки заданной ширины с параллельными кромками дисковые ножи целесообразно располагать попарно на заданном расстоянии друг от друга.

Для резки листового и сортового проката применяют пресс-ножницы, в которых ножи расположены параллельно. Скалывание происходит одновременно по всей длине реза, совпадающей с длиной ножей. Усилие  $P_p$ , необходимое для резки на пресс-ножницах любого профиля (полосы, листовой или угловой стали), определяют по формуле

$$P_p = \sigma_{cp} F, \quad (3)$$



**Таблица 37. Техническая характеристика гильотинных ножиц**

Модель	Наибольшая толщина разрезаемого листа, мм	Наибольшая ширина разрезаемого листа, мм	Мощность главного привода, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Завод-изготовитель
НКЧ 6020 (6×2000)	6	2000	8,5	2950×1400×1450	3450	ЗАО «Черниговский механический завод»
НКЧ 6020 (6×2500)	6	2500	8,5	3400×1400×1450	3650	
Н-478	16	2200	30	3150×2275×2350	10 000	
НД 3312Б	1,6	1000	1,3	1500×1470×1110	740	ОАО «Стрийский завод кузнечно-прессового оборудования»
НД 3314 Г	2,5	1600	3,2	2300×1570×1470	2000	
НД 3316 Г	4,0	2000	5,6	2760×1630×1520	3200	
НК 3416	4,0	2000	5,6	2610×1600×1510	2870	
НК 3418Р	6,3	2000	8,5	2780×1625×1620	4230	
НК 3418	6,3	2000	8,5	2780×1600×1620	4250	
Н 3418А	6,3	3150	11,3	4000×1900×1700	6200	

где  $F$  — площадь сечения разрезаемого профиля, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{\text{ср}}$  — временное сопротивление металла срезу, МПа.

Для деталей, вырезанных из листа с помощью гильотинных ножиц с наклонным ножом и пресс-ножиц, рекомендуемые допуски на размеры приведены в *табл. 38*. Допускаемые отклонения размеров деталей из фасонного проката при резке на пресс-ножицах приведены в *табл. 39*.

Неперпендикулярность плоскости реза при резке на ножицах с наклонным ножом не должна превышать 0,08 толщины листа, а при резке на пресс-ножицах — 0,1.

Детали, изготовленные с допусками, приведенными в *табл. 38* и *39*, обеспечивают получение сварных конструкций нормальной, а в некоторых случаях и повышенной точности. Детали, к точности

<b>Таблица 38. Допуски на размеры листовых деталей, вырезанных ножницами, мм</b>								
<i>Номинальный размер детали, мм</i>	<i>Толщина металла, мм</i>							
	<i>До 2</i>	<i>2–5</i>	<i>6–8</i>	<i>9–12</i>	<i>13–16</i>	<i>17–20</i>	<i>21–26</i>	<i>28–32</i>
<b>При резке на гильотинных ножницах с наклонным ножом</b>								
До 250	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3
От 250 до 650	1	1,3	1,5	1,8	2	2,5	3	3,5
От 650 до 1000	1,3	1,5	1,8	2	2,5	3	3,2	3,7
От 1000 до 1500	1,5	1,8	2,0	2,2	3	3,2	3,5	4
От 1500 до 2500	2	2,2	2,5	2,2	3,2	3,5	4	4,5
От 2500 до 4000	2,5	2,8	3	3,5	3,7	4	4,5	5
<b>При резке на пресс-ножницах</b>								
До 250	1	1,2	1,5	1,8	2	—	—	—
От 250 до 650	1	1,5	1,8	2	2,2	—	—	—
От 650 до 1000	1,5	1,8	2	2,5	2,8	—	—	—
От 1500 до 2500	2,2	2,5	2,8	3,2	3,2	—	—	—
От 2500 до 4000	2,8	3	3,5	—	—	—	—	—

<b>Таблица 39. Допускаемые отклонения размеров деталей из фасонного проката при резке на пресс-ножницах</b>	
<i>Номинальный размер детали, мм</i>	<i>Предельное отклонение, мм</i>
До 50	1,0
От 50 до 250	1,5
От 250 до 1500	2,0
От 1500 до 3000	2,5
От 3000	3,0

которых предъявляют более высокие требования, чем может обеспечить резка на ножницах, необходимо подвергать механической обработке – строганию и фрезерованию (кромки). Эти способы механической обработки резанием позволяют при размере деталей до 1500 мм получить отклонение до 0,5 мм, а при размере до 9000 мм – не более 2 мм.

Повышение точности изготовления деталей можно получить, используя способ вырубку в штампах. При номинальных размерах деталей 1000–4000 мм вырубка в штампах дает погрешность в пре-

делах  $\pm(1,0-2,5)$  мм. Дальнейшего повышения точности деталей достигают применением чистовой вырубки.

Сущность чистовой вырубki (пробивки) состоит в том, что разделение штампуемого материала осуществляют при его объемном сжатии в зоне разделения. Указанное состояние получают за счет двух факторов: зажима всех элементов разделяемого металла (исходной заготовки, отхода и штампуемой детали) высокими удельными усилиями; внедрения в заготовку (отход) по эквидистантной линии разделения (контуру вырубki или пробивки) на значительное расстояние от нее клиновидного ребра. Первое обеспечивают с помощью специализированных прессов тройного действия (или соответствующим образом модернизированных прессов общего назначения), второе – конструкцией штампа.

Чистовую вырубку применяют для штамповки деталей из конструкционных и легированных сталей, латуни, бронзы, а также алюминия и алюминиевых сплавов с пределом прочности при растяжении не более 300 МПа. Шероховатость поверхности среза  $Ra=0,4...1,6$  мкм, отклонение поверхности среза от перпендикулярности к плоскости штампуемого материала в пределах 0,001–0,004 мм на 1 мм толщины, отклонение от плоскости детали 0,01–0,02 мм на 100 мм длины.

Точную вырубку, для которой характерен абсолютно ровный рез по всей толщине материала, в настоящее время широко и успешно применяют при металлообработке. Совмещение этого способа с прецизионными способами сварки (например, лазерной) позволяет получать готовые детали (узлы) без последующей обработки.

В заготовительном производстве распространена резка пилами (ножовочными, дисковыми, ленточными). В развитых промышленных странах более 90% всего отрезного оборудования приходится на долю ленточнопильных станков, которые обеспечивают высокую производительность и качество резки. Сейчас в Украине в той или иной степени представлены около двадцати производителей ленточнопильных станков и ленточных пил. Признанными лидерами в производстве такого оборудования являются станкостроители Италии, Германии и Испании, такие фирмы, как «Danobat», «Behrtger», «Kasto», «FMB», «Amada».

Для заготовительных цехов, связанных с производством сварных конструкций, могут быть рекомендованы ленточнопильные станки консольного типа. Их изготавливают для работы в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режимах. Станки подоб-

ного класса используют также на небольших производствах для резки сплошного и профильного проката, труб.

Одним из главных показателей экономичности ленточнопильных станков является ширина пропила, которая составляет 1–1,5 мм при неперпендикулярности торца не более 1°. Шероховатость поверхности на торцах не превышает  $Rz = 40...80$ . Уменьшение металлической стружки и расхода на припуски позволяет экономить, например, при разрезании 1000 заготовок диаметром 200 мм до 1,5 т металла (значительно больше, чем при резке дисковыми пилами).

Резка ленточными пилами может быть рекомендована для получения деталей сварных конструкций высокой и повышенной точности. Одним из способов механической резки является резание высоконапорной струей жидкости (гидрорезка и гидроабразивная резка). Сущность этого способа заключается в том, что струя жидкости, нагнетаемая насосом, вытекая из сопла, создает на обрабатываемой поверхности соответствующее давление  $P_c$ , определяемое по формуле  $P_c = P_n + P_{гд}$ , где  $P_n = 0,5\rho v_c^2$  — давление, нагнетаемое насосом и действующее в тылу струи;  $\rho$  — плотность рабочей жидкости;  $v_c$  — скорость рабочей жидкости, вытекающей из сопла;  $P_{гд} = \rho Q_c v_c$  — гидродинамическое давление струи, натекающей на преграду;  $Q_c$  — расход рабочей жидкости через сопло. Для того, чтобы струя жидкости резала металл, величина  $P_c$  должна превышать предел его прочности.

Для разрезания водяной струей металлов необходимо давление  $P_n = 350...550$  МПа при  $v_c = 835...1050$  м/с. При таких параметрах процесс резки протекает с очень малой производительностью. Введение в водяную струю мелкозернистого абразива на основе граната и кремния (гидроабразивная резка) позволяет резать металлы при давлении до 300 МПа, скорости жидкости до 775 м/с с заметным повышением скорости резки. КПД процесса резки высоконапорной струей жидкости не превышает 0,4. По производительности гидроабразивная резка сопоставима с электроэрозионной обработкой и значительно уступает лазерной и плазменной резке металлов одинаковой толщины.

Современное оборудование для гидроабразивной резки позволяет разрезать инструментальные стали толщиной до 100 мм, алюминий, мрамор и стекло — до 120 мм, титан — до 100 мм, пенопласт — до 150 мм.

К достоинствам гидроабразивной резки обычно относят возможность резки прочных конструкционных материалов, малую

ширину реза, высокое качество поверхности, отсутствие термического воздействия на обрабатываемый материал и высокую экологическую чистоту. Стоимость современных установок для гидроабразивной резки 99–125 тыс. евро.

В настоящее время в мировой практике производства сварных конструкций гидроабразивную резку используют весьма ограниченно.

**Термическая резка.** Среди способов термической резки в настоящее время наиболее распространены кислородная, плазменная и газолазерная.

Разделительную кислородную резку осуществляют вручную, на переносных и стационарных машинах. Вырезку листовых деталей с криволинейными кромками производят, как правило, на стационарных машинах, а вырезку деталей с прямыми кромками и с кромками, имеющими небольшую кривизну, выполняют в основном на переносных машинах.

Наиболее широко применяют кислородную резку, для которой в качестве нагревающего пламени используют смеси газов (ацетилен, природные газы, пропан-бутан и др.) с кислородом. Однако в ряде случаев используют также кислородную резку, нагревающее пламя для которой образуется за счет сгорания бензина, керосина или газойля. Для жидкого горючего необходимо применение горелок специальной конструкции с дополнительным пламенем.

Кислородную резку обычно используют для разделения малоуглеродистой и низколегированной сталей с содержанием углерода не более 0,25% толщиной от 4 до 1000 мм и титановых сплавов толщиной от 4 до 100 мм.

При толщине разрезаемого металла до 300 мм применяют обычные универсальные резаки; при резке стали толщиной более 300 мм — специальные резаки, имеющие мундштуки с увеличенным (по сравнению с универсальными) проходным сечением для режущего кислорода.

Наиболее целесообразно и экономически оправдано применение при машинной кислородной резке кислорода чистотой не менее 99,2%. При чистоте кислорода 99,7–99,9% осуществляют безгратовую кислородную резку. Предельное значение скорости кислородной резки ограничено скоростью окисления металла в кислороде, которая для железа не превышает 15–17 мм/с. Поэтому задачу повышения производительности кислородной резки решают, используя многорезаковые машины, рационально организуя рабочие места, внедряя механизацию подачи листа, разборки заготовок и др.

Плазменная резка обладает большей универсальностью, чем кислородная.

Современное оборудование для плазменно-дуговой резки позволяет эффективно резать конструкционные стали всех марок, коррозийно-стойкие стали, алюминий, медь, латунь толщиной от 1 до 200 мм. При обработке этих материалов плазменная резка в упомянутом диапазоне толщин превосходит по скорости кислородно-флюсовую резку.

В последние годы широко применяют плазменную резку с водяной защитой. В этих условиях вода существенно улучшает санитарно-гигиенические характеристики процесса, обеспечивает повышение качества кромок вырезаемых деталей, способствует снижению тепловых деформаций деталей.

Благодаря увеличению степени обжатия дуги («плотная» плазма) и применению кислорода в качестве плазмообразующего газа по производительности и качеству реза плазменная резка сопоставима с лазерной.

Лазерная резка является одним из наиболее динамично развивающихся технологических процессов. Для повышения эффективности резки в зону обработки совместно с лазерным лучом подают струю газа, которая способствует удалению продуктов из зоны разрушения, а в некоторых случаях и инициирует химическую реакцию в месте воздействия излучения на металлы (газолазерная резка). В первом случае используют инертные или нейтральные газы (аргон, азот, углекислый газ), во втором — кислород и воздух.

Кислород при лазерной резке выполняет следующие функции: способствует росту оксидной пленки на поверхности металла и вследствие этого снижению его отражательной способности; теплота, выделяющаяся в результате экзотермической реакции горения, совместно с лазерным излучением способствует дальнейшему разрушению металла в зоне обработки; струя уносит продукты разрушения и обеспечивает приток кислорода непосредственно к фронту горения, а также препятствует чрезмерному нагреванию разрезаемых деталей.

В настоящее время для газолазерной резки используют твердотельные лазеры мощностью до 1,2 кВт, позволяющие резать металл толщиной до 10 мм, и  $\text{CO}_2$ -лазеры мощностью до 5 кВт, позволяющие разрезать металл толщиной до 20 мм.

К достоинствам лазерной резки относят чрезвычайно малую ширину реза, исчисляемую долями миллиметра при резке металла

толщиной до 10 мм, узкую зону термического влияния (0,1–0,2 мм), возможность последующей сварки без зачистки кромок.

Решение о целесообразности применения того или иного способа резки принимают с учетом ряда факторов: размера деталей, толщины листа, требований к качеству реза, количества деталей, коэффициента загрузки оборудования, наличия у потребителя соответствующего оборудования и анализа приведенных затрат.

Основными факторами, определяющими точность вырезки деталей и качество реза при термической резке, являются:

- состояние исходного (разрезаемого) металла (чистота поверхности, химический состав, наличие расслоений, качество правки, размеры исходного листа);
- качество изготовления копир-чертежей и подготовки числовых программ;
- конструктивные особенности и состояние машины для термической резки (прямолинейность направляющих путей, погрешность изготовления зубчатых колес, опорных катков, люфты в передачах, статические и динамические ошибки в системе управления);
- конструкция раскройного стола для термической резки, форма и размеры детали (толщина, габаритные размеры, отношение длины к ширине, наличие или отсутствие вырезов, разделки кромок);
- технология вырезки деталей, определяющая тепловые деформации (способ и режим резки, последовательность резки, род горючего и плазмообразующего газа) и качество поверхности реза, которое характеризуется перпендикулярностью кромки, шероховатостью, размерами и свойствами зоны термического влияния.

С целью повышения точности необходимо назначать такие способы и режим резки деталей, которые обеспечивали бы минимальное тепловложение в вырезаемую деталь. Точность и качество механизированной кислородной и плазменно-дуговой резки регламентированы ГОСТ 14792.

Современные машины с программным управлением позволяют вырезать плазменной и кислородной резкой детали, соответствующие первому и второму классу точности по ГОСТ 14792. Хотя этот ГОСТ не распространяется на газолазерную резку, суммарная оценка процесса газолазерной резки непрерывным излучением по установленным в нем требованиям показывает, что точность и ка-

чество выполняемых резов при обработке на оптимальных режимах соответствует первому классу.

Для изготовления деталей сварных конструкций высокой и повышенной точности качество и точность резов, выполненных кислородной, плазменной и лазерной резкой, должны соответствовать первому классу. Это требование могут обеспечить порталные машины с программным управлением. Основными производителями такого оборудования в Украине являются АО «Техмаш», АО «Зонт» (Одесса), ОАО «Завод «Кристалл» (Николаев).

**Термомеханическая резка.** Одной из современных тенденций развития технических систем является применение комбинированных технологий. К таким комбинированным технологиям относится и термомеханическая резка (см. рис. 10). Она сочетает преимущества обоих процессов. В плазма-прессах для раскроя заготовок сочетают плазменную резку и вырубку. В настоящее время плазма-прессы используют редко.

Более гибкими и высокопроизводительными являются лазер-прессы, в которых для выполнения протяженных резов используют газолазерную резку, а небольшие резы осуществляют вырубкой.

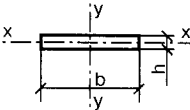
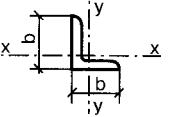
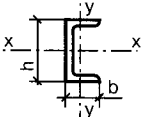
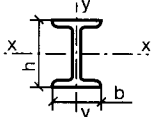
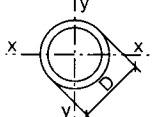
Современные конструкции лазер-прессов дополняют устройствами для пластического формообразования. Например, листообработывающий центр Trumatik 600 Laserpress осуществляет лазерную резку деталей толщиной до 8 мм и габаритными размерами 2585×1280(1650) мм, вырубку стандартных контуров за один ход, накатку резьбы, изготовление, отбортовку отверстий, выдавливание ребер жесткости жалюзи. Магазин инструментов имеет от 18 до 114 гнезд. Центр оснащен лазерами мощностью 1800, 2400 или 3000 Вт.

Одним из наиболее распространенных способов изготовления деталей для сварных конструкций является холодная гибка листового, профильного проката и труб. Благодаря использованию гнутых профилей и элементов можно резко сократить количество швов и уменьшить объемы наплавленного металла. Это в свою очередь позволяет при высоком качестве гибки существенно повысить точность и снизить трудоемкость изготовления сварных конструкций, а также обеспечить экономию металлопроката.

**Гибка.** Гибку стали в холодном состоянии применяют, только если ее радиусы и кривизна не превышают значений, приведенных в табл. 40 (минимальный радиус кривизны  $\rho$  листовых деталей, воспринимающих статическую нагрузку, может быть принят за  $12,5h$ , где  $h$  — толщина листа).



**Таблица 40. Минимально допустимые радиусы кривизны  $\rho$  и стрелки прогиба  $f$  при гибке изделий из стали в холодном состоянии**

Вид проката	Эскиз	Гибка относительно оси	Минимальное значение	
			$\rho$	$f$
Сталь листовая и универсальная		x-x	25h	$l^2/200h$
Уголок		x-x	45b	$l^2/200b$
		y-y		
Швеллеры		x-x	25h	$l^2/200h$
		y-y	45b	$l^2/360b$
Двутавровые балки		x-x	25 h	$l^2/200h$
		y-y	25 b	$l^2/200b$
Труба		—	30 D	—

**Гибка обечаек.** При гибке обечаек для изготовления цилиндрических емкостей, труб, конусов и других деталей используют трех-четырёхвалковые гибочные машины (валцы).

В трехвалковых машинах верхний валок может перемещаться вверх и вниз, а два нижних валка только вращаются в неподвижных подшипниках. Лист для гибки закладывают между верхними и нижними валками, изгибают прижатием верхнего валка и прокатывают между валками (рис. 12).

Вальцовку заданной заготовки можно выполнить, если при этом изгибающий момент, действующий в верхнем валке  $M_B$ , не превышает допустимого  $[M]_B$ :  $M_B \leq [M]_B$ . Допускаемый изгибающий момент валка  $[M]_B = 100 W_B \sigma_T^B$ , где  $[M]_B$  — допускаемый изгибающий момент валка, Н·см;  $W_B$  — момент сопротивления валка, см<sup>3</sup>;

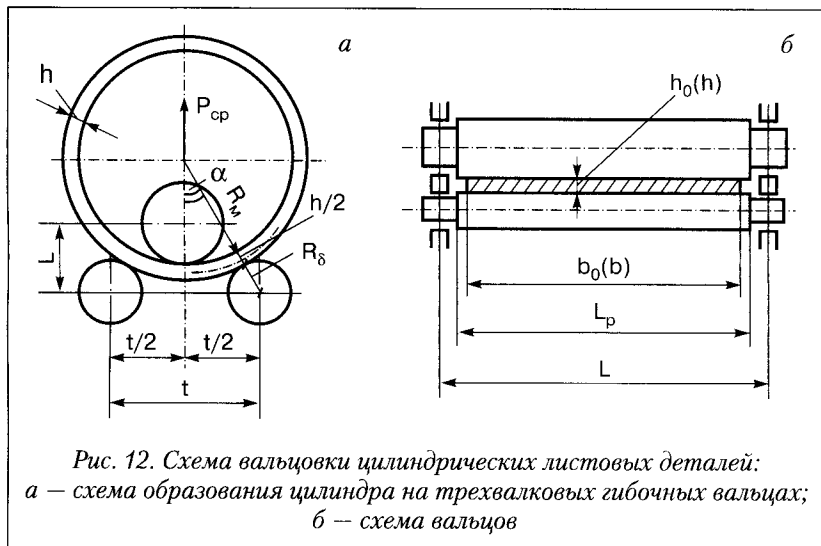


Рис. 12. Схема вальцовки цилиндрических листовых деталей:  
 а — схема образования цилиндра на трехвалковых гибочных вальцах;  
 б — схема вальцов

$\sigma_T^B$  — предел текучести материала вала, МПа. Изгибающий момент, действующий в верхнем валке

$$M_B = P_{cp} (2L - b_0) / 8, \quad (4)$$

где  $M_B$  — изгибающий момент вала, Н·см;  $P_{cp}$  — полное усилие обрабатываемой заготовки на верхний валок, Н;  $L$  — пролет верхнего вала, см;  $b_0$  — ширина вальцуемого листа, см;

$$P_{cp} = 2M_3 / R_m \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где  $M_3$  — изгибающий момент в обрабатываемой заготовке;  $R_m$  — радиус заготовки в машине; угол  $\alpha = \arcsin [t/2(R_m + h/2 + R_\delta)]$ .

Прогиб верхнего вала определяют по формуле

$$f = (P_{cp} L^3 : 4800 EI) [1 - 0,5(B/L)^2 + 0,125(B/L)^3], \quad (6)$$

где  $L$  — пролет верхнего вала, см;  $B$  — ширина вальцуемого листа, см;  $E$  — модуль упругости материала вала, МПа;  $I$  — момент инерции сечения вала, см<sup>4</sup>.

Прогиб  $f$  не должен превышать  $1/500L$ .

Трехвалковые гибочные машины с симметричным расположением нижних валков относительно верхнего наиболее широко распространены в промышленности. Существенным их недостатком является необходимость предварительно подогнуть конец листа

для получения обечаек правильной цилиндрической формы. Эту операцию осуществляют на подкладном листе, превышающем в 2–2,5 раза толщину обрабатываемой заготовки.

Для гибки концов листа применяют также специальные трехвалковые вальцы с перемещением верхнего вала не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлениях.

При использовании четырехвалковых гибочных машин кромки подгибают не предварительно, а в ходе гибки (вальцовки) благодаря давлению одного из боковых (не приводных) валков.

**Гибка на прессах.** Гнутые профили из листовых заготовок изготавливают на листогибочных (кромкогибочных) прессах (рис. 13). Длина стола серийно выпускаемых прессов 2550–5050 мм, однако за счет оборудования прессов приставками длина изгибаемых листов может быть и больше. Усилие гибки

$$P_r = 1,2 \sigma_B h^2 b / C, \quad (7)$$

где  $\sigma_B$  — временное сопротивление материала заготовки, МПа;  $h$  — толщина заготовки, мм;  $b$  — ширина заготовки, мм;  $C$  — ширина паза нижнего штампа, мм. Для того, чтобы заготовка в течение всей гибки опиралась на кромки

нижнего штампа, необходимо соблюдать условие  $C < 2t \sin \alpha$ .

С уменьшением пролета усилие гибки возрастает. К недостаткам гибки в штампах следует отнести необходимость использования прессов с большим усилием, повышенный износ инструмента, большую вероятность повреждения поверхности листов, существенные затруднения при получении высокоточных заготовок.

Способ свободной гибки, при котором кромки листов отгибают на листогибочных машинах с поворотной балкой, имеет ряд преимуществ перед гибкой в штампах. При этом способе зажимают отгибаемую

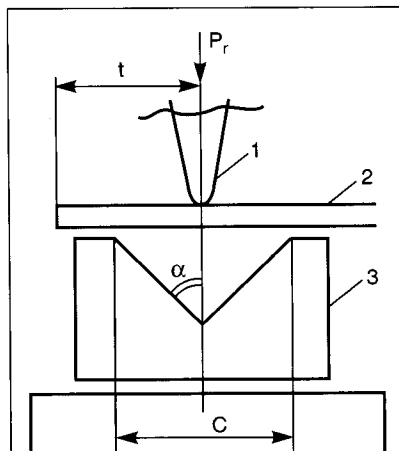


Рис. 13. Схема гибки листовой стали на кромкогибочных прессах: 1 — верхний штамп; 2 — заготовка; 3 — нижний штамп

часть и поворачивают остальную часть листа до получения нужного размера отгибаемой части. Свободная гибка дает возможность получить любой угол в диапазоне от 0 до 180°. Радиус гибки зависит не от радиусов нижнего и верхнего инструментов (как это имеет место при штамповке), а от величины раскрытия матрицы, толщины материала и прикладываемых усилий. Усилия гибки в 5–6 раз меньше, чем при гибке в штампах.

В промышленности применяют как ручные кромкогибы (длина гига до 1000 мм), так и листогибочные машины с длиной гига до 5000 мм. Полноценная реализация способа свободной гибки стала возможной благодаря оснащению прессов системой ЧПУ. Она позволяет в ходе процесса точно дозировать усилия, пропорциональные погружению верхнего инструмента в материал, и благодаря этому добиваться высокой точности угла гибки.

В мире многие компании выпускают прессы с ЧПУ для гибки листового материала. В Украине наиболее распространены гибочные машины с ЧПУ серии TrumaBend немецкой фирмы «Trumpf». Эта фирма выпускает машины с усилием гибки от 500 до 3200 кН, длиной гига от 1000 до 4080 мм. Толщина обрабатываемого листа до 10 мм.

Высокую производительность машин обеспечивает скорость перемещения задних упоров (до 500 мм/с) и верхней балки (до 200 мм/с). При этом точность позиционирования инструмента составляет 0,01 мм. Машины позволяют без переналадки производить гибку сложных изделий, выполнять заковку и плющение.

Для гибкой коррекции процесса применяют сенсор угла. Кроме измерения угла, сенсор автоматически выдает сигнал для регулировки усилия гибки, чтобы довести фактический угол до требуемого по чертежу. Система автоматически учитывает углы обратной пружинистости в зависимости от материала заготовки и толщины листа.

Листогибочное оборудование с ЧПУ особенно эффективно при изготовлении высокоточных сварных тонколистовых конструкций. Такое оборудование позволяет осуществить в малые сроки переход на выпуск новых изделий при минимальных затратах.

Точность сварной конструкции во многом зависит от точности сборки металлоконструкций для сварки. Эта операция существенно влияет также на общую трудоемкость сборочно-сварочных работ.

Точность собранной конструкции определяют как предыдущие операции технологического процесса (правка, резка деталей и заготовок, обработка кромок, гибка и др.), так и ряд факторов, проявляющихся непосредственно при выполнении сборочной операции. К

таким факторам относят схему сборки-сварки, способ сборки, способы базирования и выбор базовых поверхностей, точность сборочных приспособлений, согласование допусков.

**Схемы сборки.** При последовательной сборке и сварке элементов требуемой точности изготовления сварной конструкции достигают, применяя промежуточные операции правки. Схему полной сборки конструкции с последующей сваркой обычно используют для сравнительно простых изделий или изделий средней сложности, состоящих из небольшого числа деталей с легкодоступными для выполнения соединениями. При этой схеме точность обеспечивают за счет создания жесткого контура собранной конструкции.

При параллельно-последовательной схеме сборки общие деформации всей конструкции заметно уменьшаются, так как жесткость узлов всегда больше жесткости отдельных деталей. В этом случае легче выполнить правку деформированных узлов, чем полностью сваренной конструкции. Кроме того, при такой схеме сборки и сварки проще реализовать активный технологический контроль точности на различных стадиях изготовления с соответствующими коррекциями согласно параметрам технологического процесса в зависимости от состояния конструкции.

**Базирование.** Важное значение для обеспечения точности сборки имеет соблюдение основных принципов базирования сварной конструкции. Для базирования любой детали достаточно иметь шесть опорных точек, лишаящих деталь всех шести степеней свободы.

Из всего многообразия заготовок и деталей, собираемых в сварные изделия, наибольшее распространение имеют призматические заготовки, у которых в качестве установочных баз используют три взаимно перпендикулярные плоскости. Для повышения точности ориентации таких деталей в качестве установочной базы принимают поверхность с наибольшими размерами, позволяющими разместить три условные опорные точки. При этом в качестве направляющей базы принимают самую длинную деталь, а опорной базой может быть даже небольшая ровная поверхность с одной опорной точкой [30]. Для ориентации цилиндрических деталей следует использовать двойную направляющую базу, преимущественно призмы.

При оценке точности и выборе баз необходимо учитывать ряд специфических особенностей сварных конструкций:

- на сборочно-сварочных стендах и в приспособлениях выполняют сборку, прихватку, частичную или полную сварку деталей,

т. е. неразъемные (неподвижные) соединения. Поэтому возникает необходимость в полной ориентации каждой детали в оснастке, что предопределяет сложность и большую насыщенность сборочно-сварочных приспособлений базовыми и фиксирующими элементами;

- детали из листового и профильного проката могут иметь значительные погрешности формы (волнистость, коробление, серповидность, скручивание и др.);
- ограниченная жесткость плоских или объемных деталей относительно малой толщины и значительных габаритов позволяет частично устранить погрешность формы деталей, прижимая их к базовым секциям оснастки. В отличие от жестких механически обрабатываемых деталей базирование элементов деталей при сборке перед сваркой для обеспечения требуемой геометрии и точности узла, как правило, необходимо осуществлять базовыми секциями и ложементами. Базирование нежестких деталей на точечных опорах для сборочно-сварочной оснастки не рекомендуется;
- точность взаимного расположения деталей, размеров и геометрии сварного узла определяется в основном точностью расположения упоров оснастки и плотностью прилегания к ним поверхностей деталей;
- зазоры в сварных соединениях должны соответствовать требованиям стандартов и технических условий и всегда рассматриваться как самостоятельные звенья размерной цепи, что необходимо учитывать при разработке схем базирования;
- сварочные деформации вызывают искажение размеров и формы сварной конструкции в результате нагрева деталей при сварке, продольной и поперечной усадки, а также угловых перемещений затвердевающего расплавленного металла сварных швов. Перемещение деталей при сварке при выборе неправильной схемы базирования приводит к защемлению в оснастке прихваченного или сваренного узла. В связи с этим при выборе баз особое внимание следует обращать на возможность применения постоянных или подводимых опор и фиксаторов.

Следует также подчеркнуть, что возможность оставить детали лишнюю степень свободы упрощает установку деталей и базирование, конструкцию оборудования и приспособлений, поэтому при выборе баз для сварной конструкции нужно стремиться использовать наименьшее количество баз простейшей формы, при которой

может быть обеспечена требуемая точность взаимного расположения деталей и узлов.

Правильное базирование деталей при сборке сварных конструкций определяет наивысшую точность взаимного расположения элементов и узла в целом, однако всегда необходимо помнить, что для сборки под сварку, как и для других способов обработки, наиболее технологичными являются максимальные допуски, позволяющие производить сборку без подгонки из деталей невысокой точности при помощи компенсаторов и простейших приспособлений.

Необоснованное ужесточение допусков требует создания в деталях точных установочных баз и применения сложного дорогостоящего специального оснащения заготовительных и сборочно-сварочных операций. Поэтому при конструировании сварных узлов и разработке технологии их изготовления нужно иметь в виду следующее:

- точность сварной конструкции на два класса ниже точности составляющих деталей за счет погрешностей базирования, точности оснастки, зазоров в местах сварки и сварочных деформаций;
- точность сварных узлов, изготовленных из деталей с механически необработанными кромками (штамповки из листовой стали толщиной более 5 мм, детали из листового, сортового и профильного проката, изготовленные на комбинированных и прессножницах и т. д.), находится в пределах 16–17 квалитетов. Если узел собирают из деталей с механически обработанными кромками, его точность в зависимости от конструкции может быть назначена в пределах 14–15 квалитетов.

На *рис. 14* приведены примеры схем базирования для сборки узлов под сварку [30]. Варианты, приведенные на *рис. 14, а, б*, показывают, какое большое значение имеет правильный выбор конструктором баз размерных цепей и установочных размеров. Показанные на *рис. 14, а* размеры  $20 \pm 2$  и  $230 \pm 2$ , заданные от торца основания кронштейна, обеспечивают сборку узла в простейшем приспособлении с прижимом только базовой детали. Изменение базы размеров (*рис. 14, б*) и более жесткие допуски на установку ребер требуют подвода заблокированных опор и прижима ребер.

На *рис. 14, в* приведены схемы базирования рамных конструкций.

Условные графические обозначения опор и зажимов, наиболее часто встречающихся в практике технолога-сварщика, и примеры выполнения схем базирования деталей при сборке под сварку приведены в *табл. 41, 42* [30].

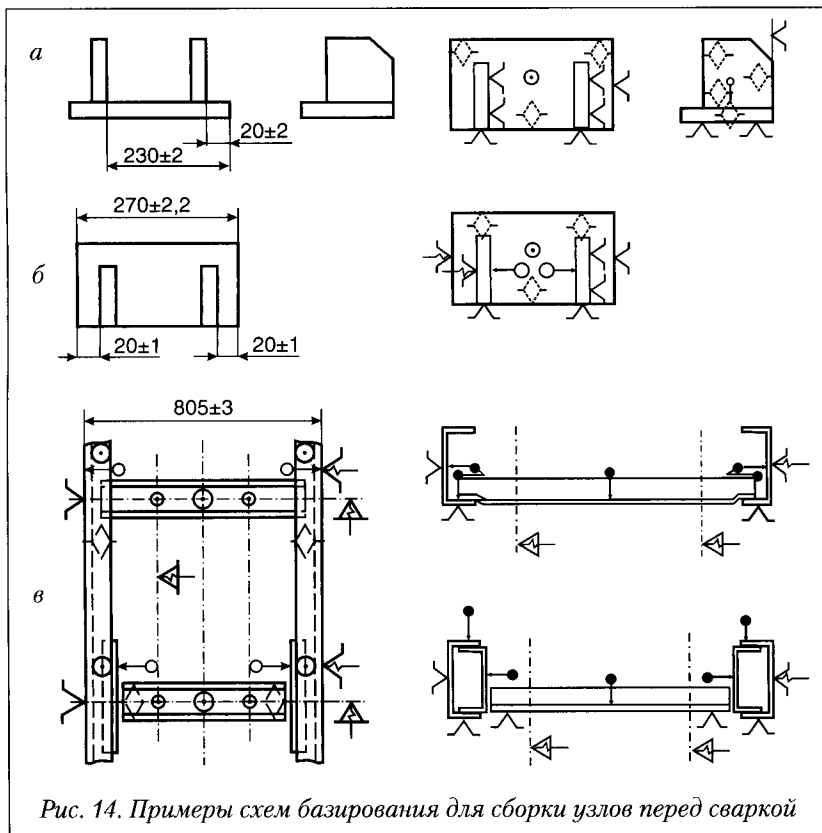


Рис. 14. Примеры схем базирования для сборки узлов перед сваркой

**Способ сборки.** Существуют следующие способы сборки под сварку:

- по предварительной разметке;
- по упорам-фиксаторам или по шаблонам;
- по контрольным отверстиям.

При сборке по разметке положение каждого элемента определяют по линиям, нанесенным на сопрягаемые элементы.

Сборку по упорам-фиксаторам производят в сборочно-сварочных приспособлениях или на стендовых плитах.

При сборке по контрольным отверстиям сопрягаемые элементы соединяют, совмещая эти отверстия (они являются технологическими сборочными базами). Последние два способа сборки обеспечивают более высокую точность взаимного положения деталей при



**Таблица 41. Условные обозначения опор и зажимов**

Наименование	Обозначение	
	вид спереди	вид сверху
Центры упорные гладкие, опоры, ложементы неподвижные		
Опоры неподвижные съемные		
Опоры плавающие		
Опоры подводимые одиночные, центры плавающие		
Опоры призматического типа неподвижные		
Опоры призматического типа подвижные		
Штыри, пальцы, фиксаторы неподвижные одиночные		
Штыри, пальцы, фиксаторы подводимые одиночные		
Патроны кулачковые, цанговые, оправки разжимные		
Оправка цилиндрическая		
Оправка коническая		
Зажим одиночный (механический)		
Зажим заблокированный двойной (механический)		
Зажим пневматический		
Зажим гидравлический		
Зажим магнитный и электромагнитный		

**Таблица 42. Примеры выполнения схем базирования для сборки деталей**

<i>Способ установки</i>	<i>Теоретическая схема базирования</i>
Установка детали по плоскости основания и двум боковым сторонам	
Установка детали в приспособление по плоскости и двум отверстиям (на неподвижных фиксаторах)	
Установка цилиндрической детали на призме	
Установка цилиндрического диска в двойной опорной базе (с зазором по контуру)	
Установка цилиндрического диска в самоцентрирующемся патроне, разжимной оправке с опорой на плоскость	
Установка втулки на цилиндрической оправке (с зазором), на неподвижном фиксаторе с упором в торец	
То же на подвижном фиксаторе (с зазором)	
Установка втулки на разжимной оправке с упором в торец	

сборке и более высокую производительность. Заданные размеры взаимного положения деталей при сборке этими способами получаются автоматически. Наибольшее распространение получил способ сборки в приспособлениях. Тип приспособления определяют серийностью производства, сложностью конструкции свариваемого узла, способом сварки и применяемым оборудованием.

**Сборочные приспособления.** При единичном и мелкосерийном производствах преимущественно применяют универсальные приспособления. В серийном производстве наряду с универсальными приспособлениями используют перенастраиваемые сборочные установки или станды с быстродействующими прижимами.

В массовом производстве применяют специализированные установки и приспособления с высокой степенью механизации и автоматизации, в том числе и с программным управлением. Требования, предъявляемые к приспособлениям:

- достаточная жесткость корпуса, так как взаимное положение свариваемых деталей в процессе сборки под сварку должно оставаться неизменным. Допуски на линейные размеры в сборочно-сварочных приспособлениях составляют 0,5–0,75 допуска на соответствующие размеры в собираемых изделиях;
- свободный доступ сварочного инструмента к местам сварки;
- быстрая установка деталей свариваемого изделия и их зажим, свободное снятие узла после прихватки;
- обеспечение безопасности при выполнении сборочных и сварочных работ.

В странах СНГ получили распространение универсально-сборочные приспособления для сборочно-сварочных работ (УСПсв), включающие следующие группы элементов: базовые, корпусные, установочно-направляющие, прижимные крепежные и разные. Такое деление не предопределяет однозначного применения какого-либо элемента в приспособлениях, так как элементы универсальны, в разных компоновках могут выполнять различное назначение.

Характеристика приспособления приведена в *табл. 43*. В этих приспособлениях в качестве базовых деталей используют плиты с сеткой Т-образных пазов шириной 8, 12 и 16 мм и шагом 60 мм. На боковых сторонах плит имеются продольные Т-образные пазы, с помощью которых можно нарастить плиту. Для образования корпуса приспособления используют полосы, уголки, косынки, угольники и др. В качестве прижимных деталей применяют шарнирные прихваты, рычажно-эксцентрикковые и винтовые прижимы.

**Таблица 43. Характеристика универсального приспособления для сборочно-сварочных работ**

Параметр	Ширина паза, мм (размер резьбы основного крепежного болта)		
	8 (M8)	12 (M12×1,5)	16 (M16)
Габаритные размеры свариваемых изделий, мм:			
прямоугольные координаты	От 50×50×50 до 300×300×800	От 120×120×120 до 2000×2000×500	От 500×500×1000 до 5000×2000×1500
диаметр	50...400*	180...1500	900...2800
высота (диаметр)	10...400	40...1200	150...1500
Толщина металла свариваемых изделий, мм:			
малых размеров	До 6	До 20**	До 40***
больших размеров	До 4	До 12	До 20
Точность сборки для сварки, мм	0,1–0,3	0,1–0,5	0,3–1,0
Масса свариваемых изделий (узлов), кг	До 10	До 500	До 2500
* Собирают на базовых кольцах с пазами 12 мм (ГОСТ 17841–72, ГОСТ 17843–72). ** При сборке изделий из разнотолщинных металлов, но катет шва не более 8 мм. *** То же, но катет шва не более 16 мм.			

Надежность и долговечность деталей и узлов приспособления обеспечивают правильным выбором материалов, режимов термообработки и защитных покрытий. К сожалению, эти приспособления в настоящее время в Украине не изготавливают.

Аналогичную описанной выше оснастку для сборки предлагает немецкая фирма «Forster GmbH». Фирма поставляет передвижные и стационарные сварочные столы различных размеров от 1000×1200 до 3000×1500 мм с поперечными пазами. В комплект входят также разнообразные упорные, фиксирующие и другие элементы.

Немецкая фирма «Demmeler Maschinenbau GmbH» производит различные сборочно-сварочные приспособления, основой которых являются стационарные и передвижные сварочные столы различных размеров. Эти столы имеют базирующие отверстия диаметром 25 мм, выполненные с шагом 50 мм.

На современных предприятиях при проведении сборочных работ широко используют магнитную сборочную оснастку на базе

постоянных магнитов. Магниты выполняют роль грузозахватных устройств, упорных и фиксирующих элементов.

Фирма «Reeil» (Германия) предлагает широкую гамму грузозахватных устройств грузоподъемностью от 250 до 2000 кг на базе постоянных магнитов.

Несмотря на довольно обширную номенклатуру универсальных сборочных приспособлений, которые предлагает рынок, сборочные операции на многих предприятиях Украины остаются мало механизированными, а саму сборку выполняют с натягами и большим объемом подгоночно-доводочных работ.

**Согласование допусков.** Даже самые точные и современные сборочные приспособления окажутся бесполезными, если устанавливаемые при проектировании допуски на отдельные размеры не будут согласованы с точностью изготовления заготовок.

Согласования допусков элементов собираемой конструкции достигают, используя различные способы взаимозаменяемости (полной, неполной, групповой, сборка с подгонкой деталей). Чем ниже степень взаимозаменяемости, тем больше объем подгонки деталей и меньше точность сборки металлоконструкций.

Проектировщикам и производителям сварных конструкций необходимо больше внимания уделять точности изготовления сварных заготовок, так как выполненные с максимальной точностью заготовки существенно снижают трудоемкость сборочных операций и в целом повышают точность изготовленных сварных конструкций.

**Сборочные прихватки и выходные (выводные) планки.** При изготовлении и ремонте сварных конструкций в качестве временных технологических связей часто применяют сборочные прихватки и выходные планки. Обычно сечение прихваток не превышает 1/3 сечения шва. Их максимальное сечение не более 25–30 мм<sup>2</sup>, длина 20–120 мм, расстояние между ними 300–800 мм. Прихватки выполняют качественными электродами, в защитных газах или под флюсом. Наличие пор в прихватках, остатков шлака на их поверхности, большая высота прихваток могут приводить к образованию дефектов в рабочих швах и их избыточной высоте. В отдельных случаях для устранения подобных дефектов сборочные прихватки выполняют неплавящимся электродом в смеси Ag + CO<sub>2</sub> [32] и лазерной сваркой.

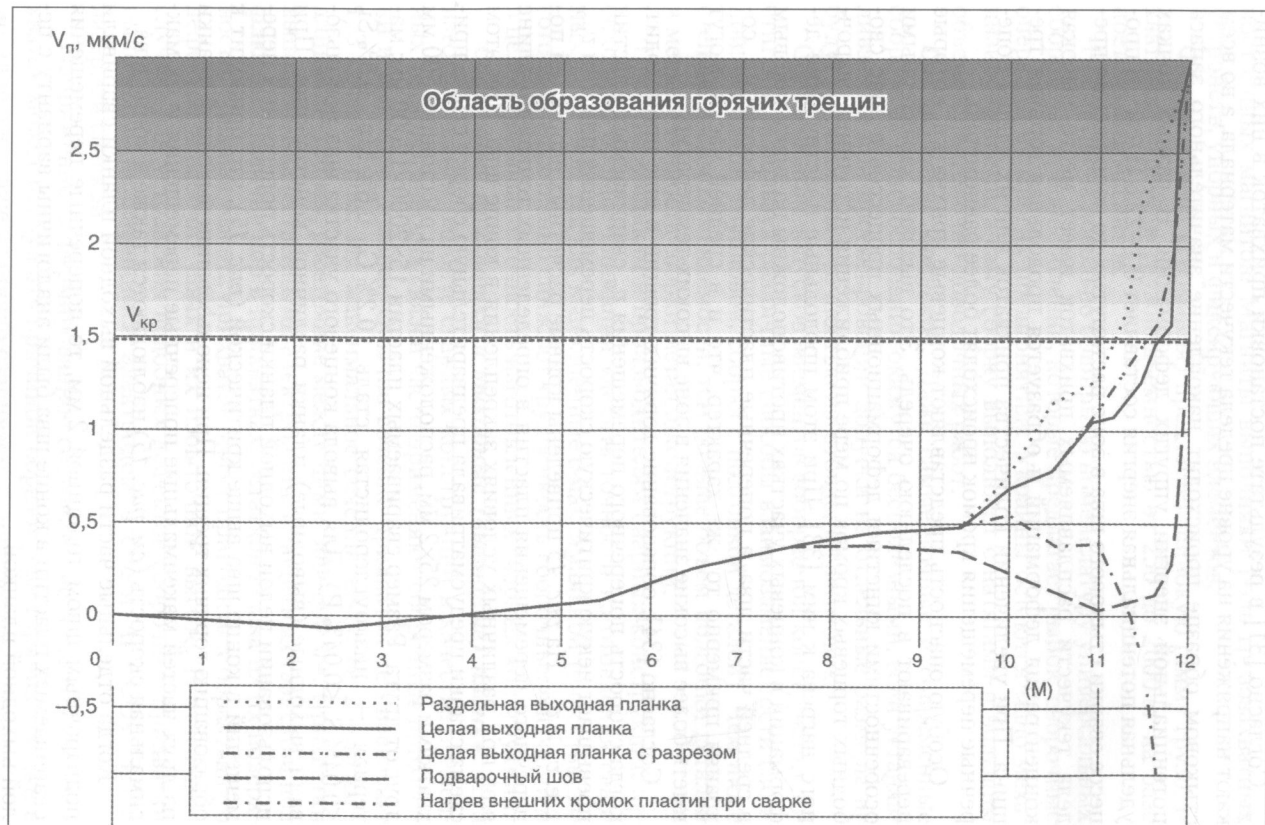
Напряженно-деформированное состояние металла вблизи прихваток может послужить причиной образования горячих трещин в металле шва даже у хорошо свариваемых материалов.

Согласно [31] в результате постановки прихваток в них возникают напряжения на уровне предела текучести материала, а во всем стыковом образце происходит накопление значительного запаса потенциальной энергии упругих деформаций. В разных точках удельная потенциальная энергия составляет 0,1–22,6 Н/см<sup>2</sup>. В процессе сварки стыкового шва в зоне растянутых до напряжения предела текучести расплавляемых прихваток имеет место высокая концентрация деформаций и образуется продольная горячая трещина. При увеличении количества прихваток или их длины поперечные перемещения кромок происходят более равномерно.

Особую опасность представляют концевые прихватки, которые переваривают в последнюю очередь. Это вызвано характерными особенностями кинетики деформационных процессов в зоне свободных торцевых кромок по мере приближения источника сварочного нагрева к ним [33]. При этом продольные пластические деформации в концевых участках противоположны по знаку таковым в средней части шва, а поперечные пластические деформации, сохраняя примерно тот же характер, что и в средней части, могут иметь более высокие значения в зоне высоких температур.

Согласно [34], образование горячих трещин в шве происходит, когда скорость поперечного перемещения  $v_{\text{п}}$  свариваемых пластин превышает некую критическую скорость перемещения пластин  $v_{\text{кр}}$ , т. е.  $v_{\text{п}} > v_{\text{кр}}$ . На *рис. 15* приведены кривые расчетных скоростей поперечного перемещения пластин в определенных точках по длине шва при различных условиях закрепления в конце шва. При этом схема сварки предусматривала предварительную сборку стыка прихватками размером 25×2 мм, расположенными на расстоянии 500 мм друг от друга. Размер свариваемых пластин 15×2000×12000 мм; материал — низкоуглеродистая сталь (0,2% С, 0,6% Мп, 0,5% Si, ≤0,04% S, ≤0,04% Р). Для вывода концевого участка шва использовали выходные (выводные) планки различной конструкции. При использовании целой выходной планки скорость поперечных перемещений в конце шва выше критической (*рис. 15*), что приводит к образованию горячих трещин. При использовании выходной планки из двух частей максимальные поперечные перемещения и их максимальная скорость (см. *рис. 15*) наблюдаются также в конце шва.

Когда отдельные части раздельной выходной планки сваривали подварочным швом толщиной 2 мм, то поперечные перемещения свариваемых пластин в конце шва были аналогичны варианту с целой выходной планкой.



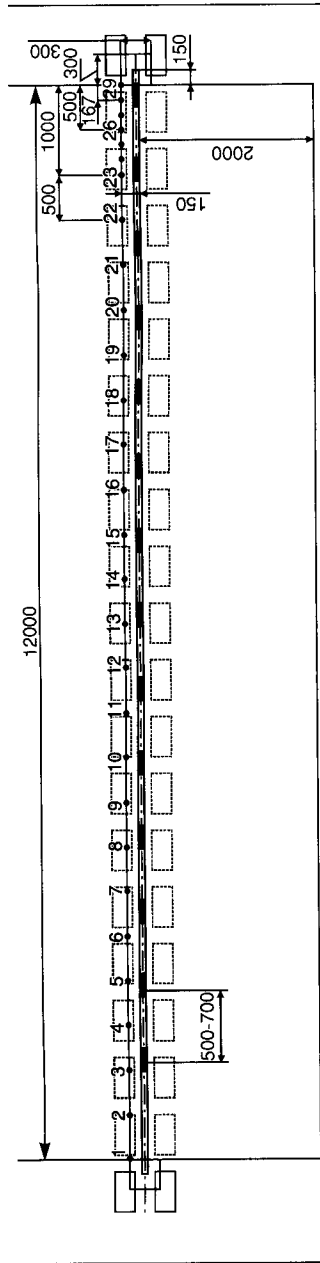


Рис. 15. Кривая скорости поперечного перемещения пластин в точках 1–29 по длине шва при различных условиях закрепления в конце шва

При использовании целой выходной планки с разрезом длиной 150 мм (для лучшего соответствия разделке кромок свариваемых пластин) при переходе сварочной дуги не происходит значительного изменения жесткости, что наблюдается при применении выходной планки без разреза. Но и в этом случае горячие трещины образуются в конце сварного шва. Максимальная скорость поперечного перемещения  $v_{\text{п}}$  также достигается в самом конце шва (см. рис. 15).

Скорость поперечного перемещения пластин в конце шва при сварке можно значительно уменьшить, если предварительно соединить концы пластин подварочным швом. На рис. 15 приведены изменения  $v_{\text{п}}$  при длине такого шва 1000 мм и толщине 2–3 мм. Легко заметить, что  $v_{\text{п}}$  в конце шва заметно снизилась.

Для устранения образования упомянутых выше дефектов на практике часто используют прием сварки стыковых швов от концов к середине. Но для обеспечения требуемой производительности необходимы два сварочных аппарата, а в местах перекрытия отдельных отрезков шва могут образоваться различные дефекты.



Существуют способы использования специального нагрева, уменьшающие перемещения пластин и их скорость в конце швов большой протяженности [34]. В Швеции применяют нагрев ограниченных областей на обоих концах свариваемых пластин в процессе сварки, что снижает количество горячих трещин в конце шва с 7% до 1%. В Японии при сборке концы листов нагревают до определенной, заранее рассчитанной температуры, затем соединяют прихватками и производят сварку.

В [34] предложено производить предварительный подогрев внешних кромок свариваемых пластин до температуры 50–200°C, когда сварочная дуга находится на расстоянии 4000 мм от конца пластины. Тепловые источники перемещают со скоростью сварки. При этом варианте поперечные перемещения и их скорость в конце шва не только уменьшаются, но и могут поменять знак на противоположный (см. рис. 15).

Снижения опасности образования горячих трещин при окончании дуговой сварки достигают также путем дополнительного охлаждения концевых участков [33].

Таким образом, временные технологические связи в виде прихваток и выходных планок могут существенно влиять на качество сварных швов и конструкций.

**Деформации, напряжения и перемещения.** Деформации, вызванные сваркой, являются одной из главных причин, которые приводят к отклонению действительных размеров металлоконструкций от проектных. Благодаря многолетней работе ученых и практиков разработан ряд конструктивных и технологических мероприятий по уменьшению величины остаточных напряжений, деформаций и перемещений в сварных конструкциях.

Обычно выделяют способы предупреждения и способы устранения (уменьшения) сварочных деформаций, напряжений и перемещений. К способам предупреждения относят регулирование теплового состояния металла сварного соединения, активное нагружение свариваемых элементов при сварке и компенсацию деформаций.

**Регулирование теплового состояния металла сварного соединения** сводится к уменьшению объема металла сварного соединения, подвергающегося пластической деформации, возникающей на стадии нагрева металла. Для этого используют следующие пути:

1. Применение тех видов сварки, которые требуют меньшего тепловложения, например, механизированной дуговой вместо ручной дуговой, контактной вместо дуговой, сварки трением вза-

мен дуговой и контактной, лазерной, электронно-лучевой и плазменной вместо дуговой и др. Сегодня в мировой практике сварочного производства продолжают расти объемы применения лазерной сварки не только за счет ввода сложных автоматизированных комплексов, но и ручных установок. Последнее стало возможным благодаря разработке компактных диодных лазеров, КПД преобразования энергии в которых достигает 50%. Интенсивно развивается и способ линейной сварки трением (FSW), позволяющий выполнять стыковые и нахлесточные швы листовых заготовок из алюминия и его сплавов, меди и даже стали с чрезвычайно низким тепловложением.

2. Назначение минимальных сечений сварных швов и уменьшение объемов наплавленного металла. Площадь поперечного сечения и величина погонной энергии сокращаются пропорционально квадрату катета шва. Примерно пропорционально квадрату катета шва уменьшаются усадочная сила и поперечная усадка. При этом снижаются общие деформации сварной конструкции как в продольном, так и в поперечном направлениях. В общем объеме выпуска сварных конструкций только 30–40% швов являются расчетными, а 60–70% — конструктивными (соединительными).

Применительно к расчетным швам следует назначать минимальные получающиеся при расчете на прочность сечения угловых швов. В случае применения конструктивных (соединительных) швов одним из наиболее важных технологических критериев, по которым оценивают швы минимальных сечений, является технологическая прочность материала, т. е. способность материала сопротивляться образованию горячих и холодных трещин. Сварные соединения низкоуглеродистых сталей обычной прочности, являющихся основным конструкционным материалом для многих сварных конструкций общего назначения, не склонны к образованию холодных трещин. Поэтому значения минимальных катетов для этой группы сталей необходимо устанавливать по критерию стойкости к образованию горячих трещин.

В качестве мер снижения общей массы наплавленного металла следует выделить использование гнутых и гнуто-сварных профилей, гнутых элементов и профилей проката, повышение точности заготовок и обеспечение точной сборки под сварку и др.

3. Регулирование тепловых процессов за счет дополнительного охлаждения зоны сварки водой, водо-воздушной смесью, специальными теплоотводящими подкладками и теплоотводящими пастами.

4. Применение предварительного и сопутствующего подогревов с целью уменьшения разности температур между отдельными точками свариваемого изделия. Это приводит к уменьшению пластических деформаций и напряжений.

**Активное нагружение свариваемых элементов** осуществляют как в процессе сварки, так и после ее завершения. Наиболее известными способами активного нагружения являются растяжение деталей в процессе сварки, вибронагружение в процессе сварки, ударное деформирование (проковка) шва.

Сварка с предварительным растяжением заключается в том, что в свариваемых элементах создаются напряжения растяжения, которые после выполнения сварного шва снимаются. Нагружение обычно осуществляют в пределах зоны пластических деформаций сварного соединения. Предварительное растяжение приводит к снижению напряжений в этой зоне, а также и в остальной части поперечного сечения сварного соединения, что в конечном итоге уменьшает продольное укорачивание свариваемых деталей.

Устройства для нагружения сварных элементов достаточно громоздки и энергоемки. Вибронагружение в процессе сварки реализуется с помощью менее энергоемкого и громоздкого оборудования. При этом деформации снижаются на 20–25%. Однако сам процесс сварки вибрируемого изделия вызывает определенные затруднения.

Проковку можно проводить по горячему металлу сразу после сварки шва полностью или отдельного слоя. При этом осадка металла в направлении толщины вызывает расширение металла в перпендикулярном направлении, что снижает напряжение растяжения в зоне проковки или вызывает напряжение сжатия. В зависимости от температуры проковки и количества тепловой энергии, выделяющейся в зоне ударов, последующее охлаждение и сокращение подвергнутого проковке металла ведет к изменению собственных напряжений, которые могут оказаться после полного выравнивания температуры как сжимающими, так и растягивающими. Различают режимы с малыми скоростями деформирования до 6–7 м/с, средними — до 100 м/с и высокими — свыше 100 м/с. При использовании проковки с целью изменения напряжений особое внимание следует обращать на возможность ухудшения пластических свойств металла. Для ряда сплавов наилучшими являются скорости в диапазоне 20–30 м/с.

**Компенсация деформаций при сварке** является одним из наиболее эффективных средств предупреждения деформаций изгиба. Это направление включает ряд основных мероприятий:

- Элементы балочного типа необходимо конструировать с таким расположением швов, чтобы сумма моментов усадочных сил от продольных швов относительно центра сечения балки была близка к нулю. Поперечные швы, создающие угловые изломы балок, также желательно располагать по обе стороны от линии центра тяжести сечений, чтобы сумма угловых поворотов и прогибов была минимальной.
- При выполнении длинных швов (более 1000 мм) следует отдавать предпочтение сварке «на проход» механизированными способами, а при ручной сварке использовать обратно-ступенчатый способ.
- При сварке многопроходных швов каждый последующий слой нужно выполнять в направлении, обратном предыдущему, чтобы деформации от предыдущего шва ликвидировались обратной деформацией следующего шва.
- При сварке листовых конструкций в первую очередь необходимо сваривать поперечные швы, соединяющие листы в длинные полосы, а затем производить сварку полос между собой. При сварке двутавровых балок первоначально выполнять стыковые соединения стенок и только после этого сваривать поясные швы.
- Деформации должны быть равны по величине и обратны по направлению сварочным, их нужно создавать путем пластического деформирования, закрепления снимать после остывания шва.
- При сварке деталей с симметричным расположением многослойных швов сварку следует вести по способу «уравновешивания» деформаций.
- Необходимо предусматривать рациональную последовательность выполнения сборочно-сварочных операций.

Все это позволяет значительно снизить сварочные деформации, однако часть сварных конструкций получает деформации (общие или местные), превосходящие допустимые величины. В этих случаях применяют правку.

Правку можно производить холодным (механическим воздействием), тепловым безударным и комбинированным способами (кратковременные нагревы с механическим воздействием).

Холодный способ правки включает правку изгибом под прессом или грузом, прокатку роликами, в вальцах и др. Тепловой безударный способ предусматривает правку нагревом полос, пятен и треугольников без расплавления поверхности (пламенем газовых горелок, плазменной струей, токами высокой частоты и правку нагревом полос электрической дугой с расплавлением поверхности (пла-

вящимся и неплавящимся электродами). Комбинированный способ представляет нагрев одним из указанных выше способов с применением механического воздействия посредством скоб, стяжек, домкратов или просто ударов кувалды (молотка).

**Холодный способ правки.** Общие деформации конструкций балочного типа рекомендуют править изгибом под прессом (рис. 16). При этом необходимо создать напряжения растяжения, близкие к пределу текучести.

Аналогичные явления удлинения волокон зоны сварных соединений происходят при правке полотнищ или труб с продольным швом в правильных вальцах. Размеры полотнищ или труб ограничены мощностью и размерами правильных вальцов.

Удлинение волокон сварных соединений в плоскости листа достигают прокаткой или проколачиванием этой зоны. Способ дает хорошие результаты на конструкциях, изготовленных из металла толщиной 5–8 мм.

**Тепловой способ правки.** Суммарная величина остаточных пластических деформаций при правке зависит от температуры концентрированного нагрева и мощности источника, расположения мест нагрева, остаточных напряжений и жесткости конструкций, характера внешнего закрепления и др.

Повышение температуры нагрева способствует увеличению пластических деформаций укорочения. В то же время при нагреве свыше некоторой температуры начинают возникать при остывании

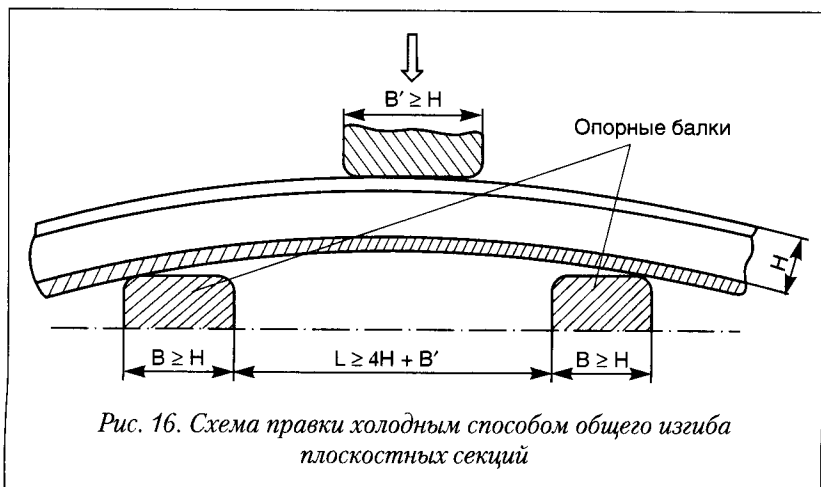


Рис. 16. Схема правки холодным способом общего изгиба плоскостных секций

обратные пластические деформации растяжения, и остаточные пластические деформации от правки достигают своего предела. Учитывая эти обстоятельства, оптимальную температуру при правке определяют из условия получения максимальных остаточных деформаций укорочения при минимальных обратных пластических деформациях удлинения.

Температура нагрева при правке углеродистых стальных конструкций газовым пламенем равна 600–800°С (вишневый цвет каления), для некоторых низколегированных сталей — 800–900°С (красный цвет каления). Примеры деформированных элементов и сварных узлов и режимы их правки местным нагревом приведены в *табл. 44*.

При нагреве газовым пламенем трудно выдержать в узком диапазоне и гибко регулировать параметры нагрева. Газопламенный нагрев имеет также низкие экологические показатели. Перспективным считают использование в автоматизированных комплексах для термической правки сварных конструкций плазменных источников нагрева.

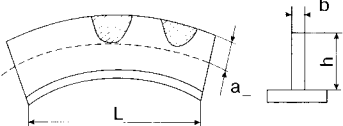
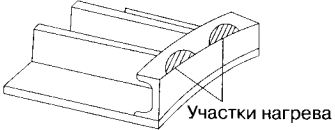
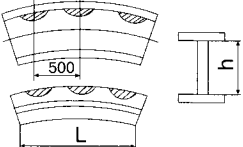
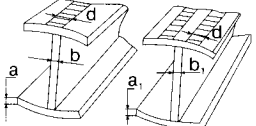

В мировой практике получил распространение индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). Фирмой «ELVA» (Норвегия) разработаны технология и оборудование для правки с нагревом ТВЧ (система «ТЕРАК»). Комплекс оборудования включает преобразователь с выходной мощностью 17,5 кВт при частоте 18–22 кГц. Мощность регулируют бесступенчато. Преобразователь соединен с устройством индукционного нагрева при помощи гибкого кабеля длиной 15 м.

Устройство индукционного нагрева охлаждают сжатым воздухом. Оборудование фирмы «ELVA» эксплуатируют во многих странах. Киевский судостроительный завод «Ленинская кузница» имеет многолетний опыт эксплуатации такого оборудования.

Фирма «ЧКД Локомотивка» (Чехия) использует индукционный нагрев для термической правки балочных конструкций. При этом применяют преобразователи мощностью 150 кВт с рабочей частотой 3 кГц. Обработке подвергают двутавровые балки с полками толщиной 15–25 мм. Нагрев осуществляют полосами шириной 30–300 мм. Оборудование скомпоновано на стационарной установке порталного типа.

Таким образом, существует ряд приемов, способов и технических решений, позволяющих минимизировать деформации и выпускать сварные конструкции практически любой степени точности.

**Таблица 44. Примеры деформированных элементов и сварных узлов и режимы их правки местным нагревом**

Эскиз элементов и частей конструкции	Размер элементов конструкции, мм	Характер нагрева	Температура нагрева, °С	Номер наконечника горелки
	$L$ до 12, $h$ до 0,5, $b$ до 12	Кромки, участки $a=(0,6...0,8) h$	650–700	5–6
	Швеллер до № 20, лист $\delta$ до 8 мм	Полосы поперек полки	700	5–6
	$L$ до 12, $h$ до 0,5, площадь сечения до 200 см <sup>2</sup>	Треугольные участки на стенке и полке	700	6–7
	$a$ до 30, $b$ до 16, $a_1=30...50$ , $b_1=16...30$	Одна полоса $d=20...30$ мм, две полосы $d_1=30...40$ мм	700–800	6–7
	$b = 4...8$ , $h$ до 6	Полоса нагрева $d_1=20...30$ мм по контуру вспучивания. Пятна нагрева $d_2=50...70$ мм в шахматном порядке	700–800	6–7

## 1.4. Механизация и автоматизация сварочного производства

Под механизацией производственного процесса понимают замену в нем ручного труда работой машин [35, 36]. При механизированном исполнении операций производственного процесса человек выполняет ручные вспомогательные приемы и управляет машиной. Высшей ступенью механизации является автоматизация, при которой участие человека в выполнении вспомогательных приемов и управлении машиной исключается. Механизация (автоматизация) может быть частичной (локальной), распространяющейся на отдельные операции производственного процесса, и комплексной, охватывающей ряд последовательных операций по изготовлению детали, комплекта или изделия, включая межоперационный транспорт.

Уровень механизации характеризуется количественным  $Y_1$  и качественным  $Y_2$  показателями:

$$Y_1 = \frac{\sum T_{mi} \cdot P_i}{\sum T_{mi} \cdot P_i + T_p} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$Y_2 = \frac{\sum T_{mi} \cdot P_i - \sum T_{mi}}{\sum T_{mi} \cdot P_i + T_p} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $T_{mi}$  — трудоемкость операции, выполняемой механизированным способом;  $P_i$  — коэффициент производительности оборудования;  $T_p$  — суммарная трудоемкость операций, выполняемых ручным способом.

Коэффициент  $P_i$  характеризует рост производительности при замене ручной операции (или механизированной, принятой за базу) механизированной (автоматизированной) и определяется как отношение трудоемкости  $T_{pi}$  до проведения механизации к трудоемкости  $T_{mi}$ , достигнутой в результате механизации:

$$P_i = T_{pi} / T_{mi} \quad (10)$$

Показатель  $Y_1$  определяет удельный объем механизированных операций в производственном процессе. Этот показатель характеризует уровень механизации только количественно, так как он не изменяется при замене менее производительного механизированного оборудования более производительным.



Показатель  $У_2$  отражает степень вытеснения «живого» труда в результате механизации. Он предназначен для характеристики сокращения трудовых затрат в результате механизации (автоматизации) и уровня производительности применяемой техники.

Следует подчеркнуть, что применение механизации и автоматизации не сводится только к повышению производительности труда. Важнейшей задачей этого технологического направления является улучшение качества выпускаемой продукции (снижение количества дефектов, повышение точности, улучшение служебных характеристик и т. п.).

Немаловажное значение имеют механизация и автоматизация и в части улучшения условий труда работающих за счет удаления человека из зоны с максимальными вредными выделениями различного рода (инфракрасным и ультрафиолетовым излучением, из зоны электромагнитного поля, повышенного уровня шума, вибрации и др.).

Все упомянутые выше факторы (производительность, качество, условия труда) должны учитываться при выборе средств локальной и комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

**Механизация дуговой сварки плавящимся электродом.** Дугую сварку относят к одной из наиболее широко применяемых сварочных технологий. Ее непрерывно совершенствуют, и прежде всего с позиций механизации и автоматизации [37].

ДСТУ 3761.2–98 «Сварка и родственные технологии. Ч. 2. Процессы сварки и пайки. Термины и определения», который соответствует ISO 857:1990, устанавливает следующие определения процессов сварки по уровню механизации и автоматизации.

К **ручной сварке** относят процесс сварки, при котором рабочий инструмент и (или) сварочные материалы перемещают вручную.

**Механизированная сварка** — процесс, выполняемый с применением машин и механизмов, управляемых человеком.

**Автоматическая сварка** — все элементы процесса выполняют машины и механизмы по заданной программе без участия человека.

Таким образом, большинство технологических процессов дуговой сварки, выполняемых сварочными полуавтоматами и автоматами, относятся к механизированной сварке с элементами механизации и автоматизации.

Механизация и автоматизация процесса дуговой сварки, как и любого другого технологического процесса, направлена на решение триединой задачи: повышение производительности труда, улучшение

ние качества сварных швов и сварных соединений, а также улучшение условий труда и техники безопасности.

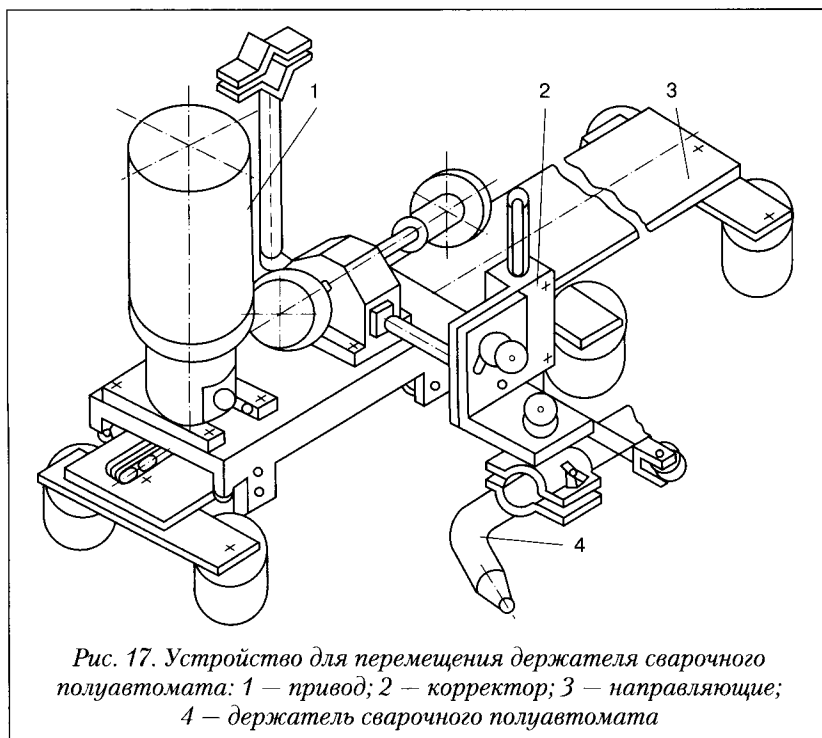
Повышение производительности труда связано с необходимостью сокращения затрат на выполнение сварочной операции. При этом следует подчеркнуть, что поскольку сварочные операции составляют 15–20% общей трудоемкости изготовления сварных конструкций, сокращение затрат на собственно сварочные операции даже на 50% дает сокращение общей трудоемкости изготовления сварного изделия не более чем на 10%. Поэтому важнейшей составляющей задачи механизации и автоматизации процесса дуговой сварки является улучшение качества сварных швов и сварных соединений в целом. Мировая практика развития сварочного производства полностью это подтверждает.

Дуговую сварку сопровождают опасные и вредные производственные факторы, к которым следует отнести:

- образование и попадание в воздух рабочей зоны сварочных аэрозолей, содержащих токсические вещества;
- оптическое излучение в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах, значение которого многократно превышает физиологически переносимое глазом человека;
- интенсивное инфракрасное (тепловое) излучение от свариваемых изделий и сварочной ванны;
- брызги, искры и выбросы расплавленного металла и шлака;
- опасный уровень напряжения в электрической цепи;
- нервно-психические нагрузки на сварщика, особенно при выполнении швов в стесненных условиях и в различных пространственных положениях.

Благодаря механизации и автоматизации процесса сварки сварщик или оператор находятся на значительном расстоянии от зоны проявления опасных производственных факторов, вследствие чего в значительно меньшей степени подвержены их вредному воздействию. Кроме того, могут быть использованы автономные фильтровентиляционные агрегаты, радикально улучшающие санитарно-гигиенические характеристики рабочей зоны.

Задачу механизации и автоматизации дуговой сварки решают с использованием различных технических средств. При сварке полуавтоматом обычно механизирована только операция подачи электродной проволоки. Манипуляции электродом осуществляют вручную. Производительность и качество сварки при этом определяют квалификация сварщика, надежность и совершенство сварочного



полуавтомата и источника питания. К элементам механизации и автоматизации процесса полуавтоматической дуговой сварки относят дистанционное управление режимом сварки, программное управление технологическими параметрами режима и др.

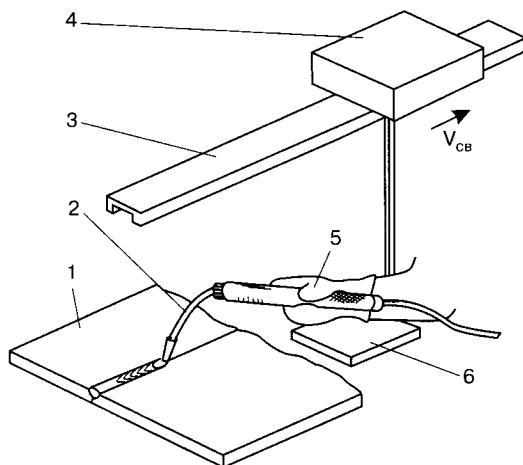
В мировой практике получили распространение устройства для перемещения держателя сварочного полуавтомата со сварочной скоростью (фирмы «Bugo Systems» (США), «Gullco» (Канада), «ESAB» (Швеция), ИЭС им. Е. О. Патона (Украина) и др.). Подобные универсальные устройства (рис. 17) состоят из направляющего рельса (для сварки криволинейных поверхностей – гибкого), легкой приводной тележки, корректоров и различных приспособлений для закрепления держателя полуавтомата. Их применяют не только для сварки, но и для резки и контроля качества прямолинейных и криволинейных швов во всех пространственных положениях. Использование таких недорогих приспособлений к полуавтоматам дает возможность повысить уровень механизации сварки и

качество сварных соединений, улучшить условия труда сварщика. В то же время здесь ограничены возможности для пространственного маневрирования сварочного инструмента, процесс сварки чувствителен к качеству сборки свариваемых элементов, мало пригоден для выполнения коротких швов.

В ОАО «УкрИСП» разработан способ механизированной дуговой сварки на основе использования сварочного полуавтомата (патент Украины № 50870, В23К9/00, 37/02 от 15.11.02 г.) (рис. 18). Сварщик, удерживающий кистью руки 5 держатель горелки 2, осуществляет возбуждение дуги и начальное проплавление изделия 1. После этого рука на опорной площадке 6 с помощью приводного устройства 4 на направляющей 3 начинает перемещаться со скоростью сварки  $V_{св}$  вдоль оси соединения элементов свариваемого изделия. Кистью руки поддерживают необходимую длину дуги, манипулируют концом электрода для придания нужной формы, направляют электрод относительно стыка и т. п. При необходимости (наличие большого зазора в стыке, превышения кромок и др.) сварщик может перейти на кратковременное ручное перемещение дуги вдоль стыка с нужной скоростью, а затем продолжить сварку с механизированным перемещением руки.

При сварке коротких швов (до 600–800 мм) тело сварщика может оставаться неподвижным в положении сидя или стоя, а при выполнении более протяженных швов сварщик перемещается

*Рис. 18. Схема механизированной дуговой сварки с перемещением руки сварщика:*  
 1 — изделие;  
 2 — держатель горелки;  
 3 — направляющая;  
 4 — приводное устройство;  
 5 — кисть руки;  
 6 — опорная площадка



шагами по мере сварки участков шва. Однако и в том, и в другом случае скорость перемещения руки остается механизированной, плавной и соответствует скорости сварки.

При сварке некоторых изделий возможен вариант, когда целесообразно с требуемой скоростью сварки перемещать не руку сварщика с держателем, а все его тело. Благодаря тому, что перемещение руки с держателем или тела сварщика осуществляют механизированным способом, сварщик подвергается меньшим физическим и нервным нагрузкам, больше внимания уделяет манипулированию электродом в процессе формирования шва. При этом шов можно выполнять с большей скоростью. Таким способом можно сваривать не только швы в нижнем положении, но и вертикальные швы, а также горизонтальные и наклонные швы на вертикальной плоскости. Способ можно использовать для выполнения как однослойных, так и многослойных швов.

Еще одним направлением механизации полуавтоматической сварки является использование сварочных полуавтоматов в составе комплексных механизированных рабочих мест и участков [38]. Комплексные рабочие места могут быть сварочными, сборочными и сборочно-сварочными. На *рис. 19* показан ряд типовых рабочих мест. Основу большинства рабочих мест составляют сварочный полуавтомат, установленный на колонне, консольный кран и другие устройства, в том числе автономные фильтровентиляционные агрегаты.

В ряде случаев для установки и сборки балочных и коробчатых металлоконструкций используют плиты с Т-образными пазами (*рис. 19, а, в, г*), которые можно комплектовать универсальными сборочно-сварочными приспособлениями. На рабочем месте, показанном на *рис. 19, г*, имеется универсальный сборочный портал с пневматическими прижимами, расположенными в двух плоскостях. Портал обслуживает попеременно каждое из двух рабочих мест. В рабочих местах широко применяют различные одноместные и двухместные столы с поворотными планшайбами (*рис. 19, к, л*).

Повышения уровня механизации рабочих мест и участков достигают за счет использования в их составе различного механического сварочного оборудования (*рис. 19, ж, з, и*).

Опыт эксплуатации типовых комплексных рабочих мест на основе механизированной сварки показал, что эффективность их применения достигается за счет:

- использования устройств для подвески механизмов подачи полуавтоматов, вследствие чего повышается маневренность, сокра-

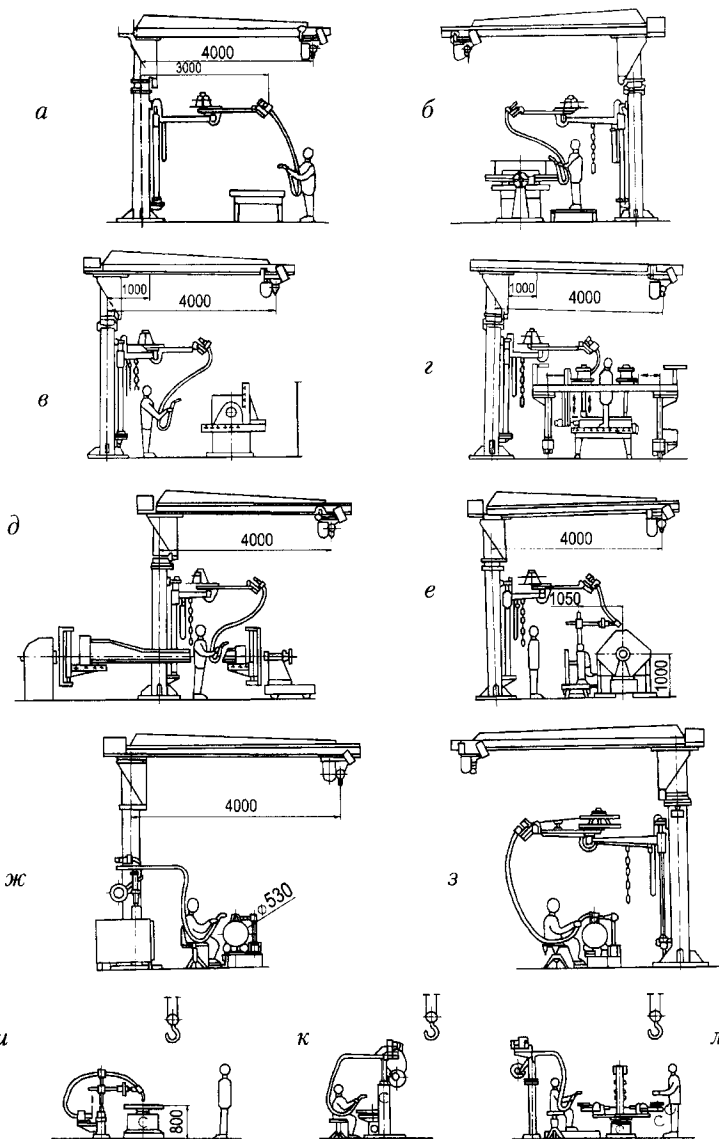


Рис. 19. Типовые комплексно-механизированные рабочие места для сборки и дуговой сварки полуавтоматом

щается время на смену проволоки, на обслуживание и выполнение других вспомогательных операций, снижается утомляемость сварщика, возрастает срок службы оборудования, экономится производственная площадь;

- использования универсальных и специальных средств сборки, загрузки-выгрузки и операционного манипулирования, что увеличивает производительность труда и качество швов, так как большинство их выполняют в нижнем положении;
- использования серийно выпускаемого механического и сварочного оборудования;
- рационального размещения оборудования (в соответствии с требованиями научной организации труда);
- комплектной поставки оборудования заказчику.

Эффективность применения комплексных рабочих мест возрастает, если в их состав входит сборочная и сборочно-сварочная оснастка. По данным ряда предприятий, при повышении уровня оснащенности каждого рабочего места от 15 до 50% себестоимость 1 т наплавленного металла снижается в 2–3 раза, а качество швов существенно увеличивается [38].

Возможности механизированной дуговой сварки, выполняемой сварочными тракторами и головками, расширяют за счет применения механического сварочного оборудования различного назначения [39].

Механическое сварочное оборудование делят на две группы: оборудование для установки и перемещения свариваемых изделий (универсальные вращатели, вертикальные и горизонтальные вращатели, роликовые вращатели, кантователи); оборудование для установки и перемещения сварочных аппаратов (порталы, сварочные колонны) и сварщиков (площадки и др.).

Сварочные колонны или порталы комплектуют подвесными сварочными аппаратами (головками) для сварки в защитных газах или под флюсом. Подвесные сварочные аппараты при необходимости оснащают системами слежения за стыком, в том числе с обратной связью, средствами диагностики узлов оборудования и программирования режимов сварки.

Наиболее распространенные компоновки механического сварочного оборудования, используемые для механизации рабочих мест, приведены в *табл. 45*.

Такие рабочие места обычно оснащают автономными фильтрационно-агрегатными и другим вспомогательным оборудо-

**Таблица 45. Механическое сварочное оборудование для механизации рабочих мест**

<i>Наименование</i>	<i>Сварочные колонны</i>	<i>Сварочные порталы</i>	<i>Площадки сварщиков</i>
Универсальные вращатели	+	+	–
Вертикальные вращатели	+	+	–
Горизонтальные вращатели	+	–	+
Роликовые вращатели	+	+	+
Кантователи	–	–	+

ванием. Для комплектации рабочих мест можно использовать не только готовое оборудование, но и его отдельные модули различного конструкторского исполнения (модуль вращения, модуль продольного перемещения и др.), что позволяет создавать требуемую компоновку для определенной технологической задачи.

Развитие комплексной механизации и автоматизации сварочного производства диктует необходимость совершенствования механического сварочного оборудования в следующих направлениях:

- повышение уровня собственной автоматизации за счет расширения использования микропроцессорной техники;
- обеспечение быстродействующей универсальной оснасткой для закрепления свариваемых изделий;
- оснащение оборудования системами автономной вентиляции с применением фильтровентиляционных агрегатов;
- расширение диапазона и обеспечение стабильности сварочных и маршевых скоростей;
- расширение номенклатуры оборудования на базе унифицированных модулей вращения и прямолинейного перемещения.

Современное механическое сварочное оборудование создают по блочно-модульному принципу, и поэтому по требованию заказчика его можно поставлять в виде сварочных станков, установок, комплексно-механизированных рабочих мест и участков.

**Комплексная механизация и автоматизация.** В условиях серийного производства комплексную механизацию и автоматизацию изготовления сварных конструкций реализуют посредством поточных механизированных или автоматизированных линий различного назначения.

Поточной линией называют комплекс оборудования, на котором последовательным технологическим потоком выполняют за-



данный цикл производственных операций по изготовлению целого изделия или его части.

Комплекс операций, выполняемых на поточных линиях, включает основные, вспомогательные, контрольные и дополнительные операции сварочного производства. Основные операции, выполняемые на этих линиях, — сборочные и сварочные; вспомогательные — транспортные, кантовочные, загрузочные, разгрузочные; контрольные — измерения и неразрушающие методы контроля. Дополнительные операции включают механическую обработку, формовку, гибку, резку, очистку и др. Количество и качество операций, выполняемых на конкретной линии, зависит от множества факторов, прежде всего от конструкции изделия и его размеров, характера технологических операций и типа производства (серийного, массового).

В техническом задании на проектирование механизированной или автоматизированной линии исходными данными являются годовая программа выпуска сварных изделий, изготавливаемых на данной линии,  $B$  и годовой фонд рабочего времени  $\Phi$ .

Необходимая производительность линии (*темп выпуска*), ед./ч

$$Q = B / \Phi \eta, \quad (11)$$

где  $\eta$  — коэффициент использования годового фонда времени, учитывающий неизбежные простои линий из-за неполадок, повреждений и настроек ( $\eta = 0,7-0,9$ ).

*Такт производства*  $t$  (мин) — это промежуток времени между выпусками двух соседних изделий (на выходе линии)

$$t = 60 / Q = 60 \Phi \eta / B. \quad (12)$$

*Ритм потока*  $r$  (мин) — промежуток времени между последовательными передачами с одного рабочего места на другое равных количеств  $n_T$  (транспортных партий) одинаковой продукции:

$$r = t \cdot n_T. \quad (13)$$

Величина ритма может быть различной на разных участках линии, но всегда должна быть кратной такту. Она может быть больше, меньше или равна такту в зависимости от продолжительности операций на отдельных рабочих местах, наличия или отсутствия разветвленных участков и способа транспортной передачи изделий или их узлов (партиями или поштучно).

Продолжительность производственного цикла изготовления изделий на линии равна времени  $T$  прохождения изделия по линии,

начиная с подачи заготовок или сырьевого материала на первую позицию и кончая выдачей готового изделия с последней позиции.

Продолжительность операций на одной данной позиции  $t_{\text{п}}$  может несколько колебаться относительно заданного значения ритма (в известных пределах). В жестко синхронизированном потоке, не имеющем буферных промежуточных заделов (накопителей), операционное время физически не может быть больше ритма.

В практике сварочного производства применяют ряд способов рациональной организации механизированных и автоматизированных линий [36]:

- выравнивание продолжительности операций  $t_{\text{п}}$ ;
- синхронность действия (совпадение начала и окончания операций на всех позициях линии, если она не расчленена);
- изменение числа рабочих на позициях;
- локальное изменение уровня механизации и автоматизации;
- расчленение операций;
- разветвление потока;
- совмещение операций;
- расчленение линии;
- уменьшение числа перебазирровок и перезакрепления изделий;
- оптимизация транспортной системы;
- оптимизация компоновки линий.

В Украине поточные комплексно-механизированные линии и участки широко используют в вагоностроении [40–43].

Высокий уровень механизации сборочно-сварочных работ при производстве бункерных вагонов достигнут на ОАО «Стахановский вагоностроительный завод» [40].

Вагон бункерного типа представляет собой цельносварную конструкцию. Загрузку крупнозернистых и порошкообразных материалов осуществляют через люки, расположенные в крыше. Вагоны строят на комплексно-механизированных поточных линиях с жесткой и гибкой связью. Производство организовано по замкнутому циклу, сварка узлов и общая сборка вагона размещены в двух пролетах сборочно-сварочного цеха. Основным принципом компоновки цеха является обеспечение прямоточности производственного процесса изготовления рамы, бункеров, крыши, боковых и торцевых стенок кузова.

Рама вагона является основным базовым узлом (рис. 20). В ее состав входят хребтовая балка 1, две шкворневые балки 4, конек продольный 2 и поперечный 5, лобовой лист 6, нижний лист 7,

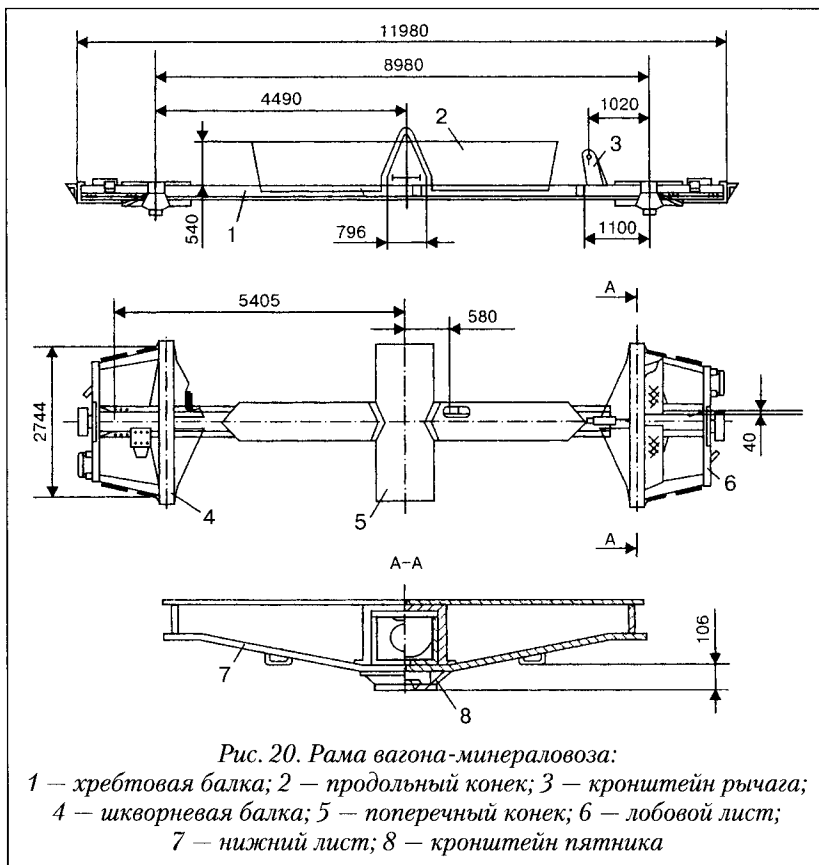


Рис. 20. Рама вагона-минераловоза:

- 1 — хребтовая балка; 2 — продольный конек; 3 — кронштейн рычага;  
 4 — шкворневая балка; 5 — поперечный конек; 6 — лобовой лист;  
 7 — нижний лист; 8 — кронштейн пятника

кронштейн рычага 3 и кронштейн пятника 8. Технологический процесс сборки рамы начинают с изготовления хребтовой балки, которая состоит из двух балок зетового профиля №31, свариваемых между собой продольным стыковым швом. На концевых частях балки устанавливают передние упоры автосцепного устройства. Сверху приваривают конек, придающий ей дополнительную прочность и способствующий лучшему ссыпанию груза. Сборка и сварка хребтовой балки организованы на специализированном участке (рис. 21).

Зетовые профили в цех доставляют в контейнерах (рис. 21, а), откуда их поштучно передают на стенд обрезки по длине, а затем с помощью пневматических манипуляторов 1 укладывают в стенд

сборки 2 (рис. 21, б). Механизированную сварку стыкового шва хребтовой балки выполняют под флюсом одновременно двумя сварочными автоматами А-1412 на флюсо-медной подкладке. В зазор стыка предварительно засыпают гранулированную металлическую присадку из проволоки Св-08Г2С диаметром 2 мм. С целью уменьшения деформации сварку балки выполняют с применением ее упругого выгиба с последующим закреплением и использованием обратного ступенчатого способа (один автомат сваривает шов от начала балки к ее середине, а второй — от середины до конца балки).

Собранную (совместно с передними и задними упорами) хребтовую балку перемещают на агрегатный двухсторонний сверлильный станок (рис. 21, з). После сверления балку укладывают в тележку-кантователь 4 (рис. 21, д), где выполняют клепку с использованием гидравлических поворотных скоб 3. После упомянутой операции хребтовую балку перемещают и укладывают в стенд для сборки (рис. 21, е) с узлами шкворневой балки, коньками (продольным и поперечным) и другими деталями, входящими в раму. Со-

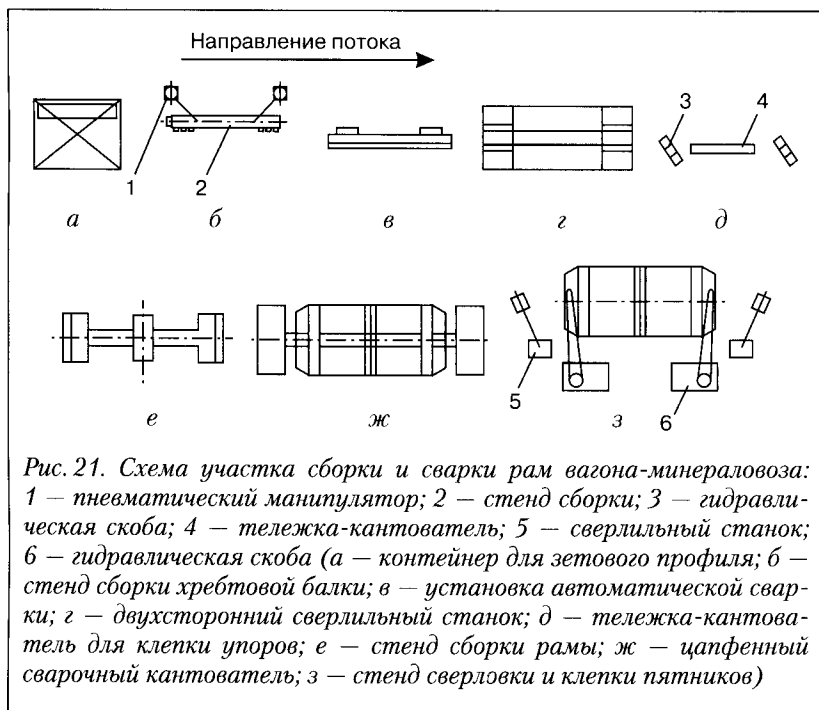
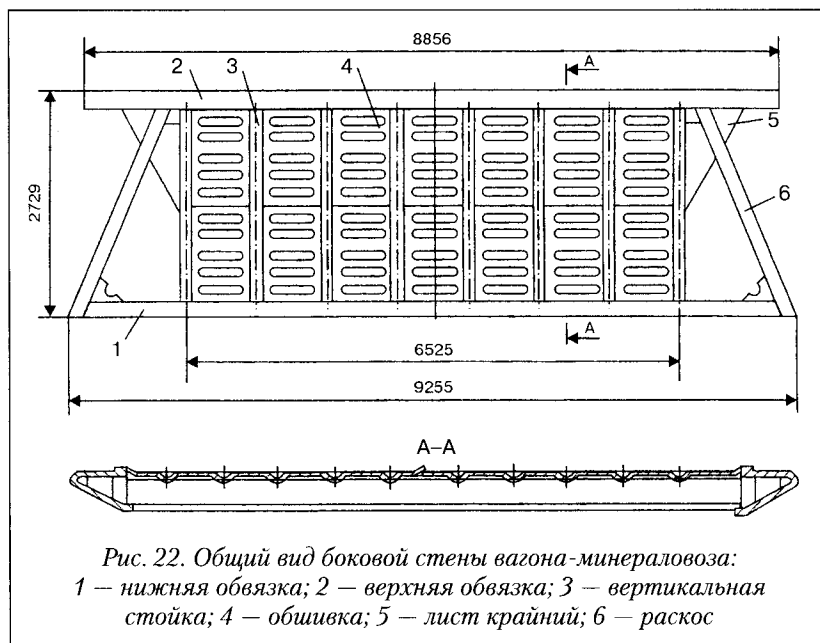


Рис. 21. Схема участка сборки и сварки рам вагона-минераловоза: 1 — пневматический манипулятор; 2 — стенд сборки; 3 — гидравлическая скоба; 4 — тележка-кантователь; 5 — сверлильный станок; 6 — гидравлическая скоба (а — контейнер для автомобиля профиля; б — стенд сборки хребтовой балки; в — установка автоматической сварки; г — двухсторонний сверлильный станок; д — тележка-кантователь для клепки упоров; е — стенд сборки рам; ж — цапфенный сварочный кантователь; з — стенд сверловки и клепки пятников)

бранный на прихватках узел закрепляют в сварочном кантователе (рис. 21, ж), где выполняют требуемые швы. После этого сваренную раму мостовым краном устанавливают на стенд для сверления (рис. 21, з), где радиально-сверлильными станками 5 выполняют отверстия, необходимые для крепления к раме пятников с помощью гидроскоб 6. Затем раму собирают с предварительно изготовленными бункерами и сваривают в кантователе с подъемными центрами.

Боковая стена вагона-минераловоза (рис. 22) представляет собой каркасную конструкцию, состоящую из нижней 1 и верхней 2 обвязок, соединенных между собой вертикальными стойками 3. Для придания каркасу жесткости у крайних стоек устанавливают раскосы 6. Верхнюю обвязку выполняют из гнутого профиля коробчатого сечения открытого типа, нижнюю и раскосы — из квадратной трубы толщиной 5 мм. Стойки выполняют из двутаврового профиля №12. Обшивку боковой стены изготовляют из листового профильного проката с периодически повторяющимися гофрами. К стойкам полотна обшивку приваривают электрозакленками диаметром 21 мм с шагом 110 мм, а к верхней и нижней обвязкам — нахлесточным швом.



Производство боковых стен организовано на комплексно-механизированной поточной линии, состоящей из четырех рабочих мест (рис. 23). На первом рабочем месте (рис. 23, а) собирают и сваривают полотнище обшивки. Оно состоит из двух гофрированных листов, образующих между собой нахлесточное соединение, свариваемое с обеих сторон угловым швом катетом 3 мм. Сварку осуществляют с помощью сварочного портала. Предотвращения образования зазоров в нахлесточном соединении достигают прижатием свариваемых кромок прижимным роликом, смонтированным на портале.

После сварки первого шва изделие освобождают от крепления, кантуют мостовым краном и сваривают второй шов. Готовое изделие поднимают подъемным рольгангом, встроенным в раму стэнда, и перемещают на стэнд сборки с каркасом боковой стены (рис. 23, б). На этом рабочем месте все детали соединяют между собой электродуговыми прихватками, и собранный узел передают по рольгангу на установку для автоматической дуговой точечной сварки полотнища обшивки со стойками каркаса боковой стены (рис. 23, в). Затем изделие освобождают от

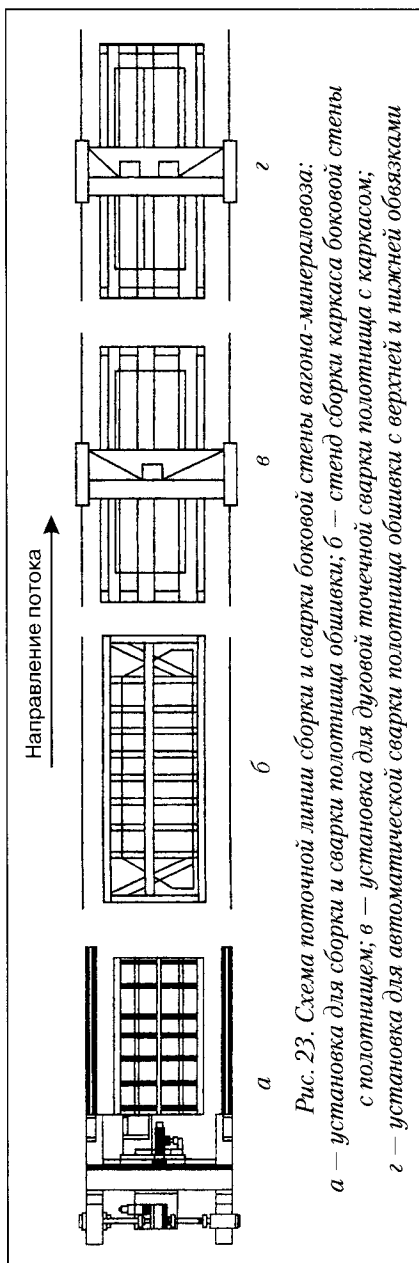


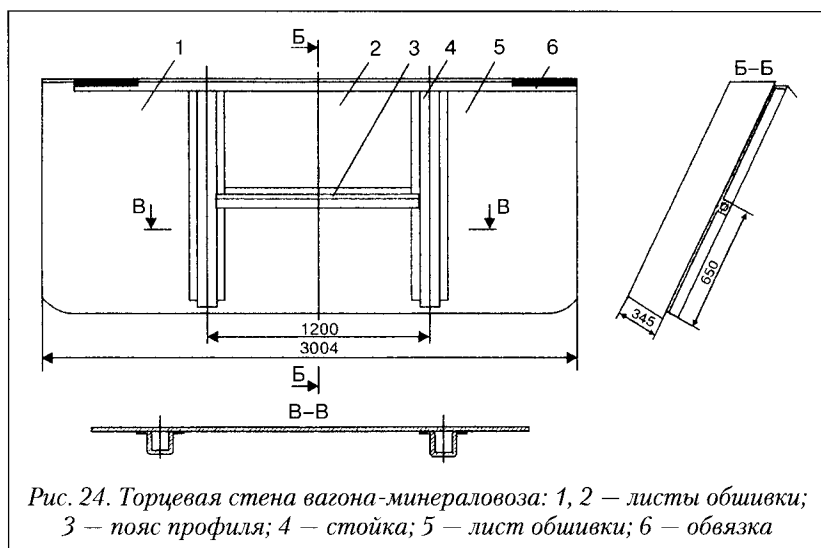
Рис. 23. Схема поточной линии сборки и сварки боковой стены вагона-минераловоза:  
 а — установка для сборки и сварки полотнища обшивки; б — стэнд сборки каркаса боковой стены с полотнищем; в — установка для дуговой точечной сварки полотнища с каркасом;  
 г — установка для автоматической сварки полотнища обшивки с верхней и нижней обвязками

крепления, кантуют мостовым краном на  $180^\circ$  и передают на установку для сварки полотнища обшивки к верхней и нижней обвязкам (рис. 23, з). Она позволяет выполнять сварку двумя головками, обеспечивающими плотное прилегание кромки привариваемого полотнища к обвязкам и автоматическое направление электрода по оси стыка. Сваренную боковую стену передают на стенд общей сборки кузова вагона.

Торцевая стена вагона-минераловоза (рис. 24) состоит из трех частей: листа обшивки 2 и двух привариваемых к нему встык выштампованных листов 1, 5 толщиной 4 мм. Штампованные части используют для улучшения ссыпаемости груза и образования связи в виде стыковых соединений между боковыми и торцевыми стенами. К верхней части обшивки приваривают верхнюю обвязку, выполненную в виде полосы 6. Лист обшивки усилен двумя продольными стойками 4 и поясом 3 омегаобразного профиля. Производство торцевых стен организовано на специализированном участке, состоящем из трех рабочих мест [40].

Наиболее высокий уровень механизации труда и оснащенности технологического процесса оборудованием достигнут при изготовлении крыш вагонов-хопперов.

Крыша вагона-цементовоза (рис. 25) состоит из поперечных дуг 5, выполненных из уголка и обшитых сверху листами 4, 7. Листы



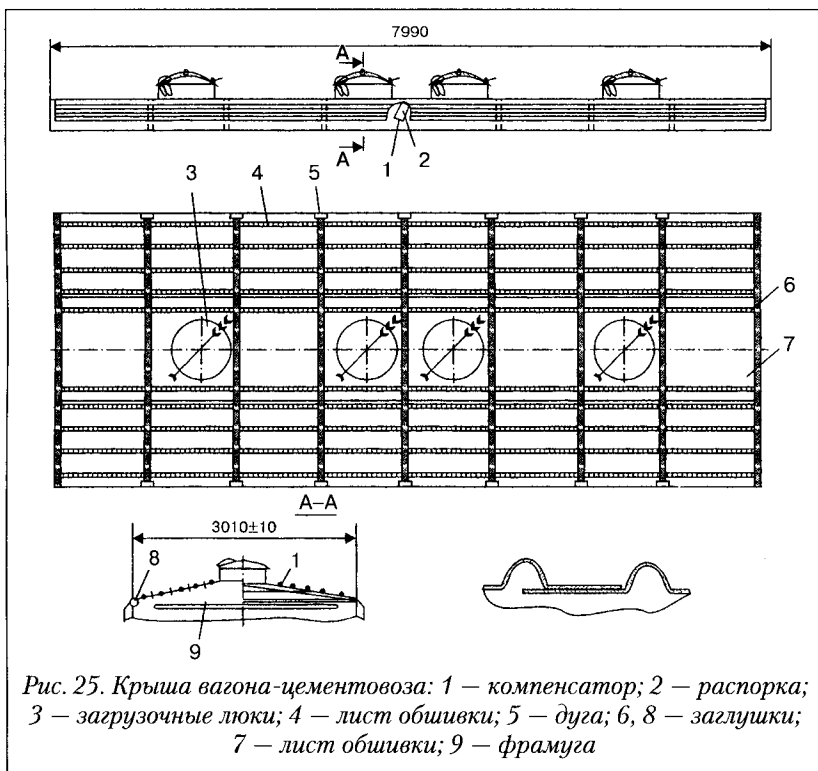


Рис. 25. Крыша вагона-цементовоза: 1 — компенсатор; 2 — распорка; 3 — загрузочные люки; 4 — лист обшивки; 5 — дуга; 6, 8 — заглушки; 7 — лист обшивки; 9 — фрамуга

обшивки имеют продольные гофры, придающие крыше жесткость и препятствующие скольжению по ней обслуживающего персонала. К крайним дугам с обоих торцов крыши приварены фрамуги 9, с помощью которых крышу соединяют с торцевыми стенами вагона. По оси крыши расположены четыре загрузочных люка 3, которые закрыты крышками со сферической поверхностью и прижимаются пружинящими рычагами.

Изготовление крыши выполняют на поточной линии, состоящей из трех рабочих позиций и двух складских мест (рис. 26). Сборку крыш начинают с изготовления в кондукторе двух дуг и фрамуг, которые передают на стенд установки для сборки и сварки 3, где выполняют сборку и механизированную сварку с помощью сварочных головок. Готовое изделие перемещают на стенд для испытания плотности сварных соединений 4 способом керосиновой пробы, а затем сдают на склад 5 готовых изделий.



Рис. 26. Схема размещения оборудования на линии изготовления крыши: 1 — складское место для листового проката; 2 — стенд сборки и сварки фрамуг; 3 — установка сборки и сварки; 4 — стенд для испытания; 5 — склад готовых изделий; 6 — сварных соединений на плотность; 5 — склад готовых изделий; 6 — двухплечевые консоли с подающими механизмами сварочных полуавтоматов

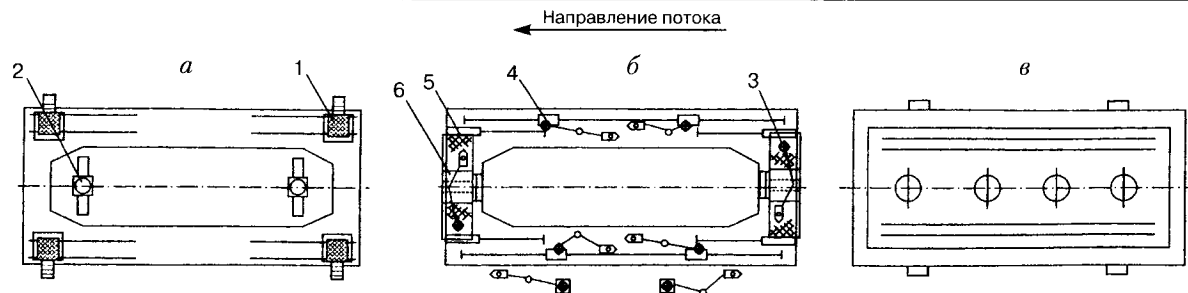
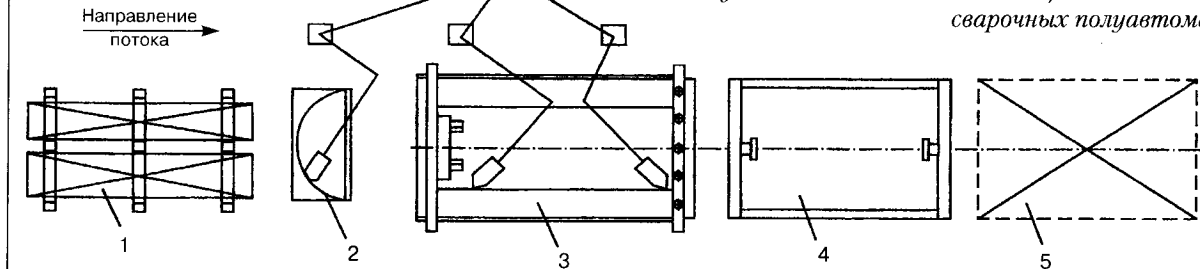


Рис. 27. Схема размещения оборудования на участке сборки металлоконструкции вагона: 1 — тележка; 2 — опора; 3 — неподвижная стойка; 4 — консоль; 5 — передвижная стойка; 6 — консоль

Вагон представляет собой цельносварную конструкцию, состоящую из рамы с бункерами, двух боковых и двух торцевых стен, которые приваривают в раме и сваривают между собой, и крышей, которую приваривают к стенам. Общую сборку и сварку металлоконструкции вагона осуществляют на участке, состоящем из трех рабочих мест (рис. 27). Первоначально на установочные пальцы подъемных опор 2 сборочного стенда (рис. 27, а) укладывают раму с бункерами. После ее выравнивания в горизонтальной плоскости, которое выполняют способом регулирования мерными пластинами, производят ее фиксацию.

Положение боковых стен относительно закрепленной рамы определяется нижними ловителями. Вертикальное закрепление боковины осуществляют винтовой стяжкой. Стыковку боковых и торцевых стен между собой выполняют винтовыми распорками, а совмещение торцов — струбцинами. Сборку верхней части кузова вагона осуществляют с тележек, перемещающихся по рельсам, которые уложены вдоль всей длины стенда. На тележках смонтированы огражденные подъемные площадки для сборщиков. Собранный на электроприхватках металлоконструкцию вагона устанавливают в цапфенный кантователь (рис. 27, б), позволяющий поворачивать изделие на 90° в обе стороны и выбирать наиболее удобное положение для выполнения сварочных работ. Кантователь выполнен в виде двух отдельно стоящих стоек. Стойка 3 неподвижная, 5 — передвижная. На площадках стоек смонтированы поворотные консоли 6 со сварочными полуавтоматами. С обеих сторон вдоль кантователя уложены рельсы, по которым перемещают электроприводные сварочные консоли 4. После сварки кузов перемещают на следующий стенд (рис. 27, в), где производят установку крыши, а далее — на специализированную линию слесарной сборки вагона.

Комплексно-механизированные участки и линии применяют также при изготовлении сварных конструкций грузовых вагонов других типов [41, 42] и пассажирских вагонов [43].

Еще одним примером комплексной механизации является производство сварных баллонов для сжиженного пропан-бутана (рис. 28). В 1985–86 гг. производство таких баллонов только на Дружковском заводе газовой аппаратуры и кранов (Донецкая обл.) достигало 400 тыс. шт. в год. Аналогичные производства существовали и на других заводах СССР (более 5 млн шт. в год) [44, 45].

Производство баллонов организовано по замкнутому циклу, начиная с подготовки металла и кончая окраской (рис. 29) [44]. В ли-

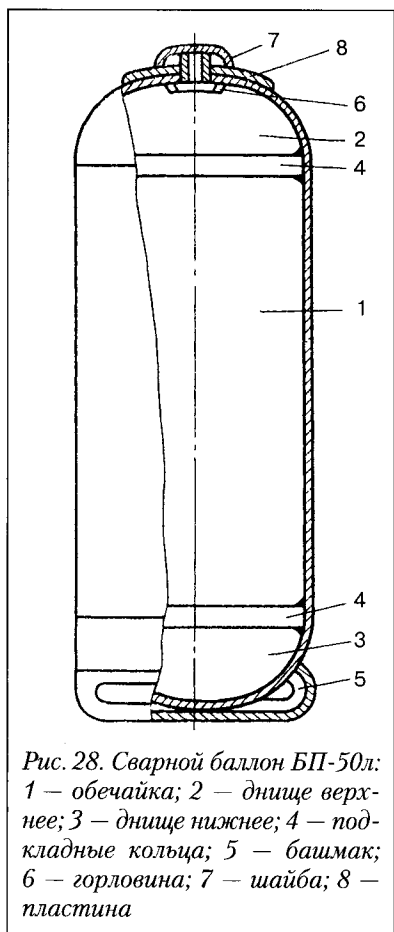


Рис. 28. Сварной баллон БП-50л:  
 1 — обечайка; 2 — днище верхнее; 3 — днище нижнее; 4 — подкладные кольца; 5 — башмак; 6 — горловина; 7 — шайба; 8 — пластина

нию гибки и сварки обечаек заготовки подают с предварительно подогнутыми кромками. После формовки заготовки на вальцах ее по транспортеру перемещают на установку для сборки, прихватки и зачистки продольного стыка. Далее обечайка поступает в приемное устройство, откуда пневмоприводом ее загружают в сварочную установку. Сварку выполняют одной дугой под флюсом на флюсо-медной подкладке.

Для повышения качества швов была предложена технология двухдуговой сварки под флюсом в отдельные ванны [45]. Сваренную обечайку подают транспортером на рабочее место, где обрезают технологические планки.

Линия сборки-сварки днища с горловиной и днища с башмаком разделена на две ветви.

*Правая ветвь* состоит из комплекса установок для сварки соединения нижнего днища. Сборку и прихватку подкладного кольца к нижнему днищу производят в специальной установке. Подкладное кольцо закладывают

в диск, затем устанавливают днище, включают пневмопривод, и происходит запрессовка днища до упора. Прихватку соединения производят полуавтоматом в среде  $\text{CO}_2$ . По скату днище передают к установке для сварки с башмаком. Башмак к днищу приваривают автоматом в среде углекислого газа прерывистым швом.

*Левая ветвь* состоит из комплекса установок для сварки соединений верхнего днища. Прихватку подкладного кольца к верхнему днищу производят так же, как и к нижнему днищу. По скату днище передают к установке для автоматической сварки под флюсом с горловиной по внутренней стороне.

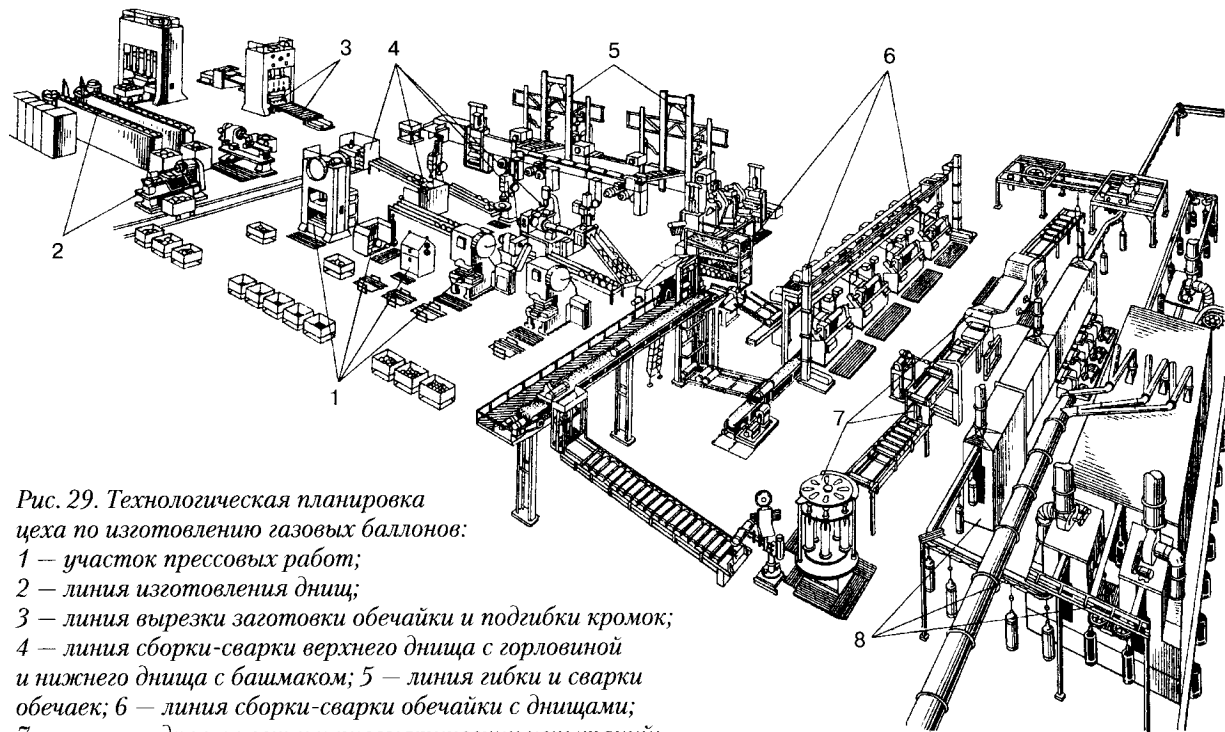


Рис. 29. Технологическая планировка цеха по изготовлению газовых баллонов:

- 1 — участок прессовых работ;
- 2 — линия изготовления днищ;
- 3 — линия вырезки заготовки обечайки и подгибки кромок;
- 4 — линия сборки-сварки верхнего днища с горловиной и нижнего днища с башмаком;
- 5 — линия гибки и сварки обечаек;
- 6 — линия сборки-сварки обечайки с днищами;
- 7 — линия гидравлических и пневматических испытаний;
- 8 — линия окраски и сушки

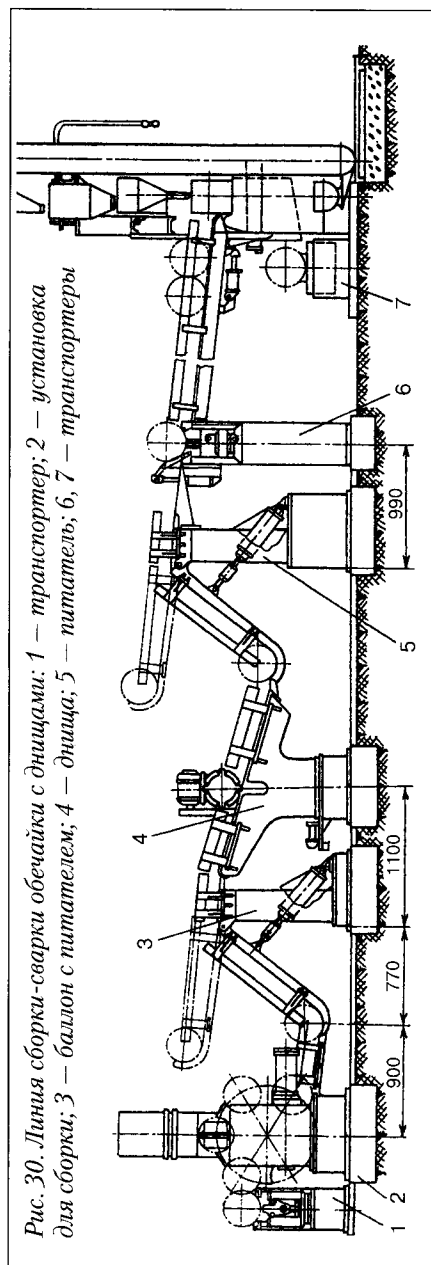


Рис. 30. Линия сборки-сварки обечайки с днищами: 1 — транспортер; 2 — установка для сборки; 3 — баллон с питателем; 4 — днище; 5 — питатель; 6, 7 — транспортеры

Линия сборки-сварки обечайки с днищами позволяет реализовать такую последовательность операций (рис. 30). По штанговому транспортеру 1 обечайку подают на установку для сборки с днищами 2. Собранный баллон с питателем 3 автоматически загружают в установки для зачистки стыка обечайки с днищами 4 и питателем 5, затем передают в четырехпозиционный распределительный транспортер 6, который автоматически распределяет баллоны на четыре установки для сварки кольцевых швов. После сварки баллон устанавливают на транспортер 7 и передают для испытаний.

Описанное выше производство предусматривает выпуск 200 тыс. баллонов в год [44].

Необходимо подчеркнуть, что комплексно-механизованное производство будет рентабельным только в том случае, если оно базируется на высокоэффективных технологиях сварки, резки, формовки, послесварочной обработки и др.

При единичном и мелкосерийном производстве расширение применения высокоэффективных технологий возможно после проведения ряда мероприятий:

- выявления из всего объема сварных конструкций, изготавливаемых предприятием, однотипных;
- улучшения технологичности сварных конструкций;
- группировка сварных конструкций по заранее разработанному классификатору и разработка типовых технологических процессов производства;
- организация изготовления сгруппированных конструкций с учетом качественных и количественных характеристик, а также необходимой рентабельности.

Хотя дуговые способы сварки и относятся к наиболее широко применяемым, в ряде случаев они не могут конкурировать с контактной сваркой, которая более приемлема с позиций комплексной механизации и автоматизации и других показателей, применительно к производству ряда изделий.

В качестве примера можно привести автоматизированное производство сварных металлических сеток.

Сварные сетки широко используют в строительстве, для изготовления тары различного назначения, клеток для мелких животных и птицы, различного рода подставок и др. Основными мировыми производителями оборудования для производства сварных сеток являются фирмы «Schlatter» (Швейцария) и EVG (Австрия). В Украине и России созданием оборудования для производства сварной сетки до недавнего времени занимались ОАО «УкрИСП», Псковский завод тяжелого электросварочного оборудования, Санкт-Петербургский завод «Электрик» и др.

На *рис. 31* приведена схема автоматизированной линии для изготовления сварной металлической сетки из проволоки диаметром 2–3 мм конструкции ОАО «УкрИСП». Намотанную на барабаны 1 продольную проволоку подают в устройство для правки 2, а после этого в машину для контактной сварки 3. В сварочной машине производят совмещение продольных проволок с выправленной поперечной проволокой, которую подает устройство 4. Рельефную сварку проволоки осуществляют либо одновременно по всем пересечениям, либо последовательно. Подвод сварочного тока (односторонний) производят к нижним неподвижным электродам от сварочных трансформаторов. Число включаемых трансформаторов зависит от числа продольных проволок в сетке (максимально 24). Шаг между продольными и поперечными проволоками регулируют установочно в диапазоне 16, 24, 32, 40 и 48 мм. Сваренная сетка проходит через комбинированные ножницы 4 на пакетирование,

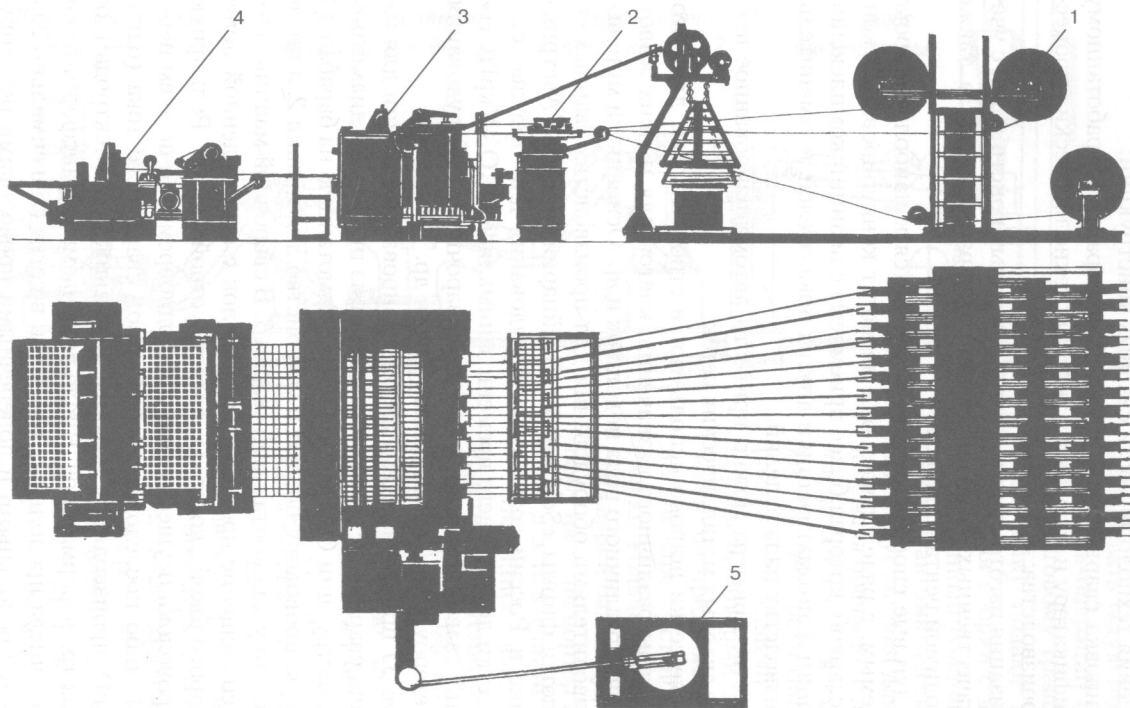


Рис. 31. Схема автоматизированной линии для изготовления сварной металлической сетки:

1 — барабан; 2 — устройство для правки; 3 — машина контактной сварки;

4 — комбинированные ножницы; 5 — устройство подачи проволоки

где при достижении заданной длины ее сматывают в рулон или разрезают на карты и укладывают в пачки. Производительность сварки поперечных проволок достигает 75 ед. в минуту.

Аналогично устроена линия для сварки металлической сетки из проволоки диаметром 0,5–1,4 мм мод. KRF-802 фирмы EVG. При этом расстояние между продольными проволоками составляет 12,7–50,8 мм, а между поперечными — 12,7–25,4 мм (для проволоки диаметром 1,2 мм) и 12,7–50,8 мм (для проволоки диаметром 1,4 мм). Максимальная ширина сетки 2146,3 мм, а минимальная — 1016 мм. Максимальная производительность сварки поперечных проволок — 160 сварок в минуту.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к современным линиям сварки сеток, являются обеспечение универсальности линии и минимизация времени ее переналадки на выпуск требуемого размера сетки, заданной точности величины шага и стабильного качества сварных соединений. Указанные задачи решают путем повышения точности исполнительных механизмов, использования управляемого электропривода, применения систем числового программного управления и других решений [46].

Безусловно, автоматизация технологических процессов и комплексная автоматизация являются магистральным направлением развития современного производства. В то же время применение высокого уровня автоматизации в сварочном производстве диктует необходимость в реализации таких технических решений, которые будут экономически эффективными при относительно небольших партиях выпуска сварных изделий заданных типоразмеров, т. е. речь идет о гибкой автоматизации, которую реализуют с помощью роботов.

**Роботизация сварочного производства.** В настоящее время в сварочном производстве промышленно развитых стран с помощью роботов:

- выполняют сварочные и другие технологические операции;
- производят загрузку и разгрузку сварочных установок, станков, машин и другого оборудования (загрузочно-разгрузочные роботы);
- осуществляют сборку заготовок перед сваркой (сборочные роботы);
- транспортируют заготовки и сварные конструкции от одного рабочего места к другому (сборка, контроль, складирование и другие операции сварочного производства — транспортные роботы).

Парк сварочных и сборочных промышленных роботов в ведущих странах мира постоянно увеличивается.



**Таблица 46. Общая численность (парк) промышленных роботов и количество установленных по регионам и странам**

Регион/страна	Установлено, шт., 2006 г.	Парк	
		численность, шт.	доля сварочных, %
Мир, всего, в т. ч:	112203	800772	27,7
Япония	37393	348734	19,4
Северная Америка (США, Мексика и Канада)	17417	112390	49,5
Европейский Союз, в т. ч:	31536	249200	
Германия	11425	112693	30,8
Италия	6259	50043	20,7
Франция	3071	26137	43,6
Великобритания	1220	14015	49,1
Испания	2409	19847	53,5
Швеция	865	6959	35,6
Азия/Австралия, в т. ч:	61748	65419	
Австралия	772	3571	24,5
Республика Корея	10756	47845	36,5
Тайвань	4307	8730	25,7

В табл. 46 представлена численность мирового, региональных и некоторых национальных парков роботов по состоянию на конец 2006 г., а также количество установленных в 2006 г. [2].

Как видно из данных табл. 46, основной парк промышленных роботов сосредоточен в Японии, США, странах ЕС и ряде стран азиатско-австралийского региона. Безусловным лидером по количеству ежегодно вводимых в эксплуатацию роботов и активной замене роботов новыми прогрессивными моделями является Япония. Общими факторами, побуждающими расширять использование роботов в промышленно развитых странах, являются хронический дефицит высококвалифицированных рабочих, высокая заработная плата производственного персонала и необходимость повышения производительности выпуска изделий при обеспечении высокого качества исполнения рабочих операций.

Среди сварочных роботов наибольшую долю продолжают занимать роботы для выполнения контактной точечной и газозлектро-

ческой дуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродом. В то же время в последние годы растет количество роботов для выполнения лазерной и лазерно-дуговой сварки, сварки трением с перемешиванием (СТП), ударно-конденсаторной приварки шпилек и др.

Лидерами производства базовых моделей промышленных роботов ныне являются ряд крупных транснациональных фирм, среди которых ABB Robotics (США), FANUC (Япония), KUKA и C.Cloos (Германия), International Robotics (США), суммарный объем продаж которых уже превысил 70% от мирового объема продаж роботов.

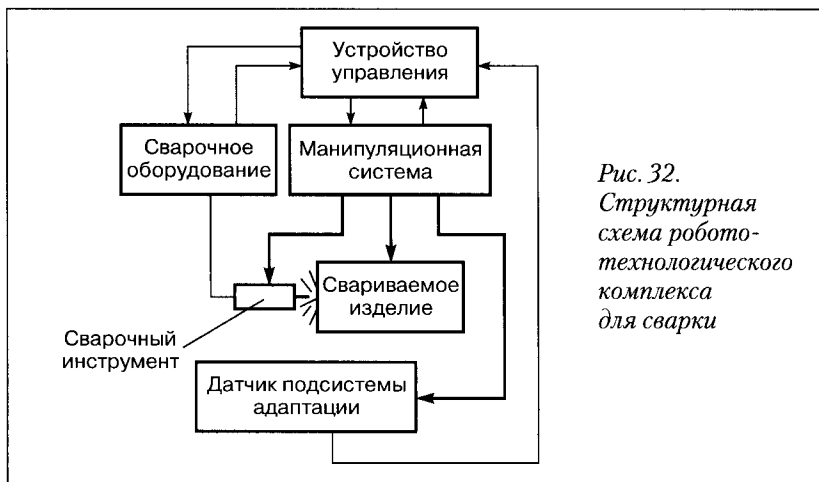
Средняя мировая цена единичного робота снизилась со 105 тыс. дол. в 1999 г. до 20–40 тыс. дол. в 2003 г. и продолжает снижаться. При этом функциональные показатели и надежность роботов улучшились.

Исполнительные механизмы роботов стали изящнее и меньших габаритов, что повлекло за собой снижение инерционности и, как следствие, увеличение скорости подачи рабочего инструмента в нужное место. Современные роботы комплектуют сенсорными устройствами, средствами диагностики, в том числе дистанционной, инверторными источниками питания, специальными захватами для быстрой смены инструмента и др.

Среди достоинств роботизации обычно отмечают повышение качества продукции, возможность автоматизации как серийного и массового производств, так и мелкосерийного, возможность компенсации хронического дефицита высококвалифицированных сварщиков, облегчение условий труда и др.

**Роботизация дуговой сварки.** Роботы применяют чаще всего для роботизации дуговой и контактной точечной сварки в составе робототехнологических комплексов (РТК), участков и линий [47, 48]. В состав робототехнологических комплексов входят манипуляционная система, сварочное оборудование, устройство управления и измерительные устройства системы геометрической и технологической адаптации (рис. 32). Манипуляционная система, в свою очередь, состоит из манипулятора сварочного инструмента и манипулятора изделия. В качестве манипулятора сварочного инструмента (горелки — для дуговой, клещей — для контактной точечной сварки) обычно используют сварочный робот, представляющий собой многозвенный манипулятор с системой программного управления перемещениями звеньев.

Грузоподъемность роботов для дуговой сварки обычно 5–10 кг, а роботов для контактной точечной — 50–90 кг.



*Рис. 32.  
Структурная  
схема робото-  
технологического  
комплекса  
для сварки*

В кинематической структуре манипулятора сварочного инструмента различают звенья, выполняющие переносные (региональные) и ориентирующие (локальные) перемещения. Переносные перемещения необходимы для переноса рабочей точки инструмента (точки сварки) в пределах рабочей зоны манипулятора инструмента, ориентирующие — для обеспечения заданной ориентации сварочного инструмента относительно изделия в заданной точке рабочей зоны.

В зависимости от системы координат переносных перемещений сварочные роботы могут быть построены в прямоугольной, цилиндрической, цилиндрической угловой, сферической и сферической угловой системах координат [47]. Все эти системы имеют достоинства и недостатки и принципиально пригодны для любого способа сварки. Однако для дуговой сварки чаще всего применяют роботы со сферической угловой и прямоугольной системой координат, а для контактной точечной — роботы со сферической и сферической угловой системой координат.

Одной из важнейших характеристик универсальности робота является его возможность обеспечивать движение по любым траекториям с заданной скоростью или достижение любых точек пространства в пределах трехмерной рабочей зоны в любой последовательности с любой ориентацией инструмента. Это требует не менее пяти степеней подвижности и числовой контурной (при дуговой сварке непрерывных и прерывистых швов любой формы) либо позиционной (при контактной и дуговой точечной сварке) системы управления.

В практике сварочного производства находят применение и специализированные роботы, манипуляционные системы которых имеют от двух до четырех степеней подвижности [47]. При этом специализированные роботы [48] с небольшим числом степеней подвижности чаще всего выполняют на базе модулей с оптимальной для данной задачи конфигурацией манипуляционной системы.

Манипуляторы изделия по сравнению с манипуляторами сварочного инструмента являются менее универсальными элементами робототехнологического комплекса. Их кинематическая структура и компоновка существенно зависят от формы, размеров и массы изделия, а также от формы и расположения линий соединения свариваемых элементов.

Для комплектования робототехнологического комплекса дуговой сварки в ОАО «УкрИСП» создана гамма манипуляторов с программным управлением грузоподъемностью 160, 400, 800, 1000 и 2000 кг (рис. 33) [49].

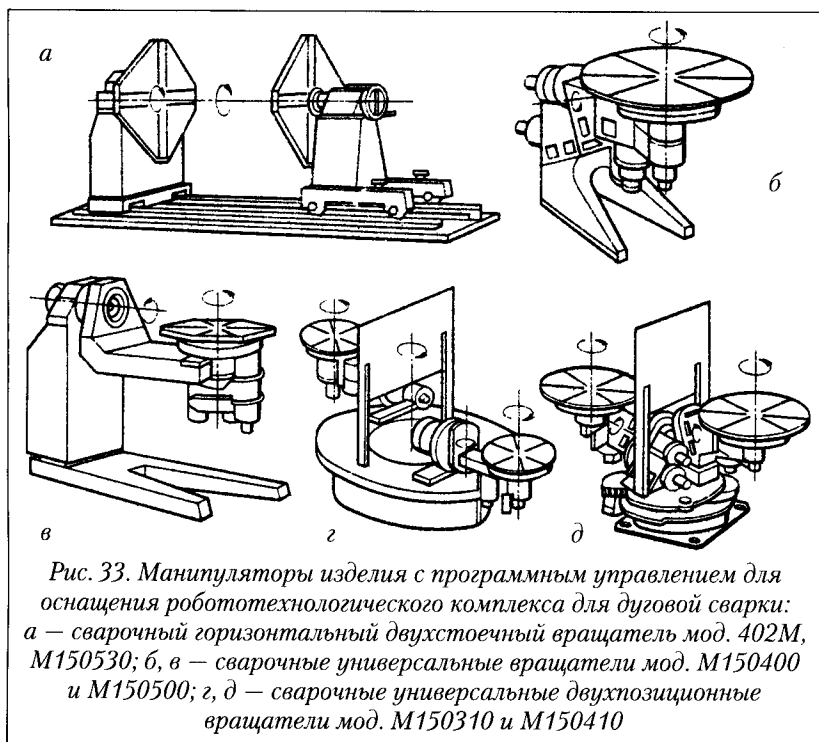


Рис. 33. Манипуляторы изделия с программным управлением для оснащения робототехнологического комплекса для дуговой сварки: а — сварочный горизонтальный двухстоечный вращатель мод. 402М, М150530; б, в — сварочные универсальные вращатели мод. М150400 и М150500; г, д — сварочные универсальные двухпозиционные вращатели мод. М150310 и М150410

При проектировании манипуляторов использован принцип создания их на базе унифицированных узлов (модулей). Разработаны модули вращения различной грузоподъемности. Каждый из них снабжен двигателем, тормозом, токосъемником и датчиком положения.

Кинематическая цепь модуля вращения включает волновую передачу, связанную со шпинделем зубчатым зацеплением с устройством для выбора зазоров. Это обеспечивает высокую точность позиционирования, плавность работы и высокий КПД механизмов.

Технические характеристики манипуляторов, разработанные на базе упомянутых модулей вращения, приведены в *табл. 47*.

<b>Таблица 47. Технические характеристики манипуляторов изделия</b>						
<i>Параметр</i>	<i>Модуль манипулятора изделия</i>					
	<i>402М</i>	<i>М150530</i>	<i>М150310</i>	<i>М150400</i>	<i>М150410</i>	<i>М150500</i>
Грузоподъемность, кг	800	2000	160	400	400	1000
Крутящий момент на оси вращения планшайбы, Н·м	400	1000	160	400	400	1000
Поперечный размер свариваемого изделия, мм	≤1500	≤1800	≤800	≤1300	≤1300	≤1800
Угол поворота планшайбы, град.	360	360	360	360	360	360
Угол наклона планшайбы, град.	–	–	340	335	335	340
Частота вращения планшайбы, об./мин:						
наименьшая	0,05	0,063	0,063	0,05	0,05	0,063
наибольшая	10,0	6,3	3,0	10,0	10,0	6,3
Скорость наклона планшайбы, град/с	–	–	74	60	60	37,2
Скорость поворота стола, град/с	–	–	≤34,3	–	≤37,8	–
Погрешность позиционирования (повторяемость) при вращении и наклоне планшайбы, град.	±0,017	±0,023	±0,017	±0,017	±0,017	±0,023
То же, на диаметре 1000 мм, мм	±0,15	±0,2	±0,15	±0,15	±0,15	±0,2

Для управления манипуляторами изделия можно применять как системы управления манипулятором инструмента (собственно робота), так и индивидуальную систему. Это дает возможность комплектовать этими манипуляторами самые различные комплексы, использующие достаточно широкую гамму систем управления, и применять их индивидуально, при выполнении не только сварочных операций, но и газотермического напыления, упрочнения и др.

В робототехнологический комплекс для выполнения дуговой сварки входит следующее сварочное оборудование:

- источник питания сварочной дуги;
- аппаратура подачи сварочной проволоки;
- набор сварочных горелок;
- аппаратура охлаждения горелок;
- газовая аппаратура;
- устройства автоматической очистки горелки от брызг;
- аппаратура удаления газов и аэрозолей;
- устройство защиты горелки от поломки;
- коммуникации и средства контроля начального положения горелки;
- устройства крепления сварочной аппаратуры на составных частях комплекса;
- аппаратура контроля и управления сварочным оборудованием [47].

Ко всем этим составляющим сварочного оборудования предъявляют различные требования, но важнейшими являются высокая надежность и функциональная готовность в условиях интенсивной эксплуатации комплекса.

Управление робототехнологическим комплексом для сварки состоит в обеспечении согласованного функционирования манипуляционной системы и сварочного оборудования, а также в обмене информацией с внешними системами на основании программы выполнения операции, информации о внутреннем состоянии составных частей комплекса и информации о производственной среде. Под производственной средой следует понимать прежде всего свариваемое изделие, приспособление, в котором оно закреплено, оборудование, осуществляющее транспортные и накопительные функции, а также другие системы, участвующие в производственном процессе, состояние которых оказывает влияние на данный РТК. Задача управления звеньями манипуляционной системы может быть позиционной или контурной.

При позиционном управлении обеспечивается лишь определенное значение координат рабочего органа в заданных точках. Траек-

тория движения между точками и скорость этого движения могут быть в определенных пределах произвольными, кроме случаев, когда звенья перемещаются поочередно и траектория рабочего органа определяется отрезками соответствующих направляющих.

Контурное управление состоит в обеспечении движения рабочего органа по траектории любой формы с заданной скоростью.

Позиционное управление манипуляционными системами может применяться в РТК для контактной точечной сварки, для сварки электрозаклепками, для дуговой и ударно-конденсаторной приварки шпилек, для вварки труб в трубные доски и приварки круглых бобышек с помощью сварочной головки, с круговым движением горелки (горелок), а также для поочередной сварки прямолинейных и круговых швов, расположенных в различных положениях вдоль направляющих движения звеньев манипуляционной системы.

Контурное управление манипуляционными системами необходимо при сварке швов сложной формы, а также при наплавке сложных кромок и поверхностей.

Система управления робототехнологическим комплексом, как правило, решает и задачи управления параметрами режима сварки.

Говоря о роботизации дуговой сварки, необходимо помнить о том, что сенсорные и манипуляционные свойства роботов значительно ниже соответствующих свойств человека-сварщика. Поэтому конструкции, применяемые для ручной или механизированной сварки, в ряде случаев оказываются непригодными для сварки роботами из-за недостаточной точности подготовки и недостижимости мест сварки для инструмента, закрепленного на последнем звене манипулятора.

Для большинства сварных конструкций характерны также невысокая точность обработки свариваемых заготовок, невысокая точность их сборки перед сваркой и фиксации собранной конструкции. Совместное действие этих факторов является причиной случайных отклонений линии соединения заготовок от ее расчетного (запрограммированного) положения, а также случайных отклонений геометрических параметров соединения (зазора, сечения разделки кромок), подготовленного к сварке, от номинального значения. При ручной или механизированной сварке эти отклонения могут компенсироваться действиями достаточно опытного человека-сварщика. При роботизированной сварке эти отклонения в тех случаях, когда ими нельзя пренебречь, требуют корректировки:

- траектории движения сварочного инструмента относительно изделия (за счет использования систем геометрической адаптации);

- параметров режима сварки (т. е. технологической адаптации).

Проблема досягаемости связана с тем, что манипулятор робота имеет лишь шесть степеней подвижности, тогда как рука человека (вместе с пальцами) — 27.

Из-за указанных ограничений при переводе сварных конструкций на роботизированную сварку нередко возникает необходимость повысить технический уровень заготовительного производства и (или) применить более сложные сборочно-сварочные приспособления для уменьшения случайных отклонений, а также по возможности исключить необходимость в адаптации, возможности которой довольно ограничены.

Дополнительно вносят изменения в конструкцию сварного изделия для исключения или уменьшения влияния погрешностей изготовления, их сборки и фиксации на точность подготовки изделия к сварке, а также обеспечения доступности мест сварки для инструмента робота.

Экономические особенности роботизации связаны прежде всего с тем, что комплекс оборудования для роботизированной сварки в несколько раз дороже оборудования для сварки с участием человека. Проблема экономической эффективности роботизации почти в каждом случае довольно остра, особенно если оплата труда составляет небольшую долю стоимости сварочной операции, а высокое качество сварных швов не является главным требованием заказчика.

Роботы чаще всего применяют при объеме выпуска от 1000 до 60000 одинаковых изделий в год, т. е. в условиях серийного и крупносерийного производства конструкций небольших и средних габаритов. При этом роботами целесообразно сваривать в первую очередь корпусные, рамные, решетчатые конструкции и сварные детали машин со швами любой формы, любым образом ориентированные один относительно другого.

Согласно [50] применение роботов для автоматизации процессов дуговой сварки целесообразно при одновременном выполнении следующих условий:

- изделие выпускают мелкими и средними партиями, а его конструкция по мере выпуска претерпевает некоторые изменения;
- швы сварных соединений конструкций сложной формы либо короткие и различным образом ориентированы в пространстве;
- к швам сварных соединений предъявляют повышенные требования стабильности качества (от изделия к изделию), с минимальным влиянием на последнее «человеческого фактора»;



- разработка, изготовление и обслуживание специального сварочного автомата дорожке применения серийно выпускаемого промышленного робота;
- предельные отклонения размеров свариваемых деталей конструкции не превышают допустимых (при применении роботов, функционирующих по жесткой программе);
- высокая культура заготовительного и сварочного производства, наличие на предприятии соответствующих ремонтных служб по наладке и ремонту робототехнологических комплексов;
- создание на предприятии благоприятных (как в моральном, так и в материальном отношении) условий для обслуживающего робот персонала, стимулирования бесперебойности работы робототехнологического комплекса.

Существенного преимущества роботизации дуговой сварки можно достичь, если придерживаться следующих рекомендаций [51]:

- использовать наиболее производительные технологии дуговой сварки;
- выбирать максимальные скорости и ускорения для холостых (маршевых) перемещений сварочного инструмента и изделия;
- сваривать изделие одновременно несколькими роботами и (или) инструментами, а также одновременно несколько изделий, т. е. концентрировать в пространстве и времени несколько операций или их частей;
- применять серийно изготавливаемые, высоконадежные средства робототехники и создавать роботизированные комплексы на модульной основе;
- применять роботы не в виде отдельных островков роботизации, а концентрированно, группами, что обеспечит более полную загрузку и глубокую специализацию обслуживающего персонала и операторов;
- стремиться к комплексной роботизации производства сварных конструкций, что в наиболее полном виде может быть реализовано путем создания гибких производственных систем.

Как показывает практика, успешное проведение работ по роботизации дуговой сварки возможно на основе реализации принципов организационно-технологического проектирования (ОТП) роботизированных комплексов для дуговой сварки, предполагающих одновременное рассмотрение различных аспектов создания робототехнологических комплексов и выполнение следующих работ [52, 53]:

- адаптацию конструкции изделия для роботизированной сварки;

- разработку нескольких альтернативных вариантов технологического процесса сборки и сварки изделия;
- выбор и обоснование схем базирования сборочных единиц;
- выбор компоновки робототехнологического комплекса;
- оценку возможности качественной сборки и получения сварных соединений, отвечающих требованиям технической документации;
- выбор приемов, уменьшающих сварочные деформации до уровня, обеспечивающего получение качественных соединений и требуемой точности изделия;
- оценку производительности комплекса и себестоимости изделия;
- обоснование системы технического обслуживания комплекса;
- выбор наилучшего из рассмотренных вариантов.

Алгоритм процесса организационно-технологического проектирования комплекса (ОТП) показан на *рис. 34* [52].

Инструментами, необходимыми для многократного решения проблем, возникающих на разных стадиях создания робототехнологического комплекса, являются модели оценки качества сварных соединений (модель 1), производительности комплекса (модель 2) и себестоимости изготовления изделия.

К основным техническим аспектам процесса организационно-технологического проектирования относят следующие [52]:

1. Рациональное расчленение конструкции на технологические сборочные единицы, обеспечивающие:

- доступность и досягаемость горелкой сварных швов;
- возможность поэтапной сборки изделия способом последовательного наращивания;
- требуемое количество сварных соединений и конструкции в целом;
- рациональную последовательность выполнения сварных швов;
- возможность снижения объема наплавленного металла, не вызывающего в целом искажения формы конструкции;
- возможность сварки без кантовки в удобном для сварки положении;
- возможность сварки в напряженном состоянии, при котором происходит уменьшение остаточных сварных напряжений.

2. Назначение системы базирования собираемых элементов, обеспечивающей максимальную точность расположения свариваемых кромок, а именно:

- введение дополнительных баз при сборке длинномерных жестких деталей или деталей с большим разбросом размеров и формы;
- оптимальное расположение баз и возможность их регулирования в направлении, компенсирующем сварочные деформации;

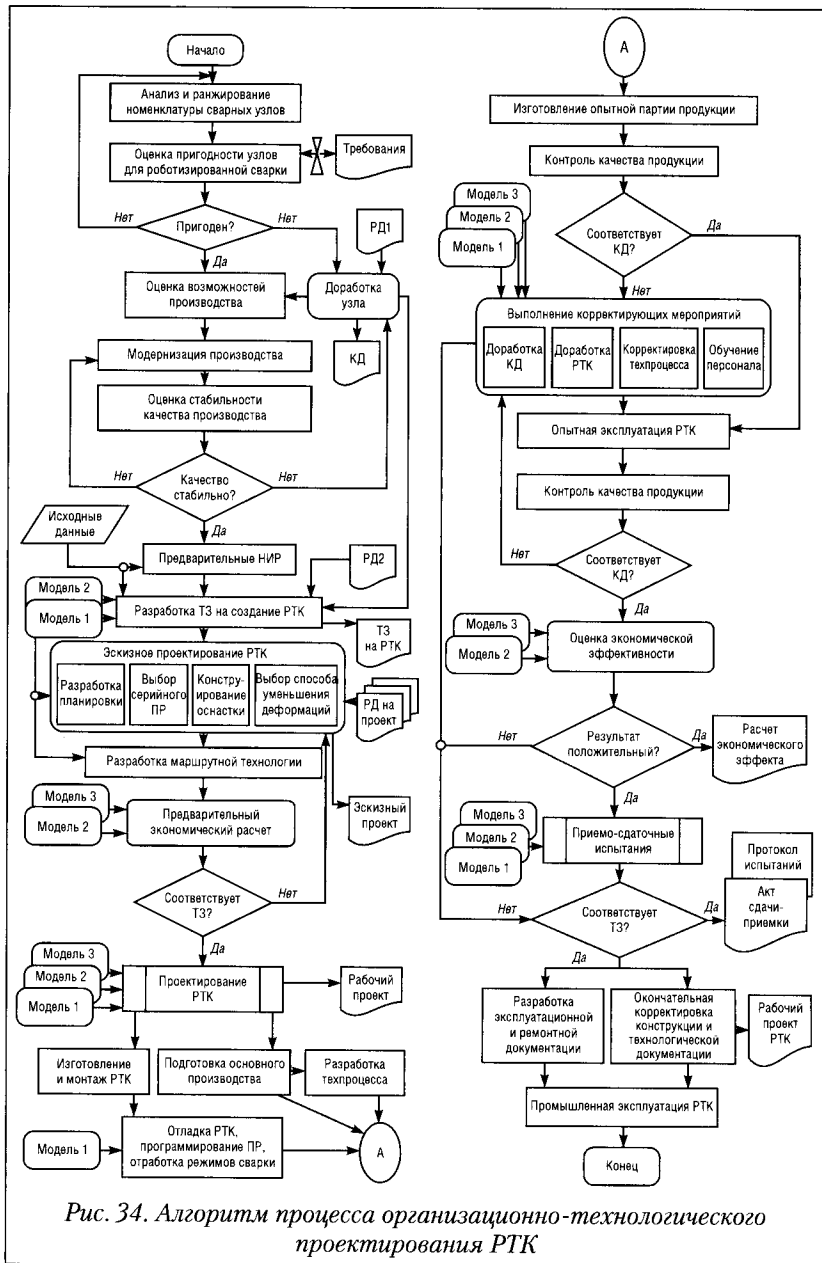


Рис. 34. Алгоритм процесса организационно-технологического проектирования РТК

- уменьшение при базировании количества деталей, определяющих размеры и форму изделия;
- назначение базовых поверхностей оснастки, совпадающих с базовыми поверхностями деталей;
- придание нежестким элементам конструкции требуемой формы в сборочно-сварочной оснастке путем их закрепления в жестком приспособлении;
- использование приема так называемой установки деталей, обеспечивающего точное расположение стыка в пространстве и оптимальную величину зазора в стыке;
- использование приема смены баз, устраняющего влияние временных и остаточных деформаций на качество сварных соединений;
- использование соединений и установочных элементов типа пазов, отверстий и выступов, обеспечивающих самоустановку собираемых деталей, их надежную и стабильную фиксацию друг относительно друга.

3. Использование приемов конструирования сварных соединений, позволяющих минимизировать и рационально распределить объем наплавленного металла с целью уменьшения деформаций, а именно:

- учет фактической глубины проплавления, равной катету шва, при расчете прочности тавровых и нахлесточных соединений, выполняемых тонкой электродной проволокой (диаметром 1,0 или 1,2 мм) на повышенных плотностях тока;
- выполнение сварных угловых швов расчетных размеров с минусовыми допусками;
- назначение переменных, минимально необходимых объемов наплавленного металла по длине швов с учетом характера распределения напряжений в соединениях;
- назначение типов сварных соединений, обеспечивающих максимальную технологичность их выполнения при роботизированной сварке;
- замена в тавровых соединениях двухсторонних угловых швов на односторонние при условии полного проплавления стенки, что уменьшает объем наплавленного металла, трудоемкость изготовления и существенно упрощает конструкцию сборочно-сварочной оснастки;
- замена нахлесточных и тавровых соединений с двухсторонними угловыми швами на прорезные или проплавные с целью уменьшения угловых деформаций и трудоемкости изготовления;

- замена нахлесточных соединений с двумя лобовыми швами на соединения с одним прорезным и одним лобовым швами с их выполнением в последовательности, обеспечивающей сварку с одной стороны, повышение прочности и уменьшение деформаций;
- использование при сварке стыковых швов поперечных колебаний электрода с целью снижения требований к точности его позиционирования;
- проектирование конструкций с уравниванием сил и моментов, создаваемых укладкой швов;
- назначение размеров заготовок с учетом последующей сварочной усадки;
- проектирование с учетом возможности правки конструкции (узла) после сварки.

4. Использование технологических приемов, уменьшающих сварочные деформации, а именно:

- назначение режимов сварки с минимальной погонной энергией;
- использование жесткой сборочной оснастки;
- смещение швов на толстостенные, жесткие элементы в соединениях деталей разной толщины;
- предварительное пластическое деформирование деталей, создающее перемещения, противоположные ожидаемым при сварке;
- принудительное охлаждение сварных соединений, уменьшающее зону пластических деформаций;
- сборка с учетом возможных сварочных деформаций;
- создание в зоне сварки напряжений, обратных сварочным по величине и знаку;
- приложение к изделию активных сил, вызывающих в элементах конструкции деформации, обратные сварочным;
- сварка тавровых соединений «на спуск» или в симметричную лодочку, позволяющая получать нормальные или вогнутые швы;
- сварка в несимметричную лодочку, позволяющая регулировать соотношения катетов и получать наибольшую глубину проплавления, совпадающую с расчетным сечением шва.

В качестве примера использования принципов организационно-технологического проектирования и приемов уменьшения влияния сварочных деформаций на точность тонкостенной сварной конструкции в [52] приведена разработка сварочного участка для изготовления барабанов роторной жатки ЖР-3500 комбайна «Дон-680» с помощью неадаптивных дуговых роботов.

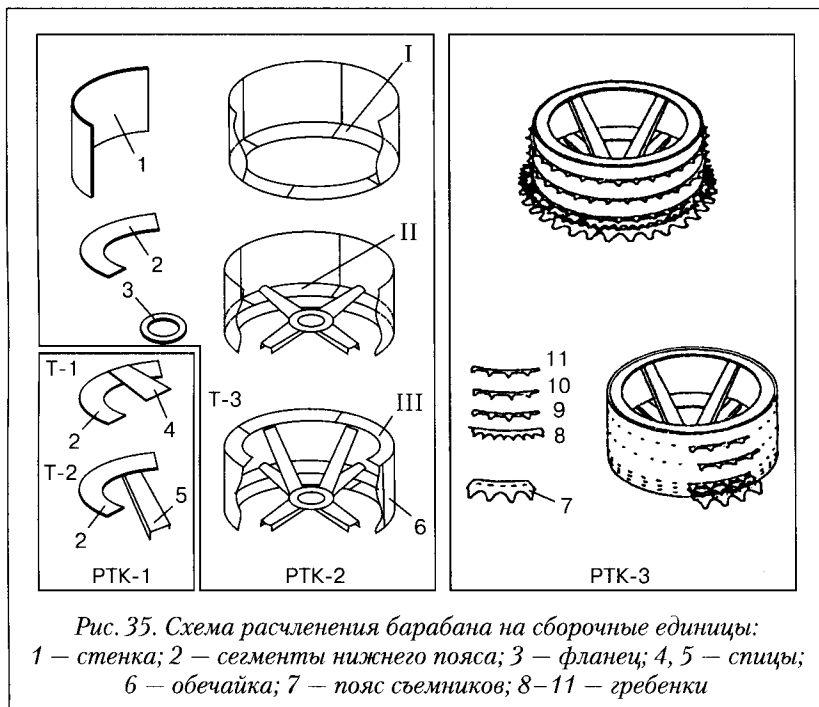


Рис. 35. Схема расчленения барабана на сборочные единицы: 1 – стенка; 2 – сегменты нижнего пояса; 3 – фланец; 4, 5 – спицы; 6 – обечайка; 7 – пояс съёмников; 8–11 – гребенки

При изготовлении одного барабана диаметром 1800 мм выполняют 356 коротких швов общей длиной 21 м (наплавляется 3,8 кг сварочной проволоки). К геометрии барабана предъявляют жесткие требования: радиальное и торцевое биение после сварки не должно превышать 2 мм.

В результате технологической проработки барабан расчленили на три технологических узла (рис. 35).

Барабан изготовляют на трех роботизированных сборочно-сварочных комплексах РТК-1, РТК-2 и РТК-3, объединенных в технологически самостоятельный участок (рис. 36). Сварку узлов Т-1 и Т-2 выполняют на РТК-1, остов (узел Т-3) – на РТК-2, сборку и сварку барабана – на РТК-3.

Согласно принятой технологии узлы Т-1 и Т-2, сваренные на РТК-1, складировать на стеллажах 1 и 2 отдельно для левого и правого барабанов. Перед сборкой остовов на РТК-2 входящие в них стенки подвергают 100%-ному контролю формы на приспособлении 3. Сваренные на РТК-2 остовы барабанов вначале попадают на

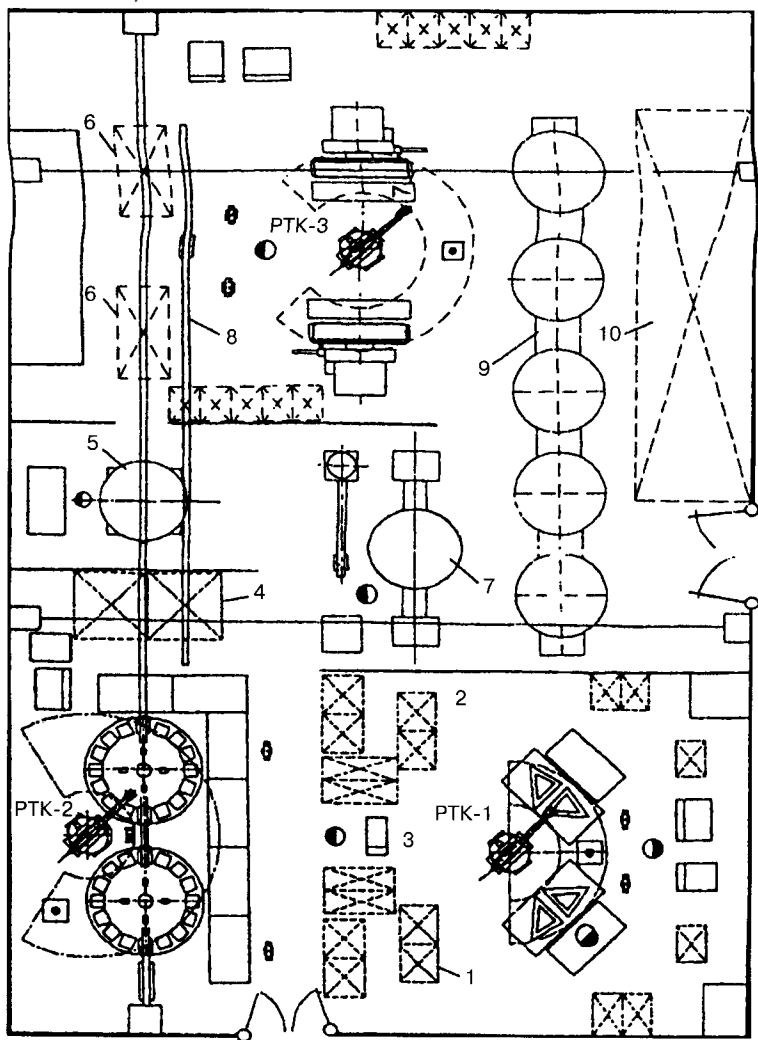


Рис. 36. Схема участка роботизированной сварки барабана жатки:  
 1, 2 – стеллажи; 3 – приспособление; 4 – стеллаж; 5 – место  
 контроля; 6 – склад для остова барабанов; 7 – место контроля;  
 8 – конвейер; 9 – конвейер; 10 – склад готовой продукции

стеллаж 4, а затем поступают на позицию 5, где контролируют их торцевое и радиальное биение. С помощью тельфера 8 со склада 6 остовы барабанов передают на РТК-3, где производят окончательную сварку барабанов. Каждый сваренный барабан поступает к месту контроля 7, где за один оборот барабана в автоматическом режиме измеряют радиальное и торцевое биение зубьев относительно фланца, на который устанавливается барабан в составе жатки. На этом же рабочем месте контролируют сварные соединения и при необходимости с помощью полуавтомата подваривают швы. После контроля барабаны с помощью конвейера 9 передают на склад готовой продукции 10.

На РТК-1 приспособления размещены попарно на двух столах, которые обслуживает сварочный робот типа IR-161/15. Каждое рабочее место имеет отдельный пульт управления. Оператор РТК и робот поочередно собирают пару узлов Т-1 и Т-2 на разных рабочих столах. Для уменьшения деформаций, изменяющих радиус сегментов, к ним прикладывают активную растягивающую нагрузку.

Проектная точность при изготовлении барабана реализуется в основном на РТК-2. Примененная схема базирования (рис. 37) и сборочно-сварочный кондуктор (рис. 38) позволили обеспечить требуемую точность.

Стенки барабана 1 установлены внешней поверхностью по базам 2 управляемых постоянных магнитов 3 и 4 (см. рис. 38). Точность цилиндрической поверхности обеспечивают регулировкой этих магнитов. Базовые поверхности магнитов образуют проектную цилиндрическую поверхность. Фланец устанавливают в проектное положение на цилиндрическую оправку 6 и фиксируют с помощью четырех магнитов 5. Позиционирование остальных эле-

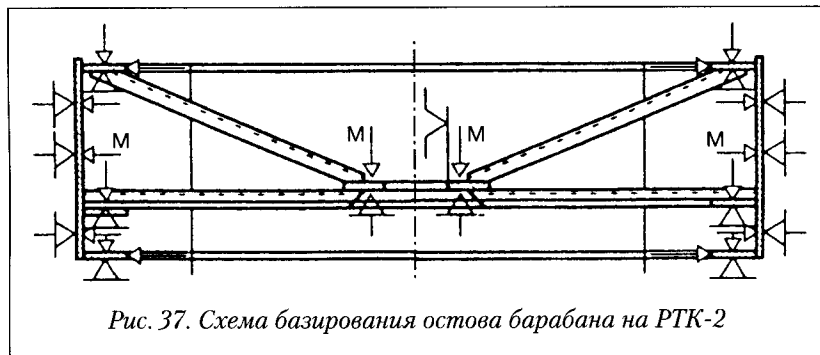


Рис. 37. Схема базирования остова барабана на РТК-2



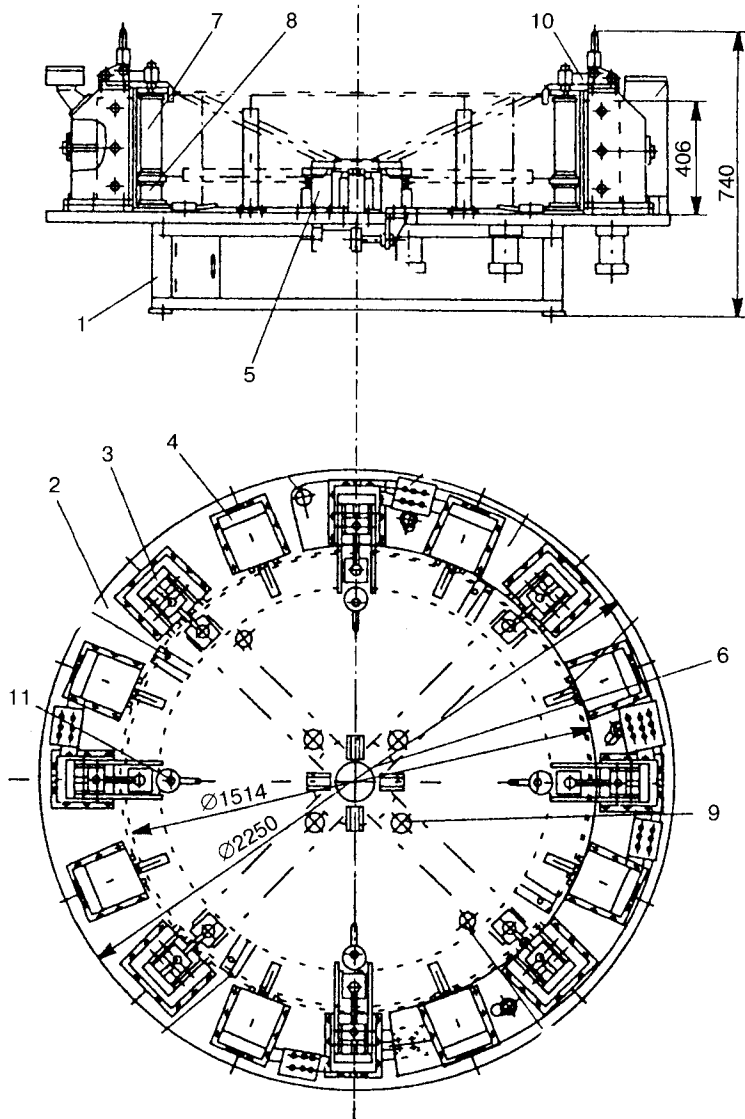


Рис. 38. Кондуктор для сборки и сварки остова барабана:  
 1 — стенка барабана; 2 — база; 3, 4, 5 — постоянные магниты;  
 7, 8, 9 — базы; 10, 11 — механические пружины

ментов остова осуществляют с помощью системы баз 7, 8, 9 и механических прижимов 10, 11.

Остов барабана изготавливают в три этапа способом последовательного наращивания, который обеспечивает свободный доступ горелки к местам сварки. На этапе I (см. рис. 35) устанавливают стенки 1, образующие обечайку 6, и сегменты 2 нижнего пояса; на этапе II — узлы Т-1 и фланец 3, на этапе III — узлы Т-2. На каждом этапе в первую очередь приваривают сегменты к стенкам. В этом случае поперечная усадка швов не вызывает отрыва стенок от магнитов. Затем сегменты сваривают между собой, что значительно уменьшает влияние усадочных сил на форму остова и положение фланца относительно стенок. В последнюю очередь сваривают нахлесточные соединения, прикрепляющие спицы 4 и связи 5 к фланцу, что практически исключает воздействие сварочных деформаций ранее сваренных швов на радиальное и торцевое биение остова барабана. Швы, соединяющие фланец со спицами, выполняют в диаметрально противоположных местах и без остановки робота. В противном случае усадка швов приводит к появлению биения остова барабана, превышающее допустимое значение. При сварке роботом выполнение назначенного порядка швов, обеспечение требуемых скорости сварки и размеров швов гарантировано, что обеспечивает стабильность качества швов и геометрию изделия. С целью повышения технологичности остова барабана угловые соединения в верхнем поясе сегментов были заменены тавровыми.

Было установлено, что в результате приведенных выше технологических мероприятий вероятность получения качественных сварных соединений фланца с узлами Т-1 и Т-2 составляет 0,99, а для остальных тавровых соединений — 0,96.

В соответствии с принятой разбивкой на технологические узлы для завершения изготовления барабана на РТК-3 к его остову Т-3 приваривают четыре пояса гребенок (см. рис. 35) 8–11 и по торцу пояс съемников 7. При этом требования к точности геометрии барабана остаются жесткими.

Схема базирования барабана в кондукторе-позиционере приведена на рис. 39, а схема его конструкции — на рис. 40. Из 150 сварных соединений две трети составляли прорезные швы, двусторонние, тавровые соединения гребенок с остовом. Уменьшив высоту выступа, входящего в прорезь стенки, удалось заменить два угловых шва на один стыковой (рис. 41). По прочности такое соединение не уступает проектному, при этом угловые деформации прак-

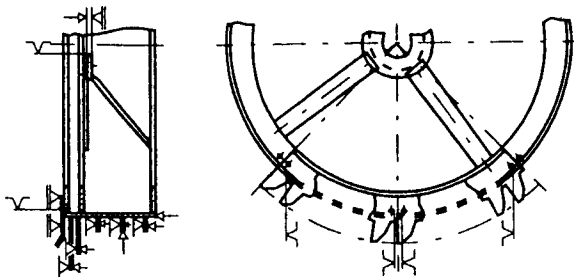


Рис. 39. Схема базирования барабана в кондукторе-позиционере на РТК-3

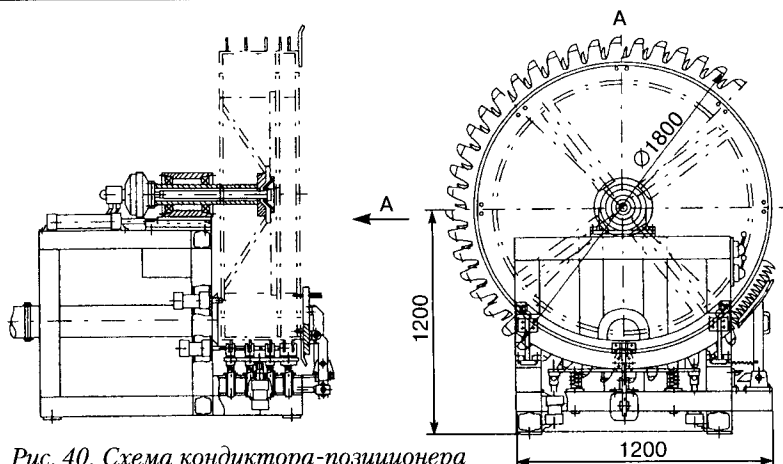


Рис. 40. Схема кондуктора-позиционера для сборки и сварки барабана

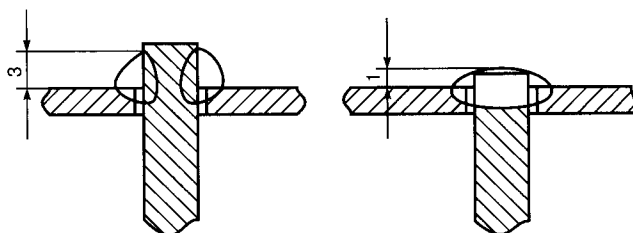


Рис. 41. Конструкция сварного соединения гребенки со стенкой барабана: а – по проекту; б – реализованная

тически отсутствуют. Расположение прорезей на четырех стенках остова идентично, поэтому сварку выполняют при четырехкратном позиционировании узла с поворотом его на 90°.

Формирование швов, расположенных на наклонных (до 40°) частях стенки, остается удовлетворительным при их сварке «на спуск». Для увеличения ширины шва и снижения требований к точности позиционирования электрода сварку выполняли с поперечными колебаниями горелки с амплитудой 3,5 мм.

Все три описанные выше РТК объединены в отдельный участок роботизированной сварки барабанов (см. рис. 36).

Накопленный многолетний опыт разработки и внедрения робототехнологических комплексов, особенно для сварки малогабаритных, крупногабаритных конструкций подтвердил эффективность использования принципов организационно-технологического проектирования [52]. Показано, что на всех стадиях разработки и внедрения комплекса следует проводить анализ технологичности изделий. Особое значение имеет расчленение изделия на технологические узлы и анализ условий, обеспечивающих качество сварных соединений.

Основными требованиями при разработке технологического оборудования и оснастки, входящих в состав робототехнологического комплекса, являются:

- обеспечение точности и стабильности позиционирования деталей, достаточных для получения качественных сварных соединений;
- реализация в оборудовании конструктивно-технологических решений, позволяющих исключить или учесть влияние временных и остаточных сварочных деформаций на обеспечение заданных пределов отклонения геометрической формы свариваемых изделий;
- возможность регулирования и надежная фиксация базовых элементов оборудования;
- обеспечение усилия прижатия деталей, достаточного для исключения влияния на точность позиционирования отклонений их формы и размеров от проектных значений;
- применение оборудования, контролирующего форму и размеры как отдельных сборочных единиц, так и готового изделия, систему обслуживания робототехнологического комплекса, позволяющую фиксировать и проводить статистическую обработку полученных результатов, а также оперативно воздействовать на систему «РТК-изделие-оператор», обеспечивая требуемое качество.

Как уже отмечалось выше, применение роботизированной дуговой сварки на постсоветском пространстве идет медленными темпами. В то же время имеется ряд положительных примеров внедрения этой технологии в России, Украине и Белоруссии. На Владимирском ПО «Точмаш» (РФ) с 1997 г. эксплуатируются робототехнологический комплекс для дуговой сварки в  $\text{CO}_2$  рамных конструкций (рис. 42) [50]. Комплекс был создан совместными усилиями специалистов фирмы «Навко-Тех» (Киев), ИЭС им. Е. О. Патона, МНТЦ «Дуга-2» (Киев), фирмы «Робекс» (Минск) и ОАО «УкрИСП» (Киев).

В состав комплекса входит промышленный робот РМ-01 с устройствами управления «Сфера-56», комплект сварочного оборудования, двухкоординатный расширитель зоны обслуживания робота, четыре однокоординатных четырехпозиционных вращателя изделия и сборочно-сварочные приспособления с пневмоприводом.

Комплект сварочного оборудования комплекса включает источник питания PS-5000, механизм FU-20 подачи проволоки, устрой-

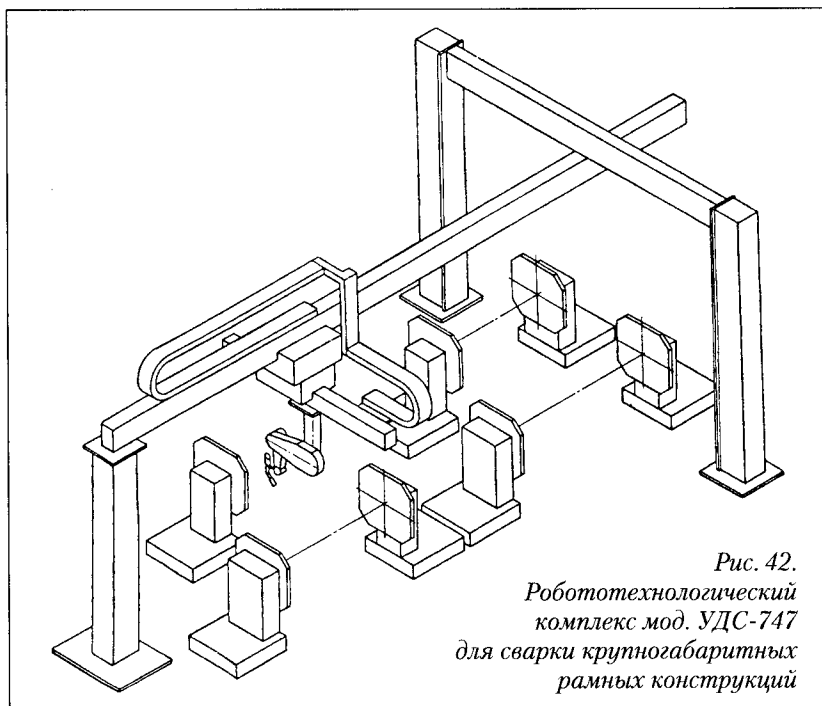


Рис. 42.  
Робототехнологический  
комплекс мод. УДС-747  
для сварки крупногабаритных  
рамных конструкций

ство WU-10 замкнутого жидкостного охлаждения горелки производства фирмы Кеpppi (Финляндия), сварочную водоохлаждаемую горелку Robo-455, устройство автоматической очистки сопла горелки, смазки его противопригарной жидкостью и удаления оплавленного участка проволоки производства фирмы «Abicog Binzel» (Германия), блок начальной (установочной) адаптации и газоаппаратуру.

### **Техническая характеристика комплекса:**

#### *Промышленный робот РМ-01:*

<i>число степеней подвижности</i> .....	6
<i>грузоподъемность, кг</i> .....	2,5
<i>погрешность перемещения, мм</i> .....	$\pm 0,1$
<i>максимальная контурная скорость, м/с</i> .....	0,5
<i>хранение информации</i> .....	ОЗУ, ГМД

#### *Сварочное оборудование:*

<i>диапазон регулирования силы сварочного тока, А</i> ..	40–500
<i>диапазон регулирования напряжения дуги, В</i> .....	14–40
<i>диапазон диаметров сварочной проволоки, мм</i> .....	1,0–1,6
<i>защитный газ</i> .....	CO <sub>2</sub> ; Ar+CO <sub>2</sub>

#### *Расширитель рабочей зоны робота:*

<i>погрешность позиционирования каретки, мм</i> .....	$\pm 0,3$
<i>скорость перемещения каретки, м/с</i> .....	До 0,2

#### *Вращатель 402М:*

<i>грузоподъемность, кг</i> .....	800
<i>габаритные размеры свариваемого изделия (с оснасткой), мм</i> .....	2600×1800×1800
<i>скорость вращения планшайбы, об/мин</i> .....	0,05–3
<i>погрешность позиционирования на диаметре 100 мм, мм</i> .....	$\pm 0,2$

Комплекс использовали для сварки рамы (рис. 43). Это изделие идеально подходит для выполнения сварки роботом, так как имеет большое количество коротких швов (30–80 мм) с катетом 3–6 мм, которые различным образом ориентированы в пространстве. Такое расположение швов делает невозможной автоматизацию процесса их сварки традиционными средствами — с помощью специализированных станков и установок.

Сварку с применением комплекса выполняют на четырех рабочих местах (см. рис. 42), где поочередно сваривают четыре подузла рамы. Окончательная сварка (несколько коротких швов соедине-

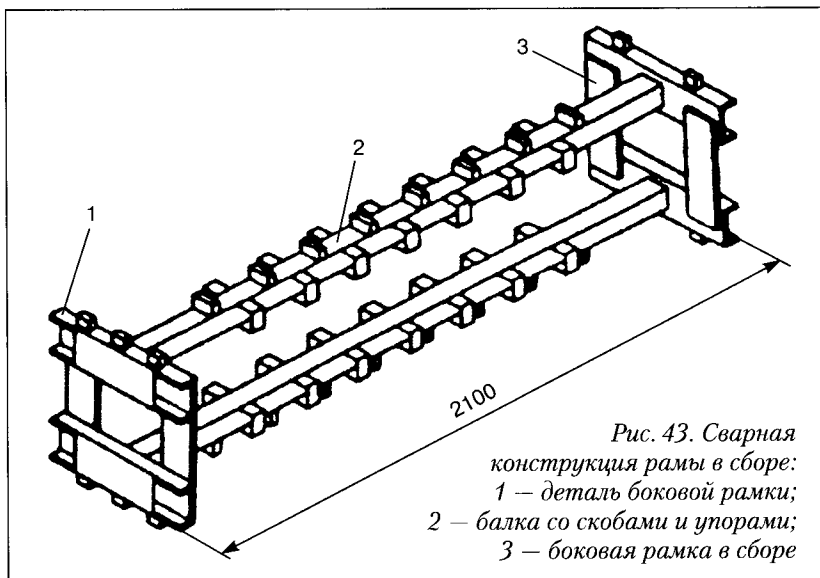
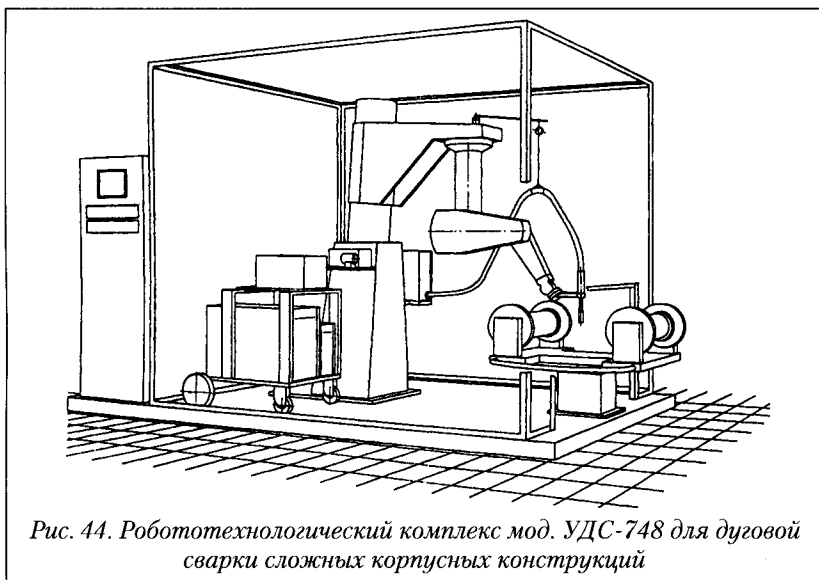


Рис. 43. Сварная конструкция рамы в сборе:  
 1 — деталь боковой рамки;  
 2 — балка со скобами и упорами;  
 3 — боковая рамка в сборе

ний боковых рамок с балками) осуществляют полуавтоматом. Общее время сварки роботом четырех подузлов рамы составляет около 40 мин.

Многолетняя эксплуатация робототехнологического комплекса подтвердила, что он работает надежно, а качество швов, сваренных роботом, значительно выше сваренных по прежней технологии полуавтоматом. Кроме того, применение роботизированной сварки позволило улучшить условия труда сварщика, а сам труд сварщика-оператора стал более интересным и престижным.

В дальнейшем на ПО «Точмаш» были внедрены еще два роботизированных комплекса. Один из них — для сварки изделия типа «корпус охладителя», другой — для сварки изделий типа «лодочка» [50]. Первое изделие — это цилиндрическая корпусная конструкция (длина в зависимости от варианта исполнения 600–700 мм, диаметр 250 мм), к наружной поверхности которой приварено много мелких деталей; второе — упорный кронштейн (250×40×30 мм). В обоих комплексах сварку выполнял робот РМ-01. Роботы установлены в потолочном положении (рис. 44). Для повышения производительности работы комплексов за счет совмещения по времени операций загрузки-выгрузки изделий с их сваркой роботом в каждом комплексе имеются по два однотипных вращателя со сбороч-



*Рис. 44. Робототехнологический комплекс мод. УДС-748 для дуговой сварки сложных корпусных конструкций*

но-сварочными приспособлениями. Смену позиций в первом комплексе осуществляют с помощью двухпозиционного поворотного стола, а во втором — за счет поочередного обслуживания роботом двух стационарно установленных вращателей. Производительность первого комплекса до 120 изделий в смену, второго — до 700.

По заказу Днепропетровского стрелочного завода фирмой «Навко-Тех» был поставлен комплекс для сварки контрольного узла железнодорожного стрелочного перевода, представляющий собой сварное соединение плоской подкладки с литой стойкой. Линия соединения этих деталей — сложная ломаная кривая. Суммарная длина шва около 1 м, катет шва 8 мм. Робот поочередно обслуживает два однокоординатных четырехпозиционных вращателя, на которых устанавливают по три изделия, собранных на прихватках. Сварку выполняют в среде углекислого газа.

Производительность комплекса до 100 изделий в смену. В комплексе предусмотрена возможность быстрой переналадки для выпуска шести типов контрольных узлов.

СП «Белфин» (г. Минск, Беларусь) создан робототехнологический комплекс для TIG-сварки металлической мебели [54]. Он включает:

- универсальный промышленный робот Kawasaki типа FA 006E FD40, имеющий сварочный интерфейс с функциями управле-



ния сварочным источником и траекторией горелки, в том числе колебательными движениями;

- аппарат фирмы Fronius для TIG-сварки с подачей присадочной проволоки;
- комплект высокоточной оснастки и дополнительного оборудования для крепления деталей и робота.

Поскольку TIG-сварка чувствительна к нестабильности длины дуги, неточной установке электрода, неправильному углу его заточки и др., в состав сварочного оборудования было включено калибровочное устройство, позволяющее быстро и с высокой точностью устанавливать электрод с заданным размером вылета относительно сопла. Создано устройство для заточки электрода под заданным углом. Были также экспериментально определены оптимальные расстояния вылета электрода для сварки с присадочной проволокой и без нее. Все эти технические решения в совокупности позволили добиться высокого качества сварных швов и повысить долговечность электрода.

Внедрение комплекса для TIG-сварки позволило:

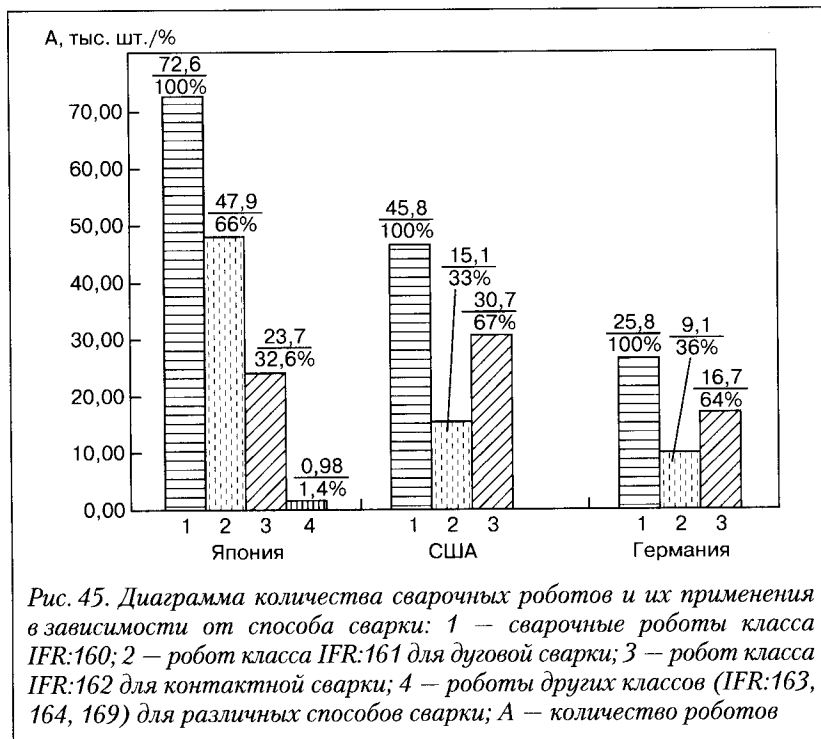
- значительно уменьшить нагрузку на высококвалифицированных сварщиков при выполнении монотонной работы и использовать их на предприятии для сварки нестандартных изделий;
- повысить в несколько раз производительность участка сварки элементов металлической мебели;
- повысить качество сварных швов;
- полностью исключить операцию зачистки сварных швов;
- снизить себестоимость изделия.

Таким образом, можно говорить о том, что роботизированная дуговая сварка, хотя и медленными темпами, но находит свою нишу и на постсоветском пространстве.

Есть основания полагать, что в Украине эта технология будет распространяться в первую очередь в сельскохозяйственном и транспортном машиностроении. Именно в этих отраслях много сварных конструкций рамного типа с короткими швами, расположенными в различных пространственных положениях, к качествам которых предъявляют высокие требования. Например, таким изделием является рама тележки вагона. Как свидетельствует зарубежный опыт, именно роботизация сварки этого изделия позволила радикально улучшить его качество и повысить производительность. В этом плане можно сослаться на фирму Carl Cloos Schweissttechnik (Германия), которая поставила для одного из заводов фирмы Sie-

ments комплект оборудования стоимостью около 4 млн евро, включающий две параллельные линии длиной 70 м, в составе которых четыре сварочных робота Romat и 20 постов для механизированной (полуавтоматической) сварки, предназначенные для сварки рам колесных тележек подвижного состава железных дорог [55]. Роботизированное изготовление продольной балки рамы осуществляют двухэлектродной сваркой плавящимся электродом в смеси газов. Система мониторинга документирует все параметры процесса сварки.

**Роботизированная контактная точечная сварка.** Согласно классификации Международной федерации робототехники (IFR) сварочные роботы (класс IFR:160) содержат два основных типа роботов: первый класс IFR:161 для электродуговой сварки и второй – IFR:162 для контактной точечной сварки. Их соотношение в промышленности различных стран заметно отличается (рис. 45) [56]. В Японии сварочные роботы преимущественно оснащены технологическим инструментом – горелками для дуговой сварки (66%),



и только 33% предназначены для контактной точечной сварки. В США и ФРГ, наоборот, в парке сварочных роботов преобладают роботы для контактной сварки (соответственно 67 и 64%), а роботы для дуговой сварки в защитных газах только несколько превышают треть их общего парка. В [56] предполагают, что такую структуру, по-видимому, определяют технологические особенности производства и определенные традиции.

В робототехнологическом комплексе для контактной точечной сварки робот перемещает либо сварочные клещи относительно изделия, либо свариваемое изделие относительно электродов стационарной сварочной машины. В первом случае, являющемся основным, конструкция сварочного оборудования зависит от принятой схемы его компоновки, во втором — в качестве сварочного оборудования обычно используют серийно выпускаемые сварочные машины. Однако второй способ встречается относительно редко.

Наиболее широко роботов для контактной точечной сварки используют в автомобильной промышленности, где сваривают листовые конструкции с толщиной листов от 0,6 до 1,2 мм со скоростью до 60 точек в минуту с силой тока во вторичной цепи не менее 4 кА и усилием сжатия электродов 3,0–3,5 кН.

Мощность сварочного трансформатора и напряжение в его вторичной обмотке зависит от полного сопротивления вторичной цепи, которое является функцией сечения и длины токоподводящих элементов во вторичной цепи, и рабочей длины и раствора электрододержателей (величина окна сварочных клещей). Конфигурация рабочей части сварочного инструмента зависит от геометрии свариваемых деталей и типа используемого робота.

Известны три варианта размещения сварочного трансформатора для точечной сварки: первый — трансформатор подвешен над роботом; второй — трансформатор подвешен на одном из звеньев робота; третий — трансформатор встроен в сварочные клещи. Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства и недостатки [47].

Использование клещей со встроенным трансформатором позволяет применять роботы широкого назначения для точечной сварки без ограничения манипуляционных возможностей робота, так как при этом тяжелые и жесткие кабели вторичного контура заменяют легкими и гибкими кабелями малого сечения первичного контура. Полное сопротивление первичного контура предельно уменьшается, что позволяет значительно снизить габаритные размеры и массу трансформатора. Клещи со встроенным трансформатором обычно

компактны. Конструкция их предусматривает возможность крепления к последнему звену робота так, чтобы центр тяжести находился ближе к осям вращения ориентирующих перемещений. Клеши со встроенным трансформатором для сварки тонколистовых конструкций имеют массу не более 50 кг, чем и определяется грузоподъемность роботов, пригодных для этого способа сварки с применением рассматриваемого сварочного инструмента. При использовании клещей со встроенным трансформатором кисть робота должна обеспечивать вращающий момент не менее 120 Н·м, что соответствует массе клещей 50 кг с расположением центра тяжести на расстоянии не более 240 мм от осей вращения ориентирующих узлов.

Для уменьшения массы клещей со встроенным трансформатором их силовые элементы делают из легких, прочных сплавов, а также разрабатывают сварочные трансформаторы с высоким отношением мощности к массе.

В последние годы широкое распространение получает оборудование для роботизированной точечной сварки с инверторными источниками тока, в которых напряжение питающей сети промышленной частоты преобразуется в напряжение повышенной частоты, а затем подается на первичную обмотку сварочного трансформатора; напряжение повышенной частоты снимается с вторичной обмотки, выпрямляется и используется для сварки. Масса и габаритные размеры высокочастотного трансформатора при той же мощности меньше, чем низкочастотного, а питание сварочного контура выпрямленным током позволяет при необходимости увеличить размер вылета электродов и раствор практически без изменения мощности.

К клещам для роботизированной точечной сварки независимо от места расположения трансформатора предъявляют повышенные требования в отношении их быстрого действия и надежности. Клеши должны обеспечивать без профилактического ремонта (даже смазки) работу в две смены в течение полугода, т. е. около 5 млн срабатываний.

Сварочные клещи должны быть снабжены устройством защиты от поломки при случайных столкновениях с изделием, сборочно-сварочной оснасткой и другими частями комплекса. По конструкции и принципу работы такие устройства аналогичны устройствам, применяемым в составе оборудования для роботизированной дуговой сварки. Кроме того, изделие и сварочный робот должны быть защищены от повреждения в случае прихватывания электродов к

металлу изделия. Даже при оптимальном выборе режима сварки такое прихватывание не исключено. По некоторым данным, возможно одно прихватывание на 150 тыс. точек. Для защиты от поломок при прихватывании электродов можно использовать устройство для защиты от столкновений. Однако более эффективными являются оснащение клещей датчиками и использование специальной программы (вращение роботом клещей вокруг оси электрода).

В первом случае в клещи встраивают датчики исходного положения электродов, датчики раскрытия (разведения) электродов для рабочего хода и датчики сжатия электродов. При наличии этих датчиков контролируется весь цикл работы механизма клещей. Если электроды не расходятся после сварки очередной точки, например, в результате их прихватывания, операция сварки данного изделия прерывается и подается сигнал о неисправности. Во втором случае, если после выполнения указанной программы электроды не разводятся, робот останавливается.

Программу вращения роботом клещей вокруг точки сварки используют также для зачистки электродов о металл изделия, что особенно важно при сварке только что зачищенными электродами, когда вероятность их прихватывания к изделию выше.

Применяют также устройства для механической зачистки электродов. Такое устройство устанавливают у границы рабочей зоны, робот по программе в определенные моменты цикла подводит клещи в положение для зачистки и включает зачистное устройство.

Устройство управления оборудованием для роботизированной точечной сварки может быть автономным или интегрированным с системой управления роботом, когда в общей программе задаются как перемещения, так и параметры режима сварки.

В автомобильной промышленности обычно используют универсальные роботы для КТС с пятью-шестью степенями подвижности. Такие же роботы используют для сварки других изделий с часто меняющейся номенклатурой. При изготовлении корпусов шкафов для одежды с размерами от 300×300×200 до 2200×1200×650 мм фирма-изготовитель должна была менять 30–40 моделей за неделю, причем контактную точечную сварку требовалось выполнять с одной установки. Для решения этой задачи фирма TSR (Италия) создала комплект оборудования, в который входят два рабочих стола, которые обслуживает шестиосный робот, причем после загрузки каждый стол работает в автономном режиме, и вместе они выдают два различных корпуса. Робот оснащен шестью автоматически

**Таблица 48. Технические характеристики двухкоординатных роботов для контактной точечной сварки**

Параметр	Модель манипулятора						
	129А	129А-01	129А-02	130А	131А	135А	138А
Источник питания	инверторного типа			ТК-401			
Продольный ход, мм	2000	4000	6300	2500	4500*	1600	1000
Поперечный ход, мм	1200			700			
Скорость перемещения, м/с	0,8						
Точность позиционирования, мм	±1,0						
Наибольший полезный вылет электродов, мм	1000			600			
Наибольшая толщина свариваемых деталей, мм	3,0+3,0			2,0+2,0			
* Манипулятор двухкареточный с продольным ходом 2×2250 мм.							

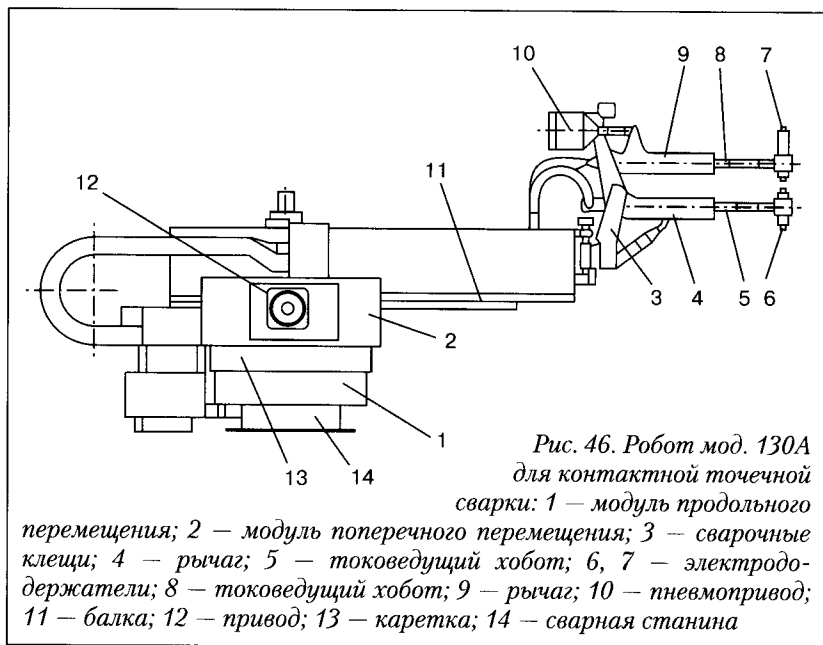
сменяемыми сварочными клещами, которые питаются от инверторного источника.

В то же время для сварки изделий относительно простой формы и при смене номенклатуры не чаще одного раза в неделю используют роботы модульной конструкции с двумя-тремя степенями подвижности [57]. Эти роботы имеют более низкую стоимость, их эксплуатация и ремонт проще.

В ОАО «УкрИСП» создана гамма двух- и трехкоординатных роботов, в которых источником сварочного тока служат трансформаторы ТК-401 или источники инверторного типа. Технические характеристики двухкоординатных роботов приведены в табл. 48.

Основными составляющими (рис. 46) робота мод. 130А являются модули продольного 1 и поперечного 2 перемещения, имеющие аналогичную конструкцию. Первый имеет сварную станину 14, по направляющим которой перемещается (со скоростью до 1 м/с) каретка 13 из алюминиевого сплава. На каретке расположен привод перемещения 12 с электродвигателем постоянного тока (с тормозом, тахогенератором и датчиком положения), редуктором и передачей «шестерня–гайка».

Модуль продольного перемещения также имеет бесконтактные датчики исходного положения и аварийного ограничения величини



ны хода каретки. Конструкция модуля позволяет увеличивать длину хода каретки путем наращивания станины.

Модуль поперечного перемещения установлен на каретке модуля продольного перемещения. На первом имеются специальные элементы для установки и фиксации коммуникаций, которые проходят через всю конструкцию робота.

Пневмооборудование робота расположено на балке 11 модуля поперечного перемещения и закрыто кожухом. В состав пневмооборудования входят воздухораспределители, которые обеспечивают работу сварочных клещей 3 (управляя рабочим ходом электродов и их дополнительным раскрытием), и управляемый вентиль, через который для профилактики продуваются каналы охлаждения сварочного оборудования.

Сварочный трансформатор расположен в передней части балки модуля поперечного перемещения, где на регулируемом суппорте также расположены сварочные клещи. Трансформатор связан с клещами токоведущими шинами и кабелями. Регулятор контактной сварки и тиристорный контактор расположены соответственно в стойке программного управления и силовом шкафу.

На кронштейне сварочных клещей установлены два рычага с закрепленными в них токоведущими хоботами 5, 8 и электрододержателями 6, 7. На рычагах 4, 9 смонтирован пневмопривод 10 сжатия электродов, обеспечивающий их перемещение: малый ход — при переходе от точки к точке и большой ход — при обходе конструктивных элементов свариваемого изделия или устройства для сборки и фиксации. Конструкция клещей обеспечивает равномерное давление электродов на изделие и исключает его деформацию. Благодаря близкому расположению пневмооборудования робота от клещей возможно быстрое создание давления и выполнение сварки с производительностью 25–60 точек в минуту.

Для контроля положения электродов служат бесконтактные датчики. Предусмотрено совместное охлаждение токоведущих элементов клещей и сварочного трансформатора. При этом контроль количества воды, проходящей через трансформатор и клещи, осуществляется отдельно.

Система управления роботом выполнена на базе микропроцессорного устройства модели К-524 цифровой индикации, программируемого контроллера и тиристорного привода. Устройство цифровой индикации обеспечивает ввод, запоминание и контроль до 99 кадров управляющей программы в режиме «ввод-вывод» и индикацию данного режима. Кроме того, оно позволяет программировать повторение части программы путем формирования блок-кадра, включающего номера начального и последнего кадров программы, а также числа повторений программы.

Устройство цифровой индикации управляет работой робота путем покадровой отработки управляющей программы, выдачи команд направления и величины перемещений, технологических команд, команд снижения скорости и останова, индикации данного режима и звукового сопровождения выдачи команды останова. Модель К-524 проста в обслуживании и не требует специальных навыков программирования. Программирование выполняют по предварительно разработанной схеме последовательного перемещения сварочных электродов и обрабатываемого изделия.

Данную схему разрабатывают на основании технологической проработки чертежа сварной конструкции. Время создания программы от 0,5 до 2 ч в зависимости от сложности конструкции. Время ввода программы занимает 10–15 мин. Устройство цифровой индикации хранит информацию, записанную в энергонезависимую память, в течение не менее 96 ч после отключения электропитания.



Система управления обеспечивает функционирование робота в следующих режимах: «Линия» — предполагает обмен командами с электрооборудованием, установленным вне робота; «Автономный» — осуществляется роботом без внешних устройств и механизмов, влияющих на рабочий цикл; «Наладочный» — предназначен для опробования работы всех механизмов, установки схемы в исходное положение и привязки робота к исходному положению по координатам. В конструкции робота и системы управления предусмотрена установка дополнительных вспомогательных модулей для поворота или вертикального перемещения клещей.

Робот мод. 129А выполнен на основе модулей продольного 1 (рис. 47) и поперечного 8 перемещения, использованных в конструкции робота мод. 130А. Основное их различие заключается в конструкции сварочного оборудования, включая сварочные клещи. Применение инверторного источника питания сварочного тока позволило существенно улучшить основные технические характеристики. Габаритные размеры и масса трансформатора в несколько раз меньше, чем трансформатора ТК-401, а энергетические показатели выше.

Сварочные клещи выполнены в виде полускобы 7 и балки 2 модуля поперечного перемещения. На торцах полускобы и балки расположены кронштейны 3, 6 с приводами 4, 5 электродов, управление которыми осуществляется индивидуально. Одновременное срабатывание электродов происходит только при сжатии и сварке

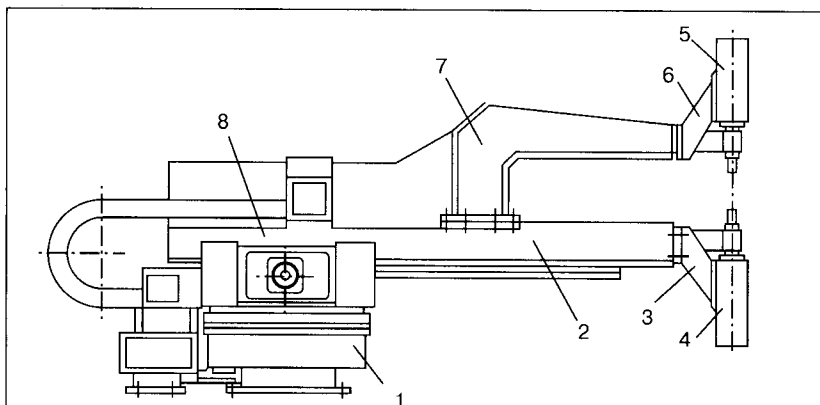


Рис. 47. Робот мод. 129А для контактной точечной сварки:  
1 — продольный модуль; 2 — балка; 3 — кронштейн; 4, 5 — приводы электродов; 6 — кронштейн; 7 — полускоба; 8 — поперечный модуль

изделия. Каждое их положение контролируют бесконтактные датчики, а скорость перемещения регулируют пневмодроссели.

В приведенной конструкции сварочного оборудования вылет электродов достигает 1000 мм без увеличения габаритов робота, что важно для компоновки комплексов и автоматических линий на базе двухкоординатных роботов.

Модульный принцип, положенный в основу конструкции двухкоординатных роботов для контактной точечной сварки, позволяет создавать различные модификации, отличающиеся друг от друга величиной перемещения по координатам, конструкцией сварочных клещей, наличием дополнительных модулей вертикального перемещения и поворота клещей, количеством исполнительных органов и другими элементами, наличие которых зависит от конструкции свариваемого изделия.

Приведенные выше роботы, используемые для перемещения сварочных клещей, являются только частью оборудования, необходимого для выполнения роботизированной контактной сварки. Полностью задачу возможно реализовать с помощью робототехнологических комплексов и автоматизированных линий.

При выборе компоновок и конструктивных решений робототехнологических комплексов необходимо учитывать ряд факторов: габариты, массу, точность и расположение точек свариваемых конструкций; производительность и гибкость комплекса; экономические факторы.

Сварные конструкции, рекомендуемые для обработки роботами с малым числом степеней подвижности, можно условно разделить на три группы в зависимости от их формы, размеров и расположения сварных швов.

Первая группа — крупногабаритные каркасно-листовые конструкции (стенки автофургонов, борта грузовых автомобилей и т. д.). Они состоят из каркаса, изготовленного с помощью дуговой сварки элементов гнутого профиля или квадратной трубы (толщиной 1–3 мм), и обшивки из холоднокатаного листового металлопроката (толщиной 1–2 мм), которая приваривается контактной точечной сваркой. Сварные швы прямолинейные. Они располагаются в одной плоскости, как правило, параллельно или перпендикулярно относительно друг друга. Типовой представитель этой группы — борт прицепа (рис. 48).

Вторая группа — плоскостные конструкции, состоящие из гнутых или штампованных деталей и листов с элементами насыщения

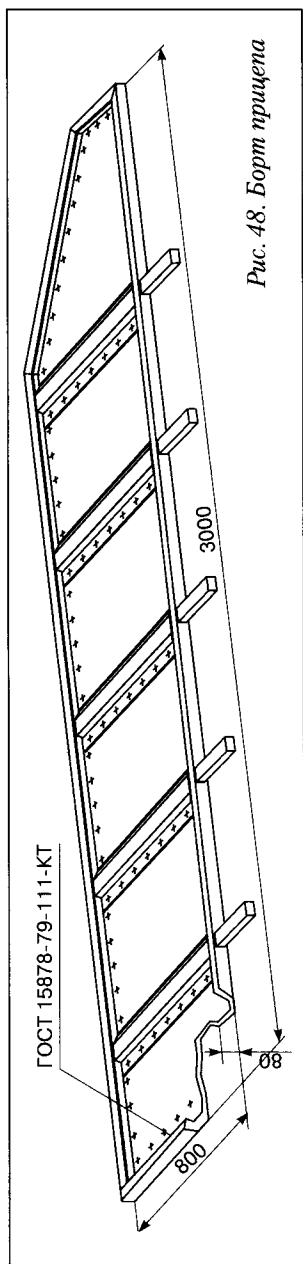


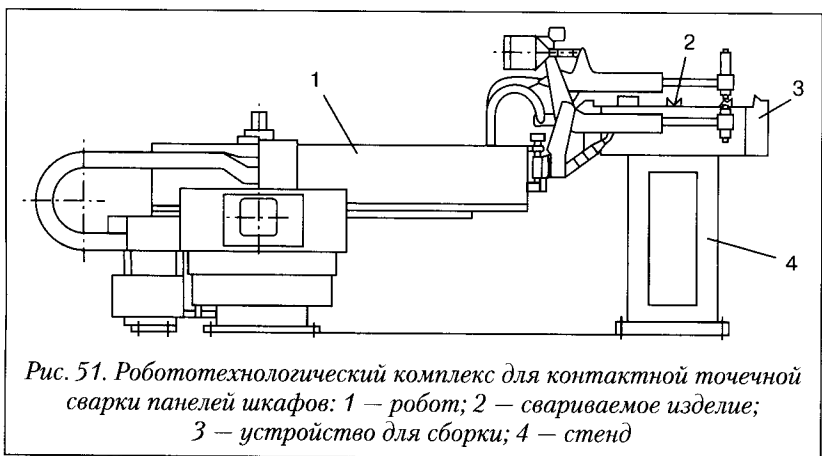
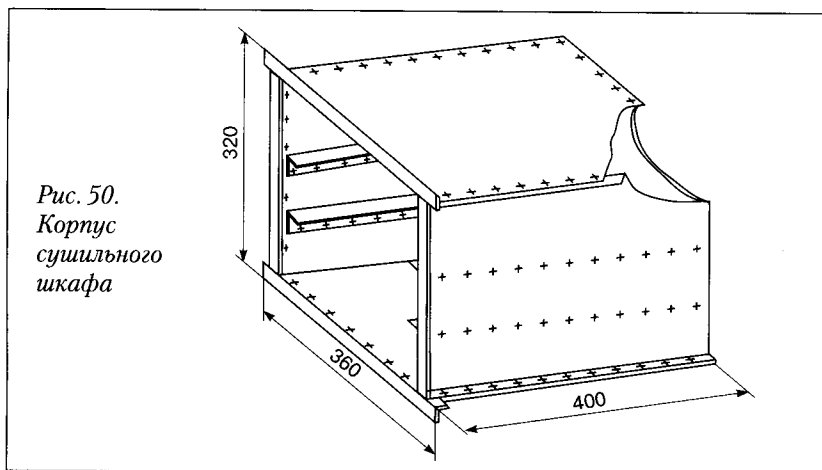
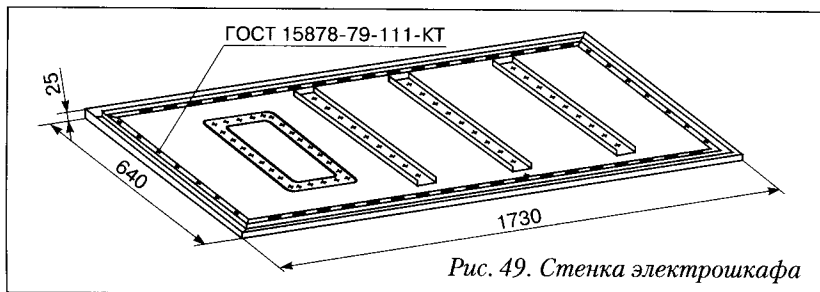
Рис. 48. Борт прицепа

(двери и стенки электрошкафов, элементы пультов и т. д.). Толщина свариваемых деталей конструкций этой группы — 0,8–2 мм. Сварные швы могут располагаться на нескольких параллельных уровнях, отстоящих друг от друга не более чем на 250 мм. Число сварных точек на одной конструкции 20–200 шт. Типовым представителем этой группы может служить стенка электрошкафа (рис. 49).

Третья группа — объемно-листовые сварные конструкции коробчатого типа, состоящие из гнутых элементов металлопроката толщиной 0,6–1,6 мм с деталями насыщения (корпус стиральной машины, холодильника, сушильного шкафа и др.). В конструкциях этой группы сварные швы располагаются в трех и более плоскостях. В качестве типового представителя этой группы можно выделить корпус сушильного шкафа (рис. 50).

Для сварки конструкций каждой из групп рекомендуется свой тип робототехнологического комплекса. Так, сварку элементов насыщения панелей шкафов электрооборудования при объеме производства свыше 5 тыс. шт. в год целесообразно выполнять комплексом, в состав которого входит двухкоординатный робот мод. 130А для контактной точечной сварки и кондуктор для сборки и фиксации изделия (рис. 51). Конструкция кондуктора позволяет производить сборку и сварку широкой номенклатуры однородных изделий. Такой комплекс внедрен на Киевском ПО «Реле и автоматика».

Внедрение роботизированной контактной сварки при изготовлении электрошкафов позволило в 1,7–2 раза уве-



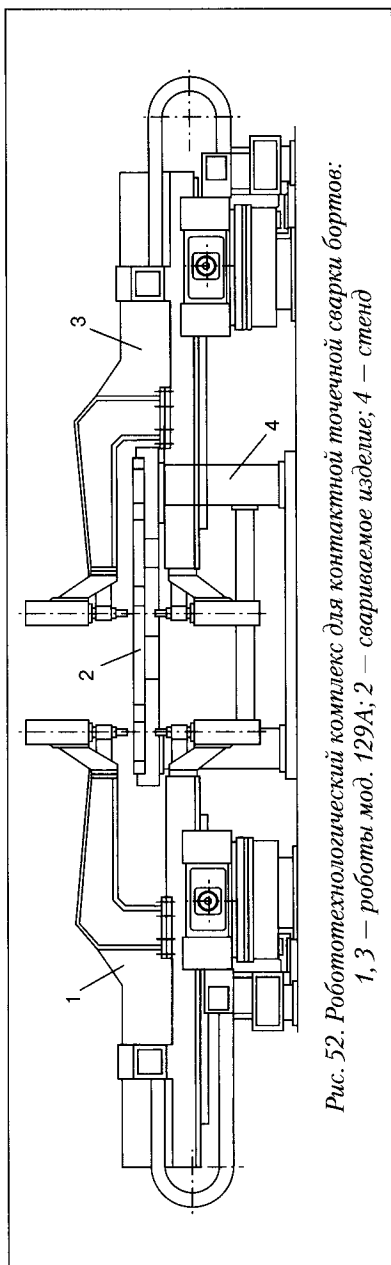


Рис. 52. Робототехнологический комплекс для контактной точечной сварки бортов:  
1, 3 — роботы мод. 129А; 2 — свариваемое изделие; 4 — стена

личить производительность сварочных работ, исключить ручной труд при сварке, повысить качество сварных соединений и полностью исключить операции ручной зачистки и шпаклевки швов с лицевой стороны панелей электрошкафов.

Робототехнологический комплекс, внедренный на Сосновоборском машиностроительном заводе (Российская Федерация), предназначен для контактной точечной сварки бортов кормораздатчиков. Он состоит из двух двухкоординатных роботов мод. 129А, укомплектованных сварочным оборудованием на базе инверторного источника питания, а также стационарно установленного кондуктора (рис. 52). Конструкция комплекса позволяет производить сварку борта, состоящего из деталей различной толщины, на режимах, отличающихся силой тока и временем. Внедрение роботизированной контактной сварки бортов взамен механизированной в углекислом газе позволило снизить общую трудоемкость изготовления борта в 2,5 раза, значительно сократить долю ручного труда и расход сварочных материалов, повысить качество сварных соединений, исключить послесварочные деформации изделий и улучшить их внешний вид.

Робототехнологический комплекс для контактной точечной

сварки сушильного шкафа состоит из двухкоординатного робота мод. 138А — двухпозиционного манипулятора, каждая позиция которого имеет две координаты совместного вращения свариваемого изделия с устройством для сборки (рис. 53). Такая компоновка обеспечивает удобный доступ сварочных клещей робота ко всем свариваемым точкам изделия. Две позиции манипулятора позволяют осуществлять сборку, а также съем готового изделия параллельно со сваркой, что существенно увеличивает производительность комплекса. Управляется он единой системой, выполненной на базе двух установок цифровой индикации типа К-524.

Приведенные выше примеры разработанных робототехнологических комплексов не охватывают всего множества вариантов использования роботов модульной конструкции.

При необходимости роботы для контактной сварки могут быть оснащены контроллерами режимов процесса типа ККС-1, которые позволяют не только управлять циклом сварки, программировать различные режимы, но и осуществлять контроль и диагностику сварочного

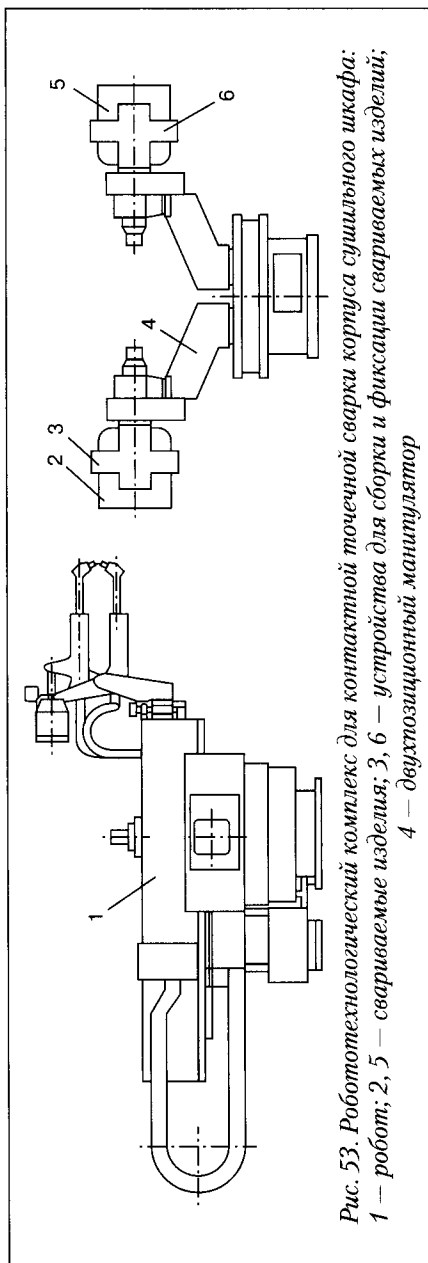


Рис. 53. Робототехнологический комплекс для контактной точечной сварки корпуса сушильного шкафа: 1 — робот; 2, 5 — свариваемые изделия; 3, 6 — устройства для сборки и фиксации свариваемых изделий; 4 — двухпозиционный манипулятор

оборудования, а также компенсировать износ электродов изменением параметров режима.

Область применения сварочных роботов с двумя-тремя степенями подвижности может быть распространена на выполнение сварки плавлением и термической резки практически без изменения механической части и системы управления. С соответствующей доработкой сварочной части их целесообразно использовать для сварки нахлесточных соединений электрозаклепками.

Существующая конструкция роботов позволяет перейти на контурную систему управления, что дает возможность вести обработку по сложным криволинейным траекториям.

## **1.5. Управление качеством сварных конструкций**

Одним из понятий управления является проверка и направление действий. Оно предусматривает сравнение фактических показателей действия со стандартом или плановыми показателями, выявление отклонений между первым и вторым значениями и принятие корректирующих мер, если отклонение является значительным. В теории управления качеством данный процесс называется циклом PDCA (Plan – Do – Check – Act), т. е. «планируй – выполняй – проверяй – действуй» [58]. Цикл PDCA является базовым элементом при построении систем управления качеством продукции.

Критерием для эффективного производства высококачественной продукции должна быть признаваемая на внешнем рынке система менеджмента качества (СМК), сертифицированная на соответствие международным стандартам ISO серии 9000.

Стандарт ISO 9001 регламентирует требования к системе менеджмента качества, и его используют при ее сертификации.

Задача СМК по ISO 9001 состоит в том, чтобы обеспечить соответствие качества продукции требованиям, заявленным изготовителем или заданным (ожидаемым) потребителем и обществом, причем предприятие заблаговременно, т. е. до заключения контракта должно определить для себя, способно ли оно это сделать. Наличие на предприятии СМК увеличивает веру потребителя в конкурентоспособность предприятия, повышает его уверенность в получении продукции, соответствующей заранее обусловленным требованиям. При этом сертификат соответствия становится рыночным аргументом в пользу указанной уверенности, если процесс создания и

сертификации СМК происходит без отклонений от духа и буквы ISO 9001 [59].

Стандарты ISO серии 9000 постоянно совершенствуются. В частности, стандарт ISO 9004 ориентирует стратегию улучшения менеджмента качества с целью непрерывного повышения эффективности СМК.

Отличительной особенностью стандартов серии ДСТУ ISO 9000–2001 является требование реализации в системе менеджмента качества как принципов «Всеобщего управления качеством» (TQM), так и процессного подхода в рамках системы управления качеством продукции [60].

В стандартах серии ISO 9000, описывающих систему управления качеством, сварку рассматривают как «специальный процесс», потому что требуемое стандартом качество сварных соединений не может быть определено только последующим (окончательным) контролем и испытаниями изготовленной продукции. Его необходимо обеспечивать в процессе изготовления с помощью обученного квалифицированного и опытного персонала, использования технически совершенного и отлаженного оборудования, тщательного исполнения предписанных производственных и организационно-технических процедур, а также скрупулезного надзора за их осуществлением.

В настоящее время в Украине создают и регистрируют системы менеджмента качества сварочного производства в соответствии с требованиями ДСТУ ISO 9001–2001.

Стандарты серии ДСТУ ISO 3834 конкретизируют требования стандартов серии ДСТУ ISO 9000 применительно к сварочному производству и вводят критерии оценки средств достижения установленного качества в систему управления производством для предприятий, выполняющих сварочно-монтажные работы (услуги).

Сертификация согласно ISO 3834 является общепринятой во многих странах мира в течение многих лет, и во многих случаях служит для получения разрешений компаниям на выполнение сварочных работ в так называемых регламентируемых областях [61].

По составу документов системы менеджмента качества (рис. 54) можно судить о ее многогранности [59]. В ней присутствуют документы, внешние требования которых обязательны для исполнения в любом случае, и внутренние требования, которые рассматривают и выполняют при сертификации, если считают, что эти требования обязательны для исполнения. Документы, в том числе касающиеся



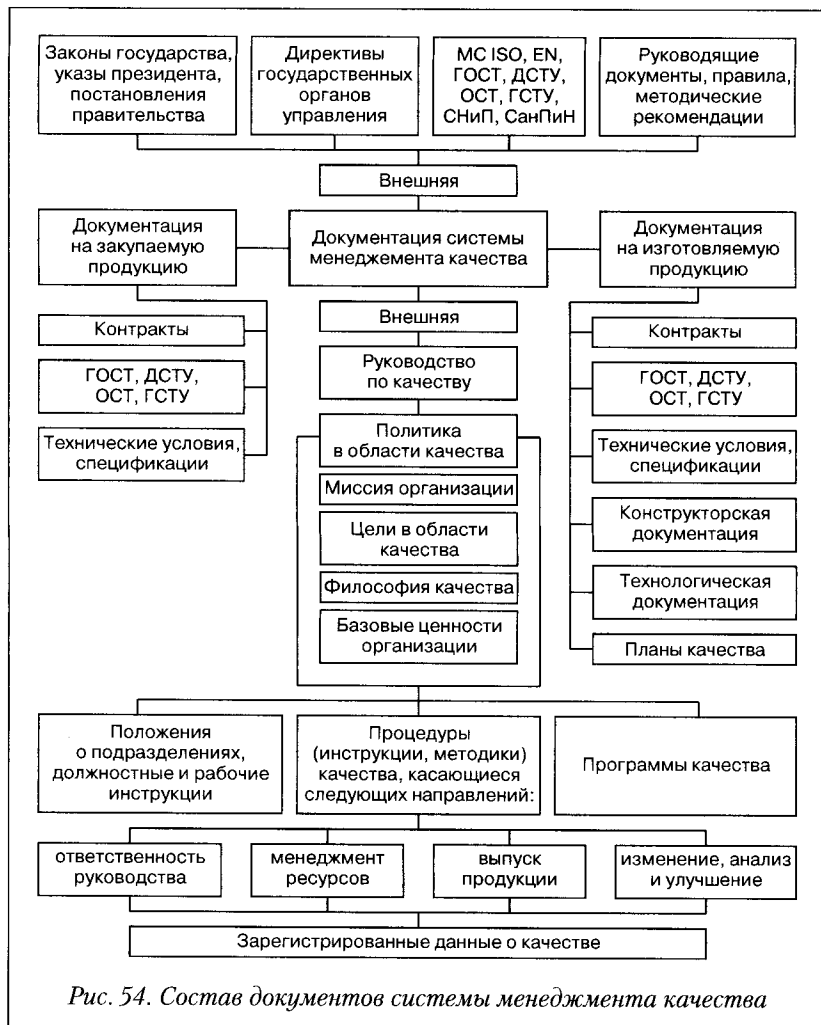


Рис. 54. Состав документов системы менеджмента качества

статистического регулирования процессов, сгруппированы по разделам стандартов и нацелены на осуществление основных их принципов. Суть основных принципов рассмотрена ниже [58, 59].

**Ориентация на потребителя.** В соответствии с этим принципом заказчик становится главным лицом в бизнесе. Для обеспечения качества важно уменьшить число дефектов и доработок, встречающихся при выполнении технологических процессов, сократить чис-

ло жалоб потребителя и количество ремонтов, выполняемых в период гарантии. Кроме того, важно гарантировать, чтобы изделия были безопасными, свободными от дефектов, пригодными для использования потребителями по назначению, по возможности простыми в эксплуатации, и чтобы необходимое послепродажное обслуживание было на высоком уровне.

Как отмечают специалисты по качеству [58], производители должны прилагать всевозможные усилия, чтобы продукция была надежной, безопасной, точно в соответствии с ее предназначением. Производители должны также проверять качество продукции в процессе ее изготовления и при необходимости улучшать качество продукции. Для этого производителю необходимо постоянно изучать и собирать информацию относительно требований потребителя, знать их скрытые желания относительно той или иной продукции, а полученную информацию использовать при работе с новой продукцией.

**Лидерство, или ведущая роль руководства фирмы.** Вовлекая персонал в выполнение работы по улучшению качества продукции, руководитель-администратор должен стать лидером в лучшем смысле этого слова. Он не разрывает этапы планирования и выполнения работ, поэтому не только составляет планы, но и вовлекает своих последователей в их реализацию. Лидерство состоит в убеждении подчиненных разделить общую цель и постараться ее выполнить. Успешный лидер убеждает людей понять цели и согласиться с предлагаемыми задачами, демонстрирует упорство и терпение при выполнении намеченных целей, направляет, развивает и поощряет подчиненных.

Среди конкретных предпосылок для лидерства выделяют следующие:

- у лидеров должна быть «мечта» (видение, идеал, стремление или конечная цель);
- лидерам необходимо иметь силу воли и надежную цель, чтобы делать все необходимое для реализации своей «мечты», включая терпение и настойчивость;
- лидерам необходимо уметь завоевывать поддержку своих последователей, поэтому «мечта» должна быть в достаточной мере осуществимой;
- лидерам следует не только уметь делать больше других, но и работать больше, чем подчиненные; они должны уметь руководить в различных ситуациях и воспитывать умелых работников;

- лидерам необходимо добиваться успеха;
- от лидера ждут дельных советов в нужный момент.

Следует подчеркнуть, что без руководителя-лидера невозможно выстроить гибкую и динамичную структуру предприятия, создать неформальные целеобразующие документы, мобилизовать и увлечь персонал на достижение успеха: чем больше персонал действует во благо предприятия, тем шире открываются перед ним перспективы.

**Вовлечение персонала в управление качеством.** Руководитель-лидер должен прежде всего уметь убеждать людей в важности осуществления поставленной цели и необходимости ее выполнения. Лучше не начинать такое убеждение с постановки конечной цели и необходимости ее достижения во что бы то ни стало. Более эффективно установить относительно легкие промежуточные цели и использовать цикл PDCA по мере того, как они постепенно выполняются, позволяя каждому работнику почувствовать радость от достигнутого совместного результата и одновременно постараться увеличить свои возможности. Чем труднее дается достижение этих целей, тем большую радость испытывают люди. Наличие трудностей подстегивает работников проявлять всю свою изобретательность для их преодоления. Такие усилия приводят к развитию творческого потенциала и в свою очередь повышают возможности работников.

Важно, чтобы высшее руководство фирмы относилось к персоналу как к самому главному своему капиталу, морально и материально поддерживая его деятельность, творческий труд, а не добивалось бы слепого повиновения и исполнения. Для этого руководство обучает, повышает квалификацию персонала, привлекает его к участию в управлении; всецело доверяя, руководство делегирует часть своих полномочий на более низкие ступени управления, при этом сохраняя за собой ответственность за результат.

**Подготовка персонала.** Квалификация и опыт персонала имеют первостепенное значение в любом производстве. Квалификация рабочих, инженерно-технических работников, руководителей сварочных работ, участвующих в изготовлении сварных конструкций, в определяющей степени влияет на качество последних.

В настоящее время наиболее острой является проблема обеспечения производства квалифицированными рабочими-сварщиками, владеющими современными технологиями сварки, наплавки и резки [62]. Существующая в Украине подготовка рабочих-сварщиков

в системе профтехобразования в большинстве случаев не удовлетворяет требованиям производства. Причины здесь кроются в слабой материально-технической базе профтехучилищ, низкой заработной плате педагогического коллектива, отсутствии у учащихся возможности практиковаться на современном оборудовании, несоответствии методики подготовки сварщиков международным стандартам.

Ощущается дефицит и в квалифицированном инженерно-техническом персонале. Как отмечают [62], кафедры сварки высших учебных заведений Украины отстают от требований современного производства. В большинстве своем выпускники вузов слабо владеют современной сварочной техникой, положениями международных стандартов и норм, имеют ограниченный практический опыт. Поэтому система обучения сварщиков в вузах нуждается в совершенствовании тем более, что практически завершился переход на двухступенчатую подготовку (бакалавр, магистр).

Выход из сложившейся ситуации видится в переходе в Украине на международную квалификационную систему подготовки персонала в сварочном производстве, разработанную Международным институтом сварки (МИС) и Европейской сварочной федерацией (ЕСФ). Указанная система пока действует в Украине наряду с национальной, а функции уполномоченного национального органа (УНО) выполняет Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ.

С целью гармонизации действующих в Европе национальных программ аттестации (сертификации) персонала ЕСФ принята Основная квалификационная схема, которая устанавливает следующие квалификационные уровни подготовки персонала сварочного производства (рис. 55) [63].

**Европейский инженер-сварщик (EWE).** Его подготовку осуществляют на базе высшего технического образования. Эта подготовка дает возможность получить всеобъемлющие практически ориентированные знания, которые соответствуют уровню дипломированного инженера.

**Европейский технолог-сварщик (EWT)** получает общие знания в области современных сварочных технологий на один уровень ниже дипломированного инженера. Соответствующий сертификат позволяет ему выполнять высококвалифицированную работу, например, в области проектирования и производства сварных конструкций, контроля качества, исследований, разработок и др.



**Европейский специалист-сварщик (EWS)** проходит курс теоретической подготовки и должен обладать высоким практическим мастерством. Он способен решать задачи в области технологии и менеджмента сварочного производства и контроля качества, а также руководить мастерами и рабочими-сварщиками.

**Европейский практик-сварщик (EWP)** является высококвалифицированным рабочим, имеющим опыт работы сварщиком и обладающим необходимыми теоретическими знаниями. Он должен уметь читать техническую документацию и быть хорошо информированным в области технологий сварочного производства.

Требования соответствия между квалификацией **Европейского сварщика (EW)** и его производственными задачами отражены в схеме обучения ЕСФ. Эта схема устанавливает три уровня квалификации сварщиков для четырех основных процессов сварки: ручной дуговой сварки (ММА), дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в инертном и активном газе (MIG/MAG), дуго-

вой сварки вольфрамовым электродом в инертном газе (TIG) и газовой сварки:

- европейский сварщик угловых швов (уровень 1);
- европейский сварщик пластин, листов (уровень 2);
- европейский сварщик труб (уровень 3).

В процессе обучения основной упор делается на приобретение практических навыков (80% учебного времени), а теоретический курс составляет около 8%.

Помимо вышеуказанных, ЕСФ разработала программы подготовки дипломированных рабочих и специалистов в различных областях сварки и родственных технологиях.

Система квалификаций МИС-ЕСФ относится к категории последипломного обучения. В связи с этим для каждой категории из утвержденных квалификаций определяют условия доступа к обучению, включающие требования к уровню образования. В разных странах требования к условиям доступа к курсам подготовки МИС-ЕСФ корректируют с учетом действующих национальных систем профессионального образования. Применительно к Украине условия доступа к обучению представлены в *табл. 49* [63].

<b>Таблица 49. Условия доступа к обучению</b>		
<b>Международный инженер-сварщик (IWE)</b>		
<i>Полный курс обучения (440 часов)</i>	<i>Сокращенный курс обучения (340 часов)</i>	<i>Короткий курс обучения (120 часов)</i>
*Диплом магистра, инженера или бакалавра (отрасли: механика, электротехника или металлургия)	*Диплом магистра, инженера или бакалавра	*Диплом магистра инженера или бакалавра, а также свидетельство о работе в течение 4-х последних лет в должности инженера-сварщика
<b>Международный технолог-сварщик (IWT)</b>		
<i>Полный курс обучения (340 часов)</i>	<i>Сокращенный курс обучения (270 часов)</i>	<i>Короткий курс обучения (100 часов)</i>
*Диплом бакалавра или техника (отрасли: механика, электротехника или металлургия)	*Диплом бакалавра или техника (младшего специалиста)	Диплом бакалавра или техника в области сварки, а также свидетельство о работе в течение 4-х последних лет в должности технолога-сварщика

**Международный специалист-сварщик (IWS)**

<i>Полный курс обучения (230 часов)</i>	<i>Сокращенный курс обучения (200 часов)</i>	<i>Короткий курс обучения (70 часов)</i>
Свидетельство о техническом образовании, а также о работе в течение 2-х последних лет на производстве	Диплом техника по сварке, а также свидетельство о работе в течение 2-х последних лет на производстве	Диплом бакалавра, техника или инструктора по сварке, а также свидетельство о работе в течение 3-х последних лет в должности, соответствующей IWS

**Международный практик-сварщик (IWP)**

<i>Полный курс обучения (146 часов)</i>	<i>Короткий курс обучения (32 часа)</i>
Свидетельство о работе сварщиком, а также о работе в течение 2-х последних лет в сварочном производстве	Свидетельство о работе сварщиком, а также о работе в течение 3-х последних лет в сварочном производстве в должности, соответствующей IWP

**Международный инспектор: сварка и сварочное производство (IWIP)**

<i>Квалификация</i>	<i>Полный курс обучения</i>	<i>Короткий курс обучения</i>
Международный инспектор полного уровня (IWI-C)	*Диплом бакалавра (отрасли: механика, электротехника или металлургия) (курс – 220 часов)	*Диплом магистра, инженера или бакалавра, а также свидетельство о работе в течение 3-х последних лет в сварочном производстве (курс – 100 часов)
Международный инспектор стандартного уровня (IWI-S)	Свидетельство о техническом образовании, а также о работе в течение 2-х последних лет на производстве (курс – 160 часов)	Диплом бакалавра или техника, а также свидетельство о работе в течение 2-х последних лет в сварочном производстве (курс – 70 часов)
Международный инспектор базового уровня (IWI-B)	Свидетельство о профессионально-техническом образовании (курс – 110 часов)	Свидетельство о работе контролером сварочных работ, а также о работе в течение 2-х последних лет в сварочном производстве (курс – 50 часов)

\* Документы, свидетельствующие о получении специальности, позволяющей работать в области сварки.

В Украине подготовку специалистов по различным программам МИС проводит пока только МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона. Однако этот центр единственный, он не в состоянии решить проблему кадрового обеспечения всего сварочного производства страны. По мнению специалистов и экспертов [62], назрела необходимость в создании аналогичных региональных центров, особенно по подготовке квалифицированных рабочих и операторов, владеющих современной сварочной техникой, отвечающей требованиям сварочного производства.

В систему нормативного обеспечения для оценки соответствия персонала, непосредственно выполняющего сварку, влияющего на ход технологического процесса и качество продукции, входят следующие стандарты: ISO серии 9606, ISO 14732, ДСТУ 2944-94 (EN 287-1), ДСТУ 2945-94 (EN 287-2). При этом стандарт ISO 9606 состоит из следующих частей под общим названием «Квалификационные испытания сварщиков. Сварка плавлением»:

Часть 1: Стали.

Часть 2: Алюминий и сплавы алюминия.

Часть 3: Медь и сплавы меди.

Часть 4: Никель и сплавы никеля.

Часть 5: Титан и сплавы титана.

Часть 6: Магний и сплавы магния.

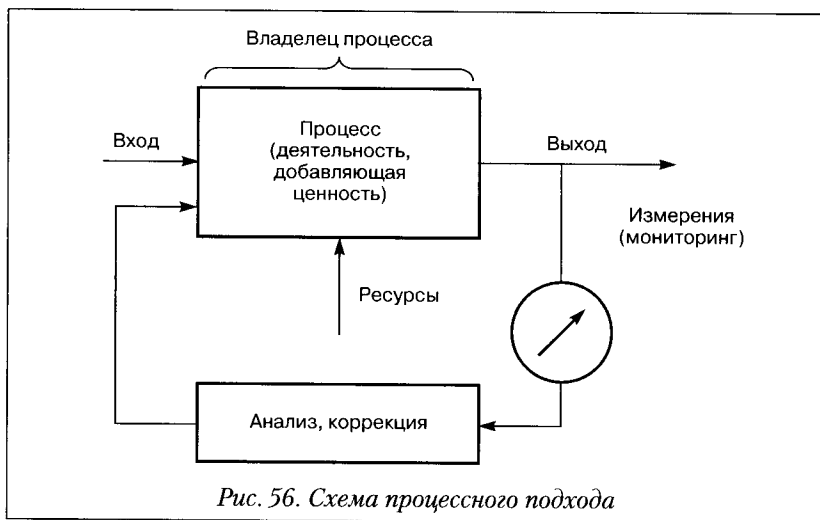
Стандарт ДСТУ ISO 14732 «Персонал сварочного производства. Испытание на подтверждение соответствия операторов сварки плавлением и наладчиков контактной сварки для полностью механизированной и автоматической сварки металлических материалов» разработан с целью внедрения в Украине международного стандарта ISO 14732.

Внедрение в Украине ISO 9606 и ISO 14732 как национальных и межгосударственных стандартов (ГОСТ) необходимо для гармонизации требований к квалификационным испытаниям сварщиков с международными требованиями. Благодаря применению этих стандартов создаются серьезные предпосылки для повышения качества и конкурентоспособности сварочного производства нашей страны [60].

**Процессный подход.** Важнейшими элементами управления качеством являются акцент на процесс, принятие решений на основе фактов и на непрерывное улучшение.

Согласно ДСТУ ISO 9001-2001, процесс — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, пре-





образующих входы и выходы. Суть процессного подхода проиллюстрирована в виде схемы на *рис. 56*.

Согласно [65] применение процессного подхода для повышения эффективности управления сварочным производством позволяет:

- выявлять проблемные зоны жизненного цикла сварных конструкций (СК);
- просто и наглядно разяснять циклы сварочного производства, что позволяет проследить ситуацию и обеспечивает прозрачность информационных потоков о его функционировании;
- выделять зоны ответственности и рабочие зоны, что облегчает формулировку требований к персоналу сварочного производства, выполняющему определенные работы;
- определять точки контроля и критические точки сварочных работ за счет разделения процессов.

В мировой практике менеджмента качества применяют различные методы показа процессов.

По мнению авторов [65], наиболее эффективным для описания процессов сварочного производства является метод структурно-функционального моделирования IDEF0. На *рис. 57* показана функциональная модель процесса «Производить сварные конструкции», выполненная по методу IDEF0.

В работе [65] процесс «Производить сварные конструкции» (A8.1) разделен на четыре подпроцесса 1-го уровня: «Проектировать СК»



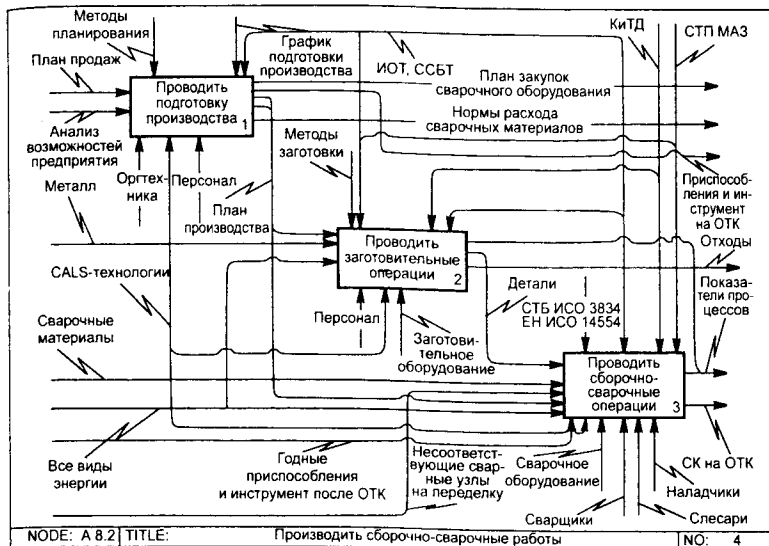
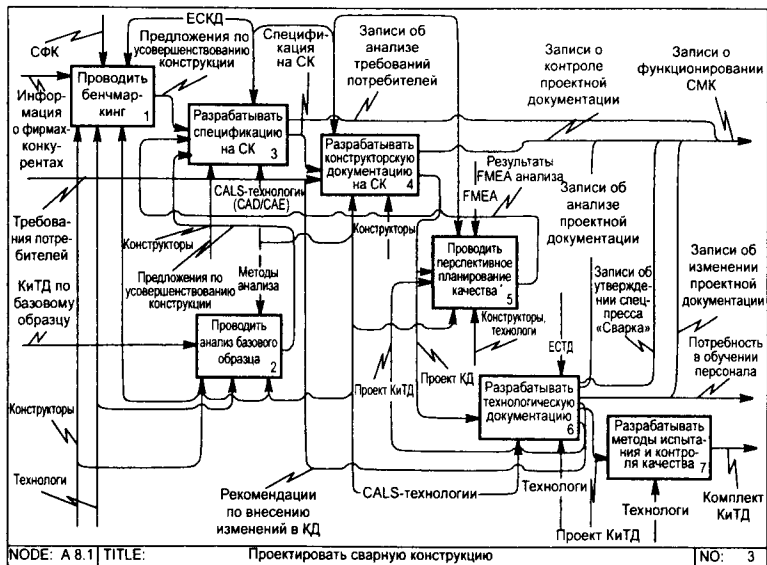


Рис. 57 (часть 2). Функциональная модель процесса «Производить сварные конструкции», описанная по методу IDEFO

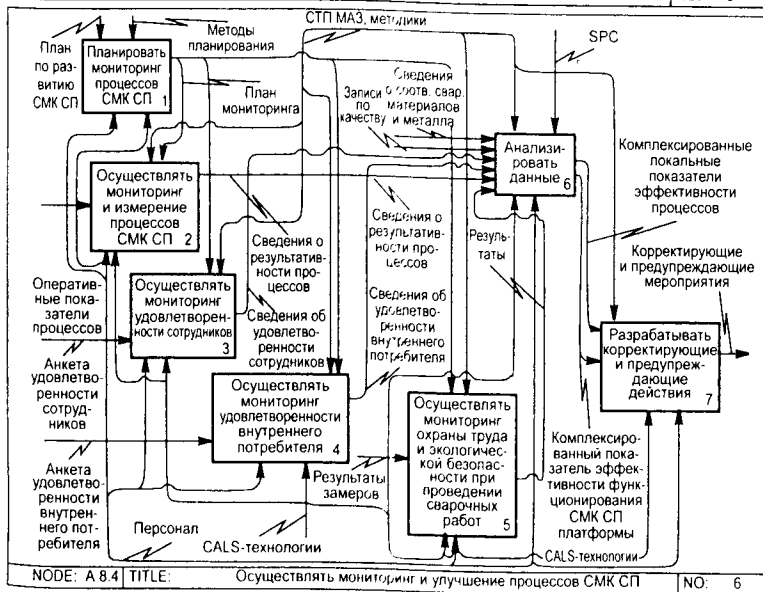
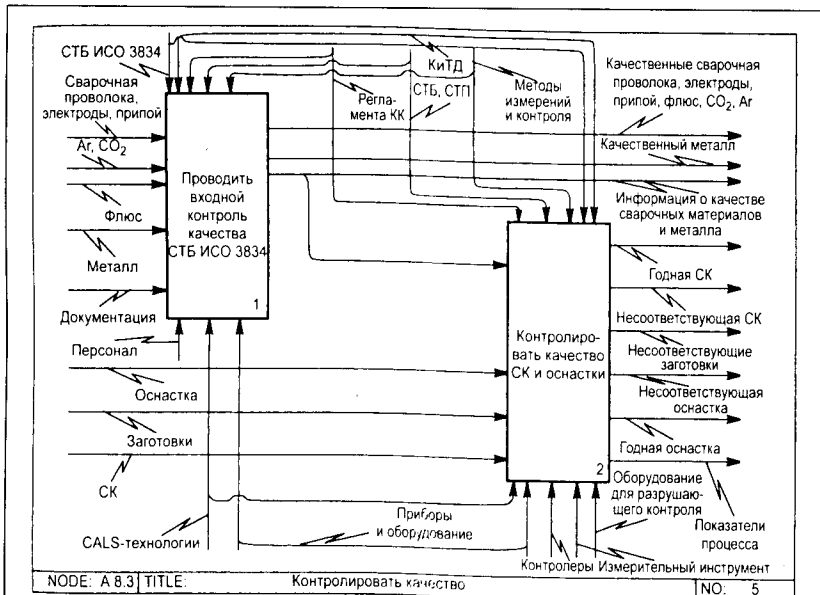


Рис. 57 (часть 3). Функциональная модель процесса «Производить сварные конструкции», описанная по методу IDEFO

(А8.1.1), «Производить сборочно-сварочные работы» (А8.1.2), «Контролировать качество» (А8.1.3) и «Осуществлять мониторинг и улучшение процессов СМК СП» (А8.1.4). Каждый из подпроцессов 1-го уровня разделен на подпроцессы 2-го уровня и т. д. Такое представление сварочного производства позволяет четко выявить входы и выходы процессов для их последующего мониторинга; закрепить за каждым процессом его владельца, который несет ответственность за его результативность и эффективность; идентифицировать потребность в материальных, информационных и трудовых ресурсах.

Для оценки результативности процессов сварочного производства и отслеживания ее динамики на основе сети процессов в модели «как надо» разработана система мониторинга (табл. 50) [65]. Эта система позволяет сделать «прозрачными» и оценить основные факторы, влияющие на качество сварных конструкций. Анализ показателей в динамике позволяет сконцентрировать действия и ресурсы на «постоянное улучшение» по тем позициям, которые нуждаются в первоочередном усовершенствовании.

Упомянутая система построена следующим образом: подпроцессы 1-го уровня оценивают локальными показателями  $L$  посредством интегрирования с помощью коэффициентов значимости. Эффективность процесса «Производить сварные конструкции» оценивают комплексным показателем  $K$  с применением коэффициентов относительной значимости подпроцессов, рассчитанных по специальной методике.

Комплексный показатель эффективности с учетом полученных коэффициентов весомости рассчитывают по формуле [65]

$$K = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^a X_i^I Y_i^I m\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^b X_i^{II} n\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^c X_i^{III} Y_i^{III} k\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^d X_i^{IV} f\right)^2}{\sum_{i=1}^a (Y_i^I m)^2 + \sum_{i=1}^b (Y_i^{II} n)^2 + \sum_{i=1}^c (Y_i^{III} k)^2 + \sum_{i=1}^d (Y_i^{IV} f)^2}}, \quad (14)$$

где  $a, b, c, d$  — число групп свойств в процессах А8.1.1, А8.1.2, А8.1.3, А8.1.4 соответственно;  $m, n, k, f$  — коэффициенты относительной весомости процессов А8.1.1, А8.1.2, А8.1.3, А8.1.4 соответственно;  $X_i^I$  и  $Y_i^I$ ,  $X_i^{II}$  и  $Y_i^{II}$ ,  $X_i^{III}$  и  $Y_i^{III}$ ,  $X_i^{IV}$  и  $Y_i^{IV}$  — оценка и весомость  $i$ -й группы свойств в процессе А8.1.1; А8.1.2; А8.1.3 и А8.1.4 соответственно.

**Таблица 50. Система мониторинга сети процессов**

Процесс	Относительная весовая доля процесса	Группа свойств	Весовая доля группы свойств $Y_i$	Показатель свойств	Весовая доля показателя свойства $r_i$	Значение показателя свойства $A_i$	Комплексный показатель группы свойств $X_i$	Локальный комплексный показатель процесса $L$			
А81.1	m = 0,270	Нормативная документация	$Y_1^I = 0,229$	Ведение карт технического уровня	0,05	0	$X_1^I = 0,710$	$L^I = 0,690$			
				ЕСКД	0,25	0,63					
				ЕСТД	0,19	0,68					
				НД по сварочным работам	0,21	0,70					
				Документация по СМК	0,30	0,90					
		Внешняя и внутренняя среда	$Y_2^I = 0,315$	Анализ требований потребителей	0,45	0,75	$X_2^I = 0,660$				
				Анализ базового образца	0,32	0,67					
				Бенчмаркинг	0,23	0,20					
		Конструкторы и технологи	$Y_3^I = 0,456$	Квалификация	0,40	0,87	$X_3^I = 0,760$				
				Возрастной состав	0,10	0,53					
				Наличие образования	0,35	0,60					
				Текучесть кадров	0,05	0,95					
				Переподготовка и повышение квалификации	0,10	1,00					
		А81.2	m = 0,350	Парк сварочного оборудования	$Y_1^{II} = 0,172$	Прогрессивность	0,45		0,30	$X_1^{II} = 0,420$	$L^{II} = 0,720$
						Загруженность	0,18		0,55		
Возрастной состав	0,37					0,50					

Продолжение таблицы 50

Процесс	Относительная весомость процесса	Группа свойств	Весомость группы свойств $Y_i$	Показатель свойств	Весомость показателя свойства $r_i$	Значение показателя свойства $A_i$	Комплексный показатель группы свойств $X_i$	Локальный комплексный показатель процесса $L$
А81.2	$m = 0,350$	Производственный персонал (сварщики)	$Y_2^{II} = 0,183$	Квалификация	0,43	0,79	$X_2^{II} = 0,750$	$L^{II} = 0,720$
				Стаж работы	0,27	0,73		
				Возрастной состав	0,13	0,50		
				Текучесть кадров	0,07	0,82		
				Переподготовка и повышение квалификации	0,10	0,90		
		Сварочные материалы	$Y_3^{II} = 0,183$	Использование	0,32	0,85	$X_3^{II} = 0,900$	
				Контролируемость	0,42	0,67		
				Сертифицированность	0,36	1,00		
		Производственная инфраструктура	$Y_4^{II} = 0,143$	Эргономика помещений	0,32	0,60	$X_4^{II} = 0,700$	
				Санитарно-гигиеническое состояние рабочих мест	0,35	0,82		
				Слаженность работы по обеспечению производства	0,33	0,65		
		Удовлетворенность работников	$Y_5^{II} = 0,139$	Удовлетворенность заработной платой	0,40	0,57	$X_5^{II} = 0,660$	
				Удовлетворенность отношением руководства	0,13	0,67		
				Удовлетворенность решением социально-бытовых вопросов	0,27	0,70		
				Удовлетворенность условиями труда	0,12	0,77		
				Удовлетворенность отношениями внутри коллектива	0,08	0,73		

Продолжение таблицы 50

Процесс	Относительная весовая процесс	Группа свойств	Весомость группы свойств $Y_i$	Показатель свойств	Весомость показателя $r_i$	Значение показателя $A_i$	Комплексный показатель группы свойств $X_i$	Локальный показатель процесса $L$
A81.2	$m = 0,350$	Технология сборки и сварки	$Y_6^{II} = 0,180$	Прогрессивность	0,23	0,70	$X_6^{II} = 0,850$	$L^{II} = 0,720$
				Обновляемость	0,17	0,80		
				Качество разработки КиТД	0,20	0,80		
				Состояние технической дисциплины	0,27	0,98		
				Обеспеченность КиТД	0,13	1,00		
A81.3	$k = 0,186$	Контрольно-измерительное оборудование	$Y_1^{III} = 0,280$	Обеспеченность	0,30	0,67	$X_1^{III} = 0,710$	$L^{III} = 0,695$
				Прогрессивность	0,30	0,20		
				Обеспечение надежности измерений	0,40	0,98		
				Уровень потерь от брака по вине сварки	0,35	0,98		
				Уровень возмещения убытков по вине сварки	0,31	0,30		
A81.4	$f = 0,185$	Контролирующий персонал	$Y_3^{III} = 0,315$	Сдача сварочной конструкции с первого предъявления	0,38	0,70	$X_3^{III} = 0,860$	$L^{IV} = 0,200$
				Стаж работы	0,40	0,80		
				Квалификация	0,60	0,90		
				Показатель результативности	$X_1^{IV} = 0,007$			
				Показатель применения статистических способов управления качеством	$X_2^{IV} = 0,000$			
Показатель автоматизации процесса мониторинга	$X_3^{IV} = 0,600$							

Примечание. Во всех случаях комплексный показатель  $K = 0,65$ .



Результаты расчета оценки процессов и комплексной оценки эффективности системы менеджмента качества сварочного производства обычно представляют в виде циклограмм. Эти циклограммы позволяют наглядно идентифицировать состояние СМК СП, сравнивать эффективность системы для сварочного производства предприятия как в целом, так и для отдельных составляющих за различные периоды, а также сравнивать с другими аналогичными предприятиями, определять наиболее эффективные направления инновационной деятельности с целью повышения качества продукции сварочного производства. Согласно [65] отслеживание динамики показателей положительно скажется на технологической дисциплине, связях с потребителем, стабильности производства, позволит четко выявить те звенья технологического процесса, которые подлежат немедленному регулированию.

Проанализировав информацию, полученную в ходе мониторинга сварочного производства Минского автомобильного завода, авторы [65] сделали следующие выводы о функционировании системы менеджмента качества:

- уделяется недостаточно внимания бенчмаркингу, т.е. оценке достижений конкурентов в области проектирования производства и использования их опыта при улучшении качества сварных элементов автомобилей;
- не ведутся работы на предприятии по составлению карт технического уровня, что не позволяет оперативно сравнивать характеристики производимой техники с зарубежными аналогами;
- устаревшее сварочное оборудование имеет низкий показатель по возрастному составу и прогрессивности — все это увеличивает затраты на планово-предупредительные ремонты и обслуживание (расход электроэнергии, запасные части, оплата ремонта и др.);
- неоптимальная возрастная структура кадрового состава сварочного производства;
- не подвергаются мониторингу результаты контроля качества, вследствие чего наблюдается повторение несоответствий;
- нет модели процессов сварочного производства и детального мониторинга, нет анализа его результатов.

**Системный подход.** Принцип системного подхода объединяет все процессы в единую систему, в рамках которой планируют и выполняют работу по улучшению качества, оценивают ее результаты, координируют действия подразделений, нацеленных на запланированный результат.

Специалисты по управлению качеством рекомендуют всегда рассматривать разрабатываемые планы как несовершенные, сколько бы сил ни прикладывали для их составления. Поэтому работа по управлению качеством в значительной степени нацелена на постепенное доведение планов до совершенства и использование PDCA как результативного способа достижения этого.

В условиях традиционных производственных отношений менеджеры и инженеры отвечают за проверку отклонений результатов работы от планов и норм, применяя корректирующее воздействие, если таковое необходимо. Другими словами, менеджеры и инженеры отвечают за три этапа PCA («планируй» — «проверяй» — «действуй») цикла PDCA, а рабочие — за фазу D («выполни»). Подобная работа может быть эффективной только при идеальных планах и стандартах, что в принципе невозможно.

Разделение планирования и выполнения основано на предположении, что рабочие не способны к самоуправлению, т. е. не могут сами управлять выполняемой работой. В то же время опыт Японии, США и других развитых стран показывает, что участие рабочих в планировании, оценке и контроле работ по качеству позволяет существенно улучшить качество выпускаемой продукции.

Обычно в рамках системы менеджмента качества цели организации устанавливаются в форме последовательной системы связанных задач для всего предприятия; служащие каждого отдела или подразделения определяют собственные задачи путем активного участия в их разработке и обсуждении с вышестоящими руководителями.

Достигают цели в результате свободы действий и полномочий, предоставленных руководством рабочим, что повышает их желание работать, и они получают большее удовлетворение от проделанной работы. В свою очередь, менеджеры поощряют творческий подход рабочих и служащих, поддерживают их и дают необходимые советы.

Результаты работ по качеству оценивают менеджеры на совместных встречах с подчиненными, за счет чего устанавливается обратная связь, которая служит толчком для постановки следующих задач.

**Постоянное улучшение.** Этот принцип относится к организационной структуре предприятия, производству, персоналу и самой системе менеджмента качества. Рассмотрение природы обеспечения качества продукции показывает, что эффективная работа в этом направлении требует расширения действий фирмы за пределы узких границ производства и контроля продукции. Речь идет о работах в области маркетинга, проектирования, производства, кон-

троля, обеспечения продажи, обслуживания, администрирования, выборе поставщиков сварочных и других материалов.

Важно отметить, что выполнение требований стандартов ДСТУ ISO 9000 и ДСТУ ISO 3834 в сварочном производстве невозможно без подтверждения соответствия производства стандарту ISO 14731:1997 (EN 719:1994) «Координация сварочных работ. Задачи и ответственность». Этот стандарт регламентирует требования к координации сварочных работ и содержит рекомендации по выполнению этих требований (рис. 58) [66].

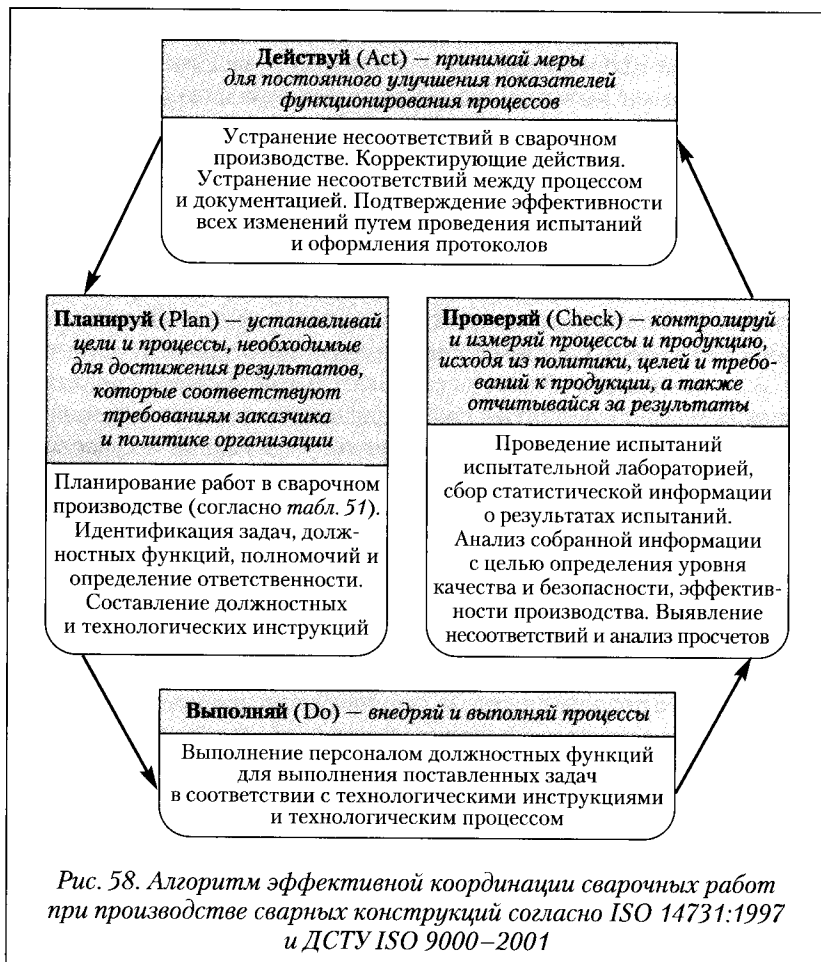


Рис. 58. Алгоритм эффективной координации сварочных работ при производстве сварных конструкций согласно ISO 14731:1997 и ДСТУ ISO 9000–2001

В табл. 51 приведены сферы деятельности, которые целесообразно учитывать при координации сварочных работ в соответствии с ISO 14731:1997.

<b>Таблица 51. Сферы деятельности, которые целесообразно учитывать при координировании сварочных работ (в соответствии с ISO 14731:1997)</b>	
<i>Номер</i>	<i>Сферы деятельности</i>
1.1	<i>Анализ контракта:</i> Возможность производственной организации выполнить сварку и связанные с ней работы
1.2	<i>Анализ проекта:</i> Стандарты, относящиеся к сварке. Расположение соединения в соответствии с требованиями проекта. Доступ к изделию для выполнения сварки, контроля и испытаний. Требования к качеству и приемке швов конструкции
1.3	<i>Материалы</i>
1.3.1	<i>Основной металл:</i> Свариваемость основного металла. Дополнительные требования к техническим условиям накупаемый материал, включая тип сертификата на материал. Идентификация, хранение и перемещение основного металла
1.3.2	<b>Сварочные материалы:</b> Совместимость с основным металлом. Условия поставки. Дополнительные требования к техническим условиям накупаемые сварочные материалы, включая тип сертификата на сварочные материалы. Прослеживаемость
1.4	<i>Подготовка субподряда на сварочные работы и неразрушающий контроль:</i> Оценка возможностей субподрядчика
1.5	<i>Планирование производства продукции (услуги):</i> Пригодность технологической инструкции по сварке (WPS) и протокола подтверждения соответствия технологического процесса сварки (WPAR) согласно требованиям ДСТУ 3951 (ISO 9956). Составление рабочих инструкций. Обеспечение сборочно-сварочными зажимными устройствами и приспособлениями. Проверка соответствия и срока действия сертификата сварщика. Контроль последовательности сборки и сварки конструкции. Проверка наличия требований к производственным испытаниям сварных соединений. Проверка наличия требований к контролю сварки. Обеспечение условий сохранения окружающей среды. Обеспечение охраны здоровья и безопасности

Номер	Сферы деятельности
1.6	<p><i>Оборудование:</i>  Соответствие оборудования технологическим процессам сварки.  Поставка основного и вспомогательного оборудования для сборки и сварки конструкций, его идентификация и транспортировка.  Обеспечение охраны здоровья и безопасности</p>
1.7	<p><i>Выполнение сварки</i></p>
1.7.1	<p><i>Предварительные работы:</i>  Утверждение рабочей инструкции.  Подготовка сварного соединения, сборка соединяемых элементов, их очистка.  Подготовка производственных испытаний сварных соединений в соответствии с технологическими инструкциями.  Пригодность рабочего места, включая защиту окружающей среды</p>
1.7.2	<p><i>Сварка:</i>  Назначение и инструктаж сварщиков.  Применение основного и дополнительного оборудования.  Применение сварочных материалов и принадлежностей.  Применение сварочных прихваток.  Контроль параметров сварочных процессов.  Выполнение необходимых промежуточных испытаний.  Применение подогрева и термообработки после сварки.  Выполнение необходимой последовательности операций сварки.</p>
1.8	<p><i>Испытания</i></p>
1.8.1	<p><i>Визуальный контроль:</i>  Контроль выполнения всех предусмотренных технологией швов.  Контроль размеров швов.  Проверка формы, размеров и допусков сварных узлов.  Контроль внешнего вида соединений</p>
1.8.2	<p><i>Разрушающие и неразрушающие испытания:</i>  Применение разрушающих и неразрушающих испытаний.  Проведение специальных испытаний</p>
1.9	<p><i>Приемка сварных соединений:</i>  Оценка результатов контроля и испытаний.  Исправление дефектных сварных соединений.  Повторная оценка исправленных сварных соединений.  Корректирующие действия в технологическом процессе</p>
1.10	<p><i>Документация:</i>  Подготовка, оформление и хранение необходимых протоколов (включая документацию по субконтрактам)</p>

В производстве сварных конструкций координацию сварочных работ может выполнять одно или несколько должностных лиц. Соответствующие требования к координации сварочных работ могут устанавливать изготовители сварных конструкций, либо они определены в контракте или стандарте на соответствующую продукцию.

Термин «персонал для координации сварочных работ» подразумевает персонал, который отвечает за производственные операции по сварке и деятельность, связанную со сваркой, у которого компетентность и знания подтверждены специальным образованием, обучением и/или соответствующим производственным опытом [66].

Приведенную в *табл. 51* систему рекомендуют использовать как руководство по распределению задач между персоналом, координирующим сварочные работы, а также при определении ответственности за их выполнение. Указанные задачи могут быть сужены или расширены в зависимости от вопросов, которые решает конкретное производство, или от требований заказчика.

Одним из основных факторов стабильности производственного процесса при выполнении сварочных работ является приобретение сварочных материалов, отвечающих по количеству и качеству установленным требованиям.

Качество закупок определено ДСТУ ISO 9001-2001 как один из базовых элементов системы управления качеством на предприятии. При этом должны быть решены следующие задачи [67]:

- создана нормативная и информационная база обеспечения предприятия сварочными материалами требуемого качества;
- разработаны планы и программы обеспечения предприятия сварочными материалами требуемого качества;
- организована работа с поставщиком, включая оценку и выбор поставщиков, контроль и приемку сварочных материалов у поставщика, оперативное регулирование поставок;
- установлены формы и методы входного контроля качества сварочных материалов поставщиков;
- заключены контракты с поставщиком и проведен анализ выполнения условий контракта;
- организован учет, анализ и оценка сроков и качества поставок;
- организованы условия хранения сварочных материалов и подготовка их к использованию;
- организована процедура предъявления и удовлетворения претензий и исков к поставщикам, нарушившим условия договора;
- снижены затраты на обеспечение сварочными материалами.

Для того, чтобы удостовериться в способности поставщика сварочных материалов выполнять условия поставки, в системе менеджмента качества должны быть разработаны процедуры организации работы, определяющие, что надо делать, как надо делать, кто будет делать. Типичная информация, необходимая для оценки и выбора поставщиков сварочных материалов, приведена в *табл. 52* [67].

**Таблица 52. Оценка и выбор поставщиков**

<i>Критерий выбора поставщика</i>	<i>Информация</i>
Качество продукции	Показатели качества сварочных материалов поставщика. Показатели качества аналогичных сварочных материалов других поставщиков. Условия послепродажного сервиса, предоставляемого поставщиком. Условия послепродажного сервиса, предоставляемого другими поставщиками. Наличие внедренной системы управления качеством
Условия поставки	Возможные объемы поставки в установленном календарном периоде. Вид и норма отгрузки (повагонная, контейнерная и т.д.). Вид транспорта (железнодорожный, автомобильный, авиационный, водный). Дальность транспортировки. Ориентировочные транспортные расходы
Срок поставки	Время, под которым подразумевается промежуток между датами выдачи и выполнением заказа
Обязательность (точность) поставки	Оценка выполнения обязательств по срокам поставки
Готовность к поставке	Согласованность и подтверждение срока выполнения заказа поставщиком в соответствии с пожеланием заказчика
Информационная готовность	Готовность предприятия выдать всю запрашиваемую покупателем информацию относительно поставляемых ему сварочных материалов
Гибкость	Готовность предприятия выполнить вносимые заказчиком изменения в ранее оформленный заказ
Стоимость продукции и условия оплаты	Цена сварочных материалов поставщика. Цена аналогичных сварочных материалов других поставщиков. Условия оплаты: предоплата, размер скидок при предоплате, оплата по факту поставки, оплата с отсроченным сроком

**Принятие решений на основе фактов.** Этот принцип напрочь исключает возможность использования волюнтаристских приемов управления в сфере качества. Решения в рамках системы менеджмента качества принимают на основе результатов статистической обработки и оценки данных, накопленных в ходе систематических наблюдений, процедур контроля и испытаний на всех этапах производственной и управленческой деятельности.

Необходимо отметить, что создание и регистрация системы менеджмента качества в Украине и России идет медленными темпами, особенно в области сварочного производства [68]. По мнению специалистов, такое положение вызвано следующими причинами:

- продолжающейся стагнацией реальных секторов экономики этих стран;
- отсутствием стабильности в социально-политической и экономической сферах;
- недооценкой угроз, связанных с вступлением в ВТО;
- общей низкой степенью развития малого и среднего бизнеса, с одной стороны, и крайне слабым интересом этого сектора экономики к вопросам менеджмента качества.

Указанные выше причины могут быть дополнены и практическим отсутствием государственного стимулирования работ по созданию на предприятиях системы менеджмента качества.

Повышение качества изготовления сварных конструкций и в целом эффективности сварочного производства во многом определяется уровнем развития и применения на современном этапе базовых технологий сварки и родственных процессов с использованием в качестве энергетических источников электрической дуги, плазменной дуги, лазерного луча, трения и др., которые рассмотрены в последующих главах.



---

## Глава 2.

# Электродуговые технологии

В различных технологических процессах широко используют явления прохождения тока через газы, которые получили название газовых разрядов.

Ток в процессе разряда может быть постоянным и изменяющимся во времени. В первом случае разряд называют стационарным, во втором — нестационарным. Если в нестационарном разряде форма разряда остается неизменной, разряд называют установившимся, в противном случае — неустановившимся. Из наиболее важных для сварки и родственных технологий форм разряда к установившимся принадлежат тлеющий и дуговой, к неустановившимся — искровой разряд. Все эти формы тесно связаны между собой и переходят из одной в другую.

Тлеющий разряд используют для нагрева заготовок при диффузионной сварке, а также термообработке.

Электрическая дуга получила весьма широкое применение в металлургии, сварке и родственных технологиях (наплавка, резка, напыление, упрочнение).

Сварочные дуги позволяют ввести в обрабатываемые материалы удельную мощность до  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при пятне нагрева 1–10 мм<sup>2</sup>. Такая концентрация энергии обеспечивает местный нагрев и расплавление многих металлов и сплавов при сварке и наплавке плавящимся и неплавящимся электродами, а также резку и другие виды локальной тепловой обработки изделий.

Искровой разряд широко используют для зажигания электрической дуги и в качестве источника нагрева при электроискровом легировании. Благодаря универсальности электрической сварочной дуги как инструмента для обработки, разнообразных источников ее питания и их непрерывному совершенствованию, в комплексе с другими узлами соответствующего оборудования удается реализовать с высокой эффективностью современные электродуговые технологии: сварки, наплавки, напыления и резки.

## 2.1. Дуговая сварка плавящимся электродом

Основными факторами, определяющими результат механизированной дуговой сварки плавящимся электродом, являются качество электродной проволоки, эффективная защита зоны сварки, правильный выбор источников питания и сварочного оборудования в целом, профессиональная квалификация сварщика и техническая культура производства.

Остановимся более подробно на первых трех факторах, так как последующие два уже рассмотрены в главе 1.

**Электродная проволока.** Для потребителя важными являются такие характеристики электродной проволоки:

- допустимые отклонения от номинального диаметра;
- постоянство химического состава;
- состояние поверхности;
- обеспечение надежности токоподвода;
- временное сопротивление разрыву;
- диаметр намотки и собственное напряжение «закрутки»;
- размеры кассет и катушек для проволоки;
- вид намотки и упаковки.

Сварочную проволоку сплошного сечения для дуговой сварки сталей плавящимся электродом до последнего времени в Украине и России выпускают по ГОСТ 2246–70 «Проволока стальная сварочная. Технические условия».

Стандарт предусматривает изготовление 76 марок проволоки, в том числе: 6 марок низкоуглеродистой, 30 марок легированной и 40 марок высоколегированной. Кроме того, существуют десятки марок стальной сварочной проволоки, которые выпускают в небольших количествах по отдельным техническим условиям.

В настоящее время в Украине уже вступили в действие международные стандарты, касающиеся производства электродной проволоки. Одним из таких гармонизированных стандартов является стандарт ДСТУ ISO 14341:2004 (ISO 14341:2002, IDT) «Матеріали зварювальні. Електродні дроти та наплавлений метал для дугового зварювання у захисному газі плавким електродом нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація». Требования к поставке сварочной проволоки определены гармонизированным стандартом ДСТУ ISO 544:2004 (ISO 544:2003, IDT) «Матеріали зварювальні. Технічні умови постачання зварювальних присадних матеріалів. Тип продукції, розміри, допуски та маркування».

Согласно ГОСТ 2246-70 основными показателями качества проволоки являются: предельные отклонения от диаметра и овальности, размеры мотков, качество поверхности. Сравнительные данные о предельных отклонениях размеров проволоки, выпускаемой по ГОСТ 2246-70 и ISO 544:2004, приведены в табл. 53 [69].

Следует отметить, что гармонизированный международный стандарт не допускает овальности, а поля допусков на предельные

**Таблица 53. Предельные отклонения размеров проволоки, мм**

Номинальный размер	Предельные отклонения от диаметра		Предельные отклонения от овальности		
	ГОСТ 2246-70	ДСТУ ISO 544:2004	ГОСТ 2246-70	ДСТУ ISO 544:2004	
0,3	-0,05	-	-0,025	Не допускается	
0,5	-0,06	+0,01 -0,03	-0,03		
0,6	-		-		
0,8	-0,07	+0,01 -0,03	0,035		
0,9	-		-		
1,0	-0,09				-0,045
1,2					
1,4					
1,5		-			
1,6	-0,12	+0,01 -0,04	-0,06		
1,8	-		-		
2,0	-0,12		-0,06		
2,4	-		-		
2,5	-0,12		-0,06		
2,8	-	+0,01 -0,07	-		
3,0	-0,12		-0,06		
3,2	-		-		
4,0	-0,16				-0,08
5,0					
6,0					
8,0	-0,20	-	-0,10		
10,0	-0,24		-0,12		
12,0					

отклонения от диаметра значительно сужены по сравнению с требованиями ГОСТ 2245–70. Ужесточение допустимых предельных отклонений от номинального диаметра снижает вероятность заклинивания проволоки в канале токопроводящего наконечника и обеспечивает постоянную плотность тока при сварке.

Химический состав электродной проволоки и его постоянство по длине влияют как на технологический процесс изготовления проволоки, так и на ее сварочно-технологические характеристики.

Проволока Св-08Г2С, выпускаемая по ГОСТ 2246–70, содержит большее количество кремния, марганца и углерода по сравнению с проволокой для сварки в активных защитных газах (МАГ-сварка) марок G3Si1, G4Si1 (ДСТУ ISO 14341). Проволока Св-08Г2С менее технологична и, как правило, не обеспечивает постоянства химического состава по длине. ДСТУ ISO 14341:2004 в отличие от ГОСТ 2246–70 дополнительно определяет требования к пределам механических свойств наплавленного металла шва и используемого защитного газа. При этом проволоку классифицируют на две группы — А и В, в зависимости от ее химического состава на основании требований европейских норм EN и американских норм AWS. Группа А классифицирует проволоку по пределу текучести и работе ударного разрушения наплавленного металла, равной 47 Дж, а группа В — по временному сопротивлению разрыву и работе ударного разрушения, равной 27 Дж.

Состояние поверхности электродной проволоки влияет на ее коррозионную стойкость, содержание газов и вредных примесей в сварных швах, усилие проталкивания и надежность токоподвода.

Совершенствование электродной проволоки во многом связано с желанием улучшить состояние ее поверхности. Для этого применяют очистку, омеднение [73], электролитно-плазменную обработку [74, 75], специальную технологию изготовления проволоки [76].

Механическая очистка проволоки является трудоемкой операцией и не обеспечивает повышение ее коррозионной стойкости и существенное улучшение сварочно-технологических свойств.

Нанесение медного покрытия уже несколько десятилетий является основным направлением улучшения поверхности электродной проволоки. При этом толщина медного покрытия должна быть такой, чтобы масса меди, находящейся в покрытии, составляла не более 0,10–0,15% массы проволоки. Суммарное содержание меди в проволоке и в покрытии не должно превышать 0,25–0,30%. Если суммарное содержание меди выше, то это может привести к сниже-

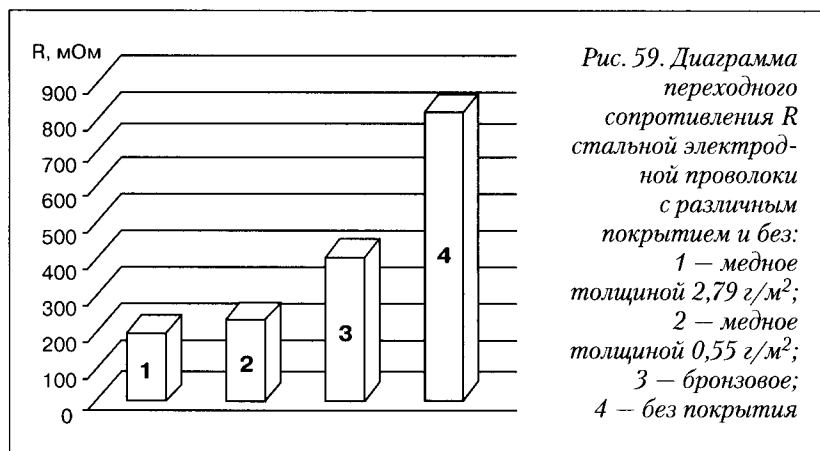
**Таблица 54. Контактное сопротивление, Ом·10<sup>-3</sup>, проволоки Св-08Г2С с различным состоянием поверхности**

Состояние поверхности проволоки	Выдержка, сут.	
	не более 1	60
С технологической смазкой	$\frac{55-100}{85}$	$\frac{90-235}{120}$
Омедненная	$\frac{1,0-1,5}{1,3}$	$\frac{3-10}{7}$
Электрохимически очищенная	$\frac{2,5-5,2}{4,3}$	$\frac{5,5-13}{9,0}$
Ржавая	–	$\frac{95-750}{320}$

нию ударной вязкости швов и повышению опасности образования в них кристаллизационных трещин.

Для проволоки диаметром 1,2 и 2,0 мм оптимальная толщина медного покрытия равна соответственно 0,15–0,20 и 0,4–0,6 мм. Согласно [73] технологическая смазка и медное покрытие не защищают стальную сварочную проволоку от коррозии. В то же время установлено, что контактное сопротивление омедненной сварочной проволоки в 50–100 раз меньше этого показателя у проволоки, покрытой технологической смазкой (табл. 54) [73].

В [71] установлено (рис. 59), что стальная проволока марки G3Si1 с медным покрытием имеет наименьшее переходное сопро-



*Рис. 59. Диаграмма переходного сопротивления R стальной электродной проволоки с различным покрытием и без: 1 – медное толщиной 2,79 г/м²; 2 – медное толщиной 0,55 г/м²; 3 – бронзовое; 4 – без покрытия*

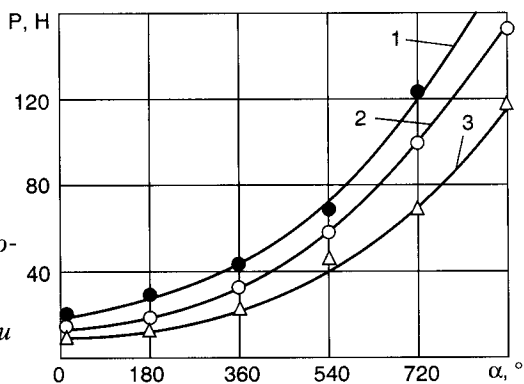
тивление, у проволоки с бронзовым покрытием оно примерно вдвое больше, а у проволоки без покрытия — больше примерно в 4 раза. Повышение толщины медного покрытия не ведет к существенному снижению переходного сопротивления, фирма WDI использует проволоку с толщиной покрытия от 0,8 до 1,3 г/м<sup>2</sup>.

Временное сопротивление разрыву проволоки должно быть в пределах 900–1100 МПа для диаметров 0,6–0,8 мм; 800–1000 МПа — для диаметров 1,6–2,0 мм [73]. Польский стандарт PN-88/M-69420 регламентирует  $\sigma_B$  для проволоки G3Si1 диаметром 1,2 мм величиной 750–1200 МПа [77]. При меньшем временном сопротивлении разрыву снижается жесткость проволоки и нарушается стабильность ее подачи по направляющим каналам сварочного оборудования, при большем — увеличивается изнашивание токопроводящих наконечников.

Состояние поверхности сварочной проволоки влияет на усилие и равномерность ее подачи через гибкие направляющие каналы шланговых держателей [73]. При всех углах изгиба шлангов усилие проталкивания омедненной проволоки меньше, чем усилие при проталкивании проволоки с технологической смазкой (рис. 60). Однако оно несколько больше в сравнении с проволокой, подвергнутой электрическому полированию.

Известно [71, 73], что диаметр намотки проволоки на кассеты и катушки оказывает влияние на стабильность токоподвода в контакте «проволока-наконечник» и на расположение торца электрода относительно оси наконечника (рис. 61). Качество намотки обычно

Рис. 60. Кривые зависимости усилия проталкивания проволоки  $P$  от состояния ее поверхности при различных углах изгиба шланга  $\alpha$ :  
 1 — проволока с технологической смазкой;  
 2 — омедненная;  
 3 — электрохимически полированная (диаметр 2 мм)



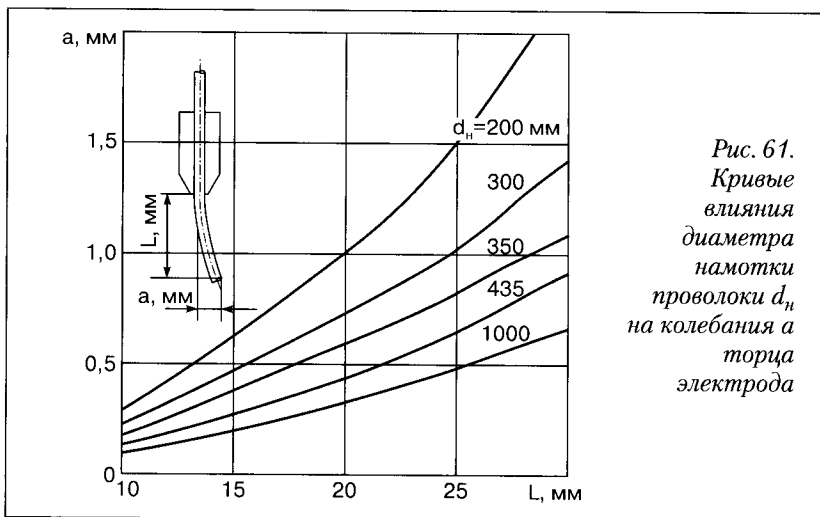


Рис. 61.  
Кривые влияния диаметра намотки проволоки  $d_n$  на колебания  $a$  торца электрода

оценивают путем замера диаметра свободного витка проволоки, лежащего на ровной поверхности горизонтальной плиты. Для проволоки диаметром 1,2–2,0 мм упомянутый выше диаметр должен находиться в пределах 1000–1300 мм. Что касается собственного напряжения «закрутки» проволоки, то оно должно ограничиваться величиной, при которой конец свободно лежащего витка проволоки приподнимается над ровной поверхностью горизонтальной плиты на высоту не более 20 мм.

Большинство зарубежных, а в настоящее время и отечественных производителей поставляют проволоку с намоткой «витком к витку» в еврокассетах и катушках типа В или BS соответствующего диаметра. Проволоку диаметром 0,6 и 0,8 мм наматывают на кассеты диаметром 100 и 200 мм, проволоку диаметром 1,0–1,4 мм — на кассеты диаметром 200 и 300 мм, а проволоку диаметром 1,6–2,0 мм — на кассеты и катушки диаметром 300 мм.

ДСТУ 544:2004 определяет требования к «жесткости», легкости подачи, сварочно-технологическим свойствам проволоки, размерам барабанов, катушек для намотки проволоки.

Установлено [71, 77], что качество проволоки одной и той же марки может отличаться не только у разных производителей, но и у одного производителя от плавки к плавке.

В [77] были проведены сравнительные исследования качества 14 польских и зарубежных омедненных сварочных проволок типа

G3Si1 номинальным диаметром 1,2 мм. Суммарное содержание азота, водорода и кислорода в испытуемой проволоке составляло от 61,7 до 297 ррт, при допустимом 150 ррт. В то же время было установлено, что содержание газов в проволоке существенно влияет на пористость наплавленного металла. Если суммарное содержание азота, водорода и кислорода в проволоке превышает 50 ррт, то при МАГ-сварке возникает угроза появления пор. В большей части в зону сварки газы попадают из технологической смазки, находящейся под слоем меди. Проведенные исследования показали [73], что омедненная проволока улучшает условия первоначального возбуждения дуги при сварке. В сравнении с неомедненной проволокой время от момента первого касания омедненной проволоки до установления стабильного процесса сварки сокращается в 2–3 раза, а количество «ложных» касаний проволокой поверхности основного металла уменьшается с 3–4 до 1–2.

Согласно [77] зажигание сварочной дуги всех 14 испытуемых омедненных проволок происходит практически одинаково. Время до момента стабильного горения дуги при механизированной сварке составляет от 11,6 до 14,4 мс.

При сварке омедненной проволокой уровень потерь металла на разбрызгивание ниже на 20–40% по сравнению с уровнем потерь при сварке проволокой, имеющей технологическую смазку или ржавчину [73]. В то же время в [77] показано, что омедненная проволока одной марки, но различных производителей по показателю разбрызгивания существенно отличается.

Для производителей сварных конструкций решающими факторами при оценке закупаемой сварочной проволоки, имеющей сертификат соответствия, являются пористость сварных швов, жесткость проволоки (подъем витка) и разбрызгивание. В [77] отмечают, что согласно этим показателям из 14 испытанных проволок три имеют низкое качество, три — высокое, а остальная проволока по отдельным показателям качества имела низкие значения.

Для качества сварки омедненной и неомедненной электродной проволокой важное значение имеет вид ее упаковки.

Упаковка сварочной проволоки должна обеспечить длительную ее сохранность в различных условиях без нарушения технологических свойств. Показано (табл. 55) [73], что упаковка в ингибированную бумагу снижает скорость коррозии проволоки с технологической смазкой в 1,3 раза, омедненной и электрохимически обработанной — почти в 10 и 100 раз.



**Таблица 55. Коррозионная стойкость сварочной проволоки в различных видах упаковки**

Состояние поверхности проволоки	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> /год, при хранении				
	В упаковке на открытом воздухе			В упаковке над 3%-м водным раствором NaCl (50°C)	
	Водоотталкивающая бумага и «тарная» ткань	Ингибитированная бумага	Ингибитированная бумага с латексным покрытием	Полиэтиленовая пленка	Ингибитированная бумага
Покрытая технологической смазкой	170	111,4	59	9650	9650
Омедненная	190	20,6	12,2	2720	2720
Электрохимически очищенная	161	1,88	3,76	1900	1800

Еще более высокую стойкость против коррозии при испытаниях на открытом воздухе обеспечила упаковка в ингибитированную бумагу с латексным покрытием. Как утверждают в [73], упакованную таким образом проволоку с омедненной и электрохимически очищенной поверхностью можно хранить в течение нескольких лет, не обнаружив при этом следов коррозионного поражения и нарушения сварочно-технологических свойств.

В индустриально развитых странах мира объем потребления сплошной проволоки для механизированной сварки в среде защитных газов составляет 50–85% от объема использования всех сварочных материалов. В странах СНГ этот показатель хотя и имеет некоторую тенденцию к росту, но остается пока на уровне 15–26%.

В мировой практике конкурентная борьба производителей электродной проволоки привела к тому, что они разделились на два лагеря: на тех, кто делал ставку на качество продукции и на тех, кто основным фактором для завоевания рынка считал стоимость проволоки. Ведущие мировые производители электродной проволоки развиваются по пути улучшения ее качества, постоянно совершенствуя технологию изготовления и тщательно контролируя издержки на всех стадиях технологического процесса: от получения стальной заготовки до упаковки готовой продукции [70, 71, 72].

Основными операциями современного производства сплошной проволоки являются:

- подготовка поверхности катанки;

- первое волочение катанки;
- второе волочение проволоки с одновременным ее омеднением;
- намотка проволоки на катушки.

Долгое время считалось, что сталь, полученная из чугуна, обладает более высокими свойствами, чем сталь из скрапа. Благодаря вакуумированию и другим технологиям, применяемым в сталеплавильном производстве, в настоящее время гарантировано получение стали с высокими и стабильными физико-механическими характеристиками, не уступающими характеристикам стали из чугуна, но которая при этом имеет значительно меньшую стоимость.

В [70, 72] отмечают, что самым важным технологическим приемом, обеспечивающим высокое качество катанки, стал процесс контролируемого ее охлаждения после прокатки. Благодаря этому процессу на поверхности катанки образуется легко удаляемая окалина.

Первое волочение — наиболее важная операция в общем процессе изготовления сплошной сварочной проволоки. Первое волочение («сухое волочение») осуществляют на прямоточных девятикратных станах, которые обеспечивают достаточную смазку проволоки, постоянное ее охлаждение, минимальные напряжения в проволоке. Учитывая высокие скорости волочения (до 30 м/с), современные волочильные станы оснащены автоматическими системами контроля и управления процессом волочения. В комплект оборудования сухого волочения входят большегрузные намоточные устройства со специальными приемниками, что исключает необходимость остановки стана.

Второе волочение проволоки совмещено с процессом ее омеднения. При втором волочении предъявляют повышенные требования к количеству смазки на поверхности проволоки после первого волочения. Смазки должно быть достаточно для волочения, но она не должна оставаться на поверхности перед омеднением.

Для нанесения медного покрытия на поверхность стальной сварочной проволоки в промышленных условиях обычно используют достаточно экономичную технологию контактного меднения, основанную на различии электродных потенциалов железа ( $-0,44$  В) и меди ( $+0,34$  В). При погружении железа в раствор медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ) под действием разности электрохимических потенциалов железо переходит в раствор, а медь, выделяясь из раствора, осаждается на поверхности стальной проволоки. Для уплотнения медного покрытия проволоку подвергают дополнительной деформации при волочении с применением жидкой смазки.

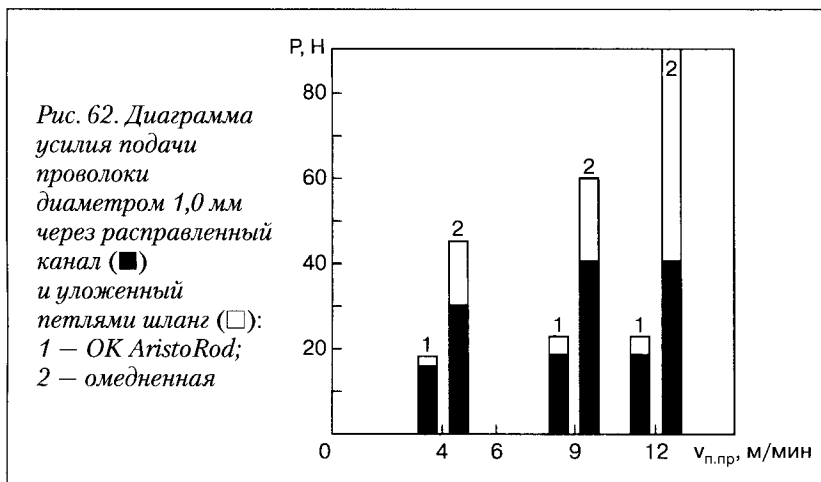
Высокие скорости волочения (до 25 м/с) потребовали создания модифицированной системы диффузионного омеднения поверхности проволоки, исключающей проникновение обрабатываемой жидкости в смежные секции машины.

С целью увеличения производительности проволоку в волочильном стане наматывают в большие катушки (500–800 кг). Последующую перемотку на меньшие катушки осуществляют на других рабочих местах. При этом потребители проволоки отдают предпочтение послойной намотке, так как это оказывает положительное влияние на процесс механизированной сварки.

Как отмечалось выше, омедненная проволока не лишена недостатков, но, несмотря на это, она остается основным продуктом, используемым для механизированной сварки плавящимся электродом не только в защитных газах, но и под флюсом [78]. Наиболее слабым местом для омедненных электродных проволок является прочность сцепления медного слоя с поверхностью проволоки. Во время подачи проволоки при контакте с подающими роликами и от трения в каналах происходит отшелушивание меди, каналы забиваются и проволока подается неравномерно. Поэтому продолжается поиск альтернативных меднению технологий поверхностной обработки электродной проволоки. К одной из таких технологий относится электролитно-плазменная обработка поверхности сварочной проволоки [74, 75]. После электролитно-плазменной обработки стальной сварочной проволоки содержание водорода в ней в 2–3 раза меньше по сравнению с необработанной. Упомянутая обработка обеспечивает полное удаление с поверхности проволоки технологической смазки, оксидов и ржавчины. Электролитно-плазменную обработку можно также использовать для подготовки поверхности проволоки из алюминия, меди и их сплавов.

В последние годы на рынке получила распространение проволока AristoRod фирмы «ЭСАБ» [76, 79]. Эта проволока для механизированной и роботизированной сварки, поверхность которой обработана по специальной технологии ASC (Advanced Surface Characteristics). В результате применения этой технологии удалось исключить омеднение поверхности и при этом улучшить подачу проволоки (рис. 62), уменьшить износ контактных наконечников, гарантировать стабильный процесс сварки при низком разбрызгивании. Поверхность проволоки защищена от коррозии.

Проволоки AristoRod MAG изготавливают стандартных (G3Si1, G4Si1) типов, а также для сварки высокопрочных и теплостойких



сталей. Преимущества проволоки AristoRod, обработанной по технологии ASC, особенно проявляются в молибденосодержащих проволоках, омеднение которых затруднено.

Более полувека прошло с тех пор, как в СССР и других странах было создано промышленное производство порошковой проволоки. Сварка порошковой проволокой развивалась как альтернатива ручной дуговой сварке штучными электродами, и ее наиболее широко применяли для сварки углеродистых и низколегированных сталей, хотя создана была порошковая проволока и для сварки нержавеющей сталей, цветных металлов, чугунов. Производство порошковой проволоки интенсивно развивалось в СССР в 1970–1980-х гг. Характеристики применявшейся в то время порошковой проволоки и особенности технологии сварки приведены в каталоге [80].

В последние годы производство порошковой проволоки в мире и Украине продолжает развиваться и совершенствоваться [7, 81, 85]. В мире используют две технологии изготовления порошковой проволоки: из ленты и сварной трубки. В первом случае технологический процесс изготовления порошковой проволоки состоит из последовательно осуществляемых операций формирования ленты в калибровочных роликах в исходную трубчатую заготовку и заполнения ее шихтой. Эти операции выполняют в специальном формирующем устройстве с питателями шихты. Затем из сформированной заготовки волочением на прямоточном шестикратном волочильном стане получают проволоку заданных размеров.

Порошковую проволоку диаметром свыше 1,8 мм обычно изготавливают за шесть протяжек с достаточно высокой производительностью. Для изготовления порошковой проволоки меньших диаметров требуется многократное волочение или использование других прямоточных восьми-двенадцатикратных станов, что снижает производительность.

В мире наиболее ходовой диаметр порошковой проволоки — 1,2 мм. Как известно, порошковая проволока малых диаметров позволяет выполнять сварку в любом пространственном положении, сваривать тонкий металл, снижать катеты угловых швов.

Волочение порошковой проволоки с высоколегированной оболочкой связано с большими трудностями из-за быстрого наклепа поверхности ленты, малого числа проходов при волочении, необходимости проведения промежуточного рекристаллизационного отжига, вследствие чего резко снижается производительность изготовления порошковой проволоки и возникают жесткие ограничения по составу компонентов шихты, особенно рудоминеральной ее части.

Одним из направлений сокращения числа протяжек при волочении лент из низкоуглеродистой и высоколегированной стали является использование ультразвуковых колебаний. Показано [83], что при наладывании на волоку ультразвуковых колебаний, соосных с направлением волочения, получали проволоку из ленты из низкоуглеродистой стали с коэффициентом заполнения 15–20% и диаметром 1,3 мм за пять проходов. При этом на волокнах, оснащенных акустическими системами, обрывы не были зафиксированы, поверхность полученной проволоки была чистая, без задиrow и наваров.

При испытании оболочки из стали 12Х18Н9 получили порошковую проволоку диаметром 1,44 мм и коэффициентом заполнения 16–22,5 за пять проходов.

Таким образом, было установлено, что применение ультразвуковых колебаний при волочении позволяет достичь новых показателей качества порошковой проволоки и увеличить единичные объемы по сравнению с обжатием при традиционной технологии в 1,5–1,8 раза.

Обычно в качестве недостатков порошковой проволоки, изготавливаемой из ленты, отмечают повышенную вероятность образования пор в швах, вызываемых наличием пустот в проволоке. Повышает вероятность образования пор также влага, попавшая в наполнитель при хранении проволоки, а кроме того, смазка и ржавчина, следы которой имеются на металлической ленте.

Основные этапы технологического процесса изготовления порошковой проволоки из сварной трубы [84]:

- изготовление исходной трубы высокочастотной сваркой и последующий контроль герметичности сварного соединения;
- предварительная подготовка способом агломерации флюсового наполнителя из смеси порошкообразных компонентов;
- заполнение калиброванной трубы флюсовым сердечником с помощью вибрации;
- контроль заполнения внутренней полости трубы флюсовым сердечником перед волочением;
- волочение с промежуточным отжигом заполненной заготовки до готового диаметра;
- нанесение на поверхность проволоки медного покрытия толщиной 0,15...0,20 мкм и его опрессовка, 100% контроль заполнения готовой проволоки после опрессовки медного покрытия;
- перематка готовой проволоки на потребительские катушки, упаковка.

Операция светлого рекристаллизационного отжига проволоки с герметичной оболочкой перед окончательным волочением обеспечивает полное удаление остаточной влаги из флюсового сердечника. Благодаря отжигу проволоки перед волочением для получения конечного диаметра содержание диффузионно подвижного водорода в наплавленном металле не превышает 5 мл/100 г и находится, как правило, в пределах 2–3 мл/100 г при сварке в углекислом газе и смеси газов (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>).

К преимуществам бесшовной порошковой проволоки в сравнении с вальцованной проволокой с негерметичным продольным стыком относят [84]:

- абсолютную защищенность флюсового сердечника от возможного насыщения влагой из атмосферы в процессе хранения в течение длительного времени даже у неупакованной проволоки;
- отсутствие необходимости в повторной прокалке перед использованием;
- возможность омеднения поверхности и улучшения скольжения проволоки по направляющему каналу сварочного оборудования;
- улучшенную подачу проволоки, необязательное использование четырехроликовой системы подачи, возможность работы с полуавтоматами, предназначенными для подачи проволоки сплошного сечения;

- пониженный износ токоподводящего наконечника и более стабильное горение дуги за счет постоянного надежного контакта движущейся проволоки с наконечником;
- повышенную пластичность и ударную вязкость металла швов за счет низкого содержания диффузионного водорода в наплавленном металле (менее 5 мл/100 г).

Промышленное производство бесшовной проволоки в Украине впервые освоено предприятием «АРКСЭЛ» в г. Донецке совместно с немецкой фирмой Drahtzug Stien Wire & Welding. В планах предприятия освоение широкой номенклатуры порошковой проволоки в соответствии с потребностями рынка Украины, в том числе: для сварки в защитных газах (Megafil); для износостойкой ремонтной и восстановительной наплавки в защитных газах и без дополнительной защиты (Megafil A); порошковых лент для дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом под слоем флюса (Topline); порошковой проволоки для дуговой сварки и наплавки под слоем флюса (Topcore).

Производство бесшовной порошковой проволоки успешно развивается в таких странах, как США, Япония, Франция, ФРГ, Южная Корея, Швеция, Голландия, Австрия и др. Постоянно растет количество марок проволоки, предлагаемых фирмами «Lincoln Electric», «Thyssen-Bohler», «AirLiguide-Oerlikon», «Elga», «Kobelco», «Innoweld», «Core wire», «Metrode», «Kisweld» и др. для сварки в углекислом газе и смеси  $Ar + CO_2$  [81]. Такая проволока обеспечивает высокие механические свойства металла шва и применяется при изготовлении ответственных сварных конструкций (*табл. 56*) [84].

Отечественная проволока ПП-АН59, ПП-АН63, ПП-АН69 предназначена для сварки углеродистых и низколегированных сталей массового назначения, а ПП-АН61, ПП-АН67 — для сварки высокопрочных низколегированных сталей. Швы, выполненные этими проволоками, характеризуются хорошей формой, а процесс сварки — малым количеством брызг и аэрозолей.

При расплавлении проволоки ПП-АН59 и ПП-АН63 рутилового типа образуются быстротвердеющие короткие шлаки. Они пригодны для сварки по всех пространственных положениях.

Для упомянутых выше порошковых проволок существенное значение имеет выбор оптимальных параметров режима с учетом диаметра проволоки и конкретных условий сварки. Режимы сварки проволоками марок ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН69 приведены в *табл. 57* [85]. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности.

**Таблица 56. Характеристики бесшовной порошковой проволоки**

<i>Марка проволоки, классификация по EN, сертификация</i>	<i>Типичный химический состав, %</i>	<i>Типичные механические свойства наплавленного металла в состоянии после сварки</i>
Megafil 710M T 46 4 M M1 H5 Диаметр 1,0...2,4 мм BV, LR, DNV, RINA, FORCE, GL, DB	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,70	$\sigma_{0,2} \geq 470$ МПа $\sigma_B = 550...650$ МПа $\delta \geq 27\%$ $\alpha H_{-40} > 60$ Дж/см <sup>2</sup>
Megafil 713R T 46 2 P C 1 H5 T 46 4 P M1 H5 Диаметр 1,0...1,6 мм TUV, DB, GL, Controlas, BV, LR, DNV, RINA, PRS, FORCE, ABS	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,50 Ni – 0,20 Ti – 0,03	$\sigma_{0,2} \geq 460$ МПа $\sigma_B = 550...650$ МПа $\delta \geq 22\%$ $\alpha H_{-40} > 60$ Дж/см <sup>2</sup>
Megafil 821R T 50 4 1Ni P C 1 H5 T 50 6 1Ni P M1 H5 Диаметр 1,0...1,6 мм TUV, DB, GL, BV, LR, DNV, RINA, PRS, FORCE, ABS	C – 0,05 Mn – 1,30 Si – 0,50 Ni – 0,70 Ti – 0,03	$\sigma \geq 500$ МПа $\sigma_B = 550...690$ МПа $\delta \geq 22\%$ $\alpha H_{-40} > 47$ Дж/см <sup>2</sup>
<i>Примечание. Рекомендуемые области применения – судостроение, изготовление сосудов, работающих под давлением, трубопроводов, инженерных конструкций.</i>		

**Таблица 57. Режимы сварки для проволок марок ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН69**

<i>Диаметр проволоки, мм</i>	<i>Сила сварочного тока, А</i>	<i>Напряжение дуги, В</i>	<i>Расход углекислого газа, л/мин</i>
1,2	70–150	17–21	4–7
	150–300	21–27	7–12
1,4	80–150	17–22	5–8
	150–300	22–27	8–15
1,6	150–250	20–26	6–12
	250–350	24–30	12–15
2,0	200–350	22–30	12–15
	350–500	28–36	15–20

Типичный химический состав наплавленного металла и механические свойства металла шва, выполненного этой и зарубежной проволокой, представлены в табл. 58, 59 [85].



**Таблица 58. Типичный химический состав наплавленного металла, % по массе**

Марка проволоки	Углерод, не более	Марганец	Кремний	Никель	Сера, не более	Фосфор, не более
ПП-АН59	0,12	1,10–1,60	0,35–0,55	0,30–0,70	0,03	0,03
ПП-АН61	0,12	1,10–1,50	0,30–0,50	1,30–1,70	0,03	0,03
ПП-АН63	0,12	1,00–1,50	0,30–0,70	–	0,03	0,03
ПП-АН69	0,12	1,30–1,50	0,30–0,60	–	0,03	0,03
91К2-Н	0,060	1,40	0,30	1,80	0,010	0,010
PZ6103	0,03–0,07	1,20–1,60	0,75–1,05	–	0,025	0,025
PZ6113	0,04–0,08	1,00–1,50	0,30–0,70	–	0,025	0,025
PZ6130	0,05–0,09	1,10–1,50	0,35–0,65	–	0,025	0,025

**Таблица 59. Механические свойства металла шва, выполненного порошковой проволокой в защитном газе**

Марка проволоки (разработчик)	Диаметр, мм	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, KCV	
					при температуре, °С	Дж/см <sup>2</sup>
ПП-АН59 (ИЭС им. Е. О. Патона)	1,2	440	500–650	20	–30	35
ПП-АН61 (ИЭС им. Е. О. Патона)	1,4	440	500–650	20	–40	35
ПП-АН63 (ИЭС им. Е. О. Патона)	1,6	440	500–650	20	–20	35
ПП-АН69 (ИЭС им. Е. О. Патона)	2,0	440	500–650	20	–30	35
91К2-Н (Lincoln Electric, США)	1,2; 1,6	540	620–760	17	–18	27
PZ6103 (ESAB, Швеция)	1,2; 1,4; 1,6	420	510–600	22	–20	54
PZ6113 (ESAB, Швеция)	1,2; 1,4; 1,6	420	510–590	22	–20	54
PZ6130 (ESAB, Швеция)	1,6; 2,4	420	510–580	24	–40	54

Отечественное предприятие «АРКСЭЛ» (г. Донецк) разработало и освоило выпуск нескольких марок порошковой проволоки [86]. Порошковую проволоку ПП-АС4 рутилового типа рекомендуют для сварки на вертикальной плоскости горизонтальных швов углеродистых и низколегированных сталей в среде углекислого газа и смеси газов  $Ar + CO_2$ . Проволока обеспечивает мягкое стабильное горение дуги, мелкокапельный перенос, минимальное разбрызгивание, хорошее формирование швов. Подчеркивается [86] особая эффективность проволоки ПП-АС4 при сварке протяженных швов на форсированных режимах.

Проволока ПП-АС2 предназначена для сварки во всех пространственных положениях низкоуглеродистых и низколегированных сталей с защитой дуги  $CO_2$  и смесью газов  $Ar + CO_2$ . Проволока обладает хорошими сварочно-технологическими свойствами в широком диапазоне режимов сварки, позволяет выполнять многослойную сварку, не удаляя шлак с промежуточных слоев.

Порошковая проволока ПП-АС10 рутилового типа предназначена для сварки во всех пространственных положениях и может быть использована как в условиях цеха, так и при монтаже.

Применение порошковой проволоки позволяет решать не только проблемы повышения производительности сварки. Основными достоинствами сварки порошковой проволокой являются формирование шва правильной формы с блестящей, гладкой поверхностью, малое разбрызгивание электродного металла, глубокое проплавление корня шва.

В *табл. 60* приведены показатели эффективности применения порошковой проволоки и проволоки сплошного сечения Св-08Г2С при сварке стыкового соединения металла толщиной 20 мм [86].

Порошковые проволоки в сочетании с газовой защитой используются в мире для сварки низкоуглеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высокопрочных, жаропрочных, нержавеющей сталей в судостроении, машиностроении, энергетике, горнодобывающей промышленности и других отраслях.

В последние годы на мировом рынке появилось большое количество марок проволоки с металлическим сердечником (металлкор) для сварки в защитных газах, сочетающих высокую производительность плавления с большим выходом наплавленного металла (95–96%), что присуще сварке проволокой сплошного сечения. Процесс сварки проволокой с металлическим сердечником протекает стабильно, с минимальным разбрызгиванием и образованием

**Таблица 60. Показатели эффективности применения порошковой проволоки и проволоки сплошного сечения Св-08Г2С при сварке стыкового соединения**

Параметры	Формула	ПП-АС2	ПП-АС4	ПП-АС10	Св-08Г2С	
Диаметр, мм	–	1,6	1,6	1,2	1,2	1,6
Производственные затраты $Z_{п}$ , грн/ч	–	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Напряжение дуги U, В	–	30	30	27	23	27
Сила сварочного тока I, А	–	350	360	260	180	300
Количество расплавляемой проволоки P, кг/ч	–	4,8	4,9	3,3	2,2	3,1
Продолжительность работы ПР, ч	–	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Стоимость проволоки K, грн/кг	–	5,8	6,0	7,0	3,1	2,6
Стоимость защитного газа $\Gamma_c$ , грн/л	–	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Коэффициент расхода проволоки $K_p$	–	1,15	1,20	1,20	1,10	1,10
Расход газа $\Gamma_p$ , л/мин	–	18	16,0	13	15	18
Расход газа на 1 кг шва $\Gamma_{ш}$ , л/кг	$\Gamma_{ш} = 60 \cdot \Gamma_p / P \cdot ПР$	321,4	279,8	337,6	584,4	497,7
Масса 1 м сварного шва M, кг/м	$M = V \cdot 7,85$	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
Стоимость 1 кВт/ч электроэнергии $\mathcal{E}_k$ , грн/кВт	–	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Расход электроэнергии на 1 кг шва $\mathcal{E}_p$ , кВт	$\mathcal{E}_p = I \cdot U \cdot ПР / 1000 \cdot P$	1,53	1,54	1,49	1,32	1,83
Стоимость газа на 1 кг шва $\mathcal{E}_r$ , грн/кг	$\mathcal{E}_r = \Gamma_c \cdot \Gamma_{ш}$	7,71	6,72	6,75	11,69	11,94
Стоимость присадочных материалов на 1 кг шва $\mathcal{E}_n$ , грн/кг	$\mathcal{E}_n = K \cdot K_p$	6,67	7,20	8,40	2,86	3,41
Производственные затраты на 1 кг шва $Z_{ш}$ , грн/кг	$Z_{ш} = \frac{3_{ш}}{3_{п} \cdot ПР}$	5,36	5,25	7,79	8,29	11,69
Затраты электроэнергии на 1 кг шва $\mathcal{E}_3$ , грн/кг	$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_p \cdot \mathcal{E}_k$	0,21	0,22	0,21	0,18	0,26
Общие затраты на 1 кг шва $Z_{общ}$ , грн/кг	$Z_{общ} = 3_{ш} + \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_r + \mathcal{E}_3$	19,96	19,38	23,15	26,97	23,36
Затраты на сварку 1 м шва, грн/м	$Z_{общ} \cdot P$	48,89	47,48	56,73	66,08	57,22

благоприятной формы шва. Сварку этой проволокой осуществляют в  $\text{CO}_2$  или смеси газов  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ .

В ИЭС им. Е. О. Патона разработано несколько модификаций проволоки с металлическим сердечником для сварки в защитных газах [87]. Химический состав металла, наплавленного этой проволокой, а также механические свойства металла шва и сварного соединения приведены в табл. 61, 62.

Проволока отличается металлической оболочкой большой толщины, что облегчает ее подачу по направляющему каналу. Небольшое количество неметаллических материалов в сердечнике используют для улучшения характеристик стабильности дугового разряда и регулирования металлургических и технологических свойств шлака. При сварке этой проволокой количество диффузионного водорода в швах не превышает  $3\text{--}5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ .

Проволоку ПП-АН70М диаметром 1,2 (1,4; 1,6) используют для сварки в углекислом газе или его смеси с аргоном. При этом обеспечивается хорошее возбуждение дуги и стабильное ее горение. Многослойные швы выполняют без удаления островков шлака с поверхности предыдущих проходов.

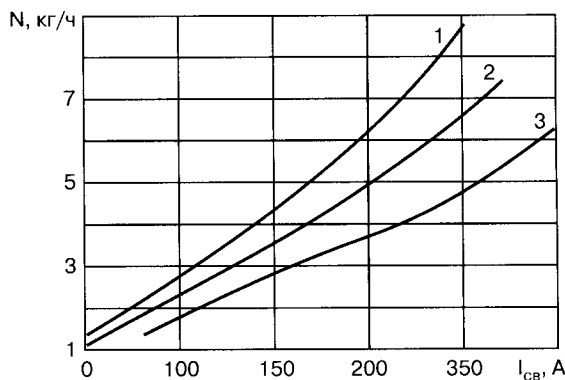
Проволоку ПП-АН72М диаметром 1,2 мм используют для сварки в смеси газов низколегированных сталей с повышенными требо-

**Таблица 61. Химический состав наплавленного металла**

Марка проволоки	Защитный газ	Массовая доля элементов, %					
		C	Mn	Si	Ni	S	P
ПП-АН70М	$\text{CO}_2$	0,07	1,35	0,55	–	0,012	0,015
ПП-АН70М	$\text{Ar} + \text{CO}_2$	0,07	1,45	0,60	–	0,011	0,016
ПП-АН72М	$\text{Ar} + \text{CO}_2$	0,06	1,442	0,45	1,46	0,012	0,015

**Таблица 62. Типичные механические свойства металла шва и сварного соединения**

Марка проволоки	Защитный газ	Испытания на растяжение			Испытания на ударный изгиб	
		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$T_{\text{исп}}$ , °C	KCV, Дж/см <sup>3</sup>
ПП-АН70М	$\text{CO}_2$	525	600	26	–20	110
ПП-АН70М	$\text{Ar} + \text{CO}_2$	530	610	28	–20	120
ПП-АН72М	$\text{Ar} + \text{CO}_2$	535	605	29	–40	95



*Рис. 63. Кривые изменения производительности наплавки  $N$  при использовании порошковой проволоки и проволоки сплошного сечения диаметром 1,2 мм для механизированной сварки: 1 — порошковая проволока с металлическим сердечником; 2 — то же с рутильным сердечником; 3 — проволока сплошного сечения*

ваниями к вязкопластическим свойствам сварных соединений при низких температурах эксплуатации. Проволока обеспечивает качественное формирование швов в диапазоне 250–350 А.

Производительность наплавки порошковой проволокой и проволокой с металлическим сердечником выше, чем при сварке проволокой сплошного сечения (рис. 63) [88].

Самозащитную порошковую проволоку используют для проведения сварочных работ во всех пространственных положениях в условиях строительства и монтажа металлоконструкций (табл. 63) [88].

**Таблица 63. Характеристика самозащитной порошковой проволоки**

Проволока	Диаметр, мм	Назначение
NR-203 Nickel C (Lincoln Electric)	2,0	Сварка строительных металлоконструкций, бурильных установок, секций судов
NR-232 (Lincoln Electric)	1,7; 1,8; 2,0	Сооружение кораблей, барж, прибрежных бурильных платформ, мостов, общие машиностроительные работы
NR-207 (Lincoln Electric)	1,7; 2,0	Сварка монтажных соединений труб
Hobart 81Ni1 (Hobart Brothers)	1,8; 2,0	То же (преимущественно сварка заполняющих и облицовочных проходов)

**Таблица 64. Механические свойства металла швов, выполненных проволокой ПП-АН60 и ПП-АН62**

Марка проволоки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , при T, °C			
				+20	-20	-40	-60
ПП-АН60	635,1	525,3	23,3	140,1	68,1	57,5	52,5
ПП-АН62	590,0	480,1	22,1	90,0	65,5	35,1	—

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана самозащитная порошковая проволока марок ПП-АН60 и ПП-АН62 диаметром 1,6 мм для сварки во всех пространственных положениях конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, заменяющая более дорогие зарубежные аналоги [88, 89].

Сравнительные характеристики механических свойств металла швов, выполненных различной порошковой проволокой, приведены в табл. 64.

Легирование швов никелем и ограничение в них серы позволило рекомендовать проволоку ПП-АН60 для сварки конструкций из низколегированных сталей с пределом текучести 490 МПа, а проволоку ПП-АН62 — для сварки сталей с пределом текучести 440 МПа.

**Защита зоны сварки.** Защита зоны сварки от воздуха или подавление его вредного влияния на сплошность и свойства металла — необходимые условия для получения качественных швов при всех способах сварки плавлением.

При современных способах дуговой сварки широко используют защиту шлаками, газами и парами. Выполняя свою основную функцию защиты расплавленного металла от воздуха, защитные среды оказывают огромное влияние на физические, металлургические и технологические характеристики процесса сварки: характер и стабильность дугового разряда, плавление и перенос электродного металла, плавление основного металла, формирование швов, взаимодействие металла с окружающей средой, механические и другие свойства сварных соединений.

При выборе защитной среды учитывают следующие основные факторы:

- влияние защитной среды на стабильность горения дуги, характер переноса электродного металла, потери на разбрызгивание и угар;
- формирование швов, их стойкость против образования пор и трещин;

- обеспечение свариваемости определенной группы или марки сталей, а также других материалов;
- экономичность, т. е. затраты и выгода от использования той или иной защитной среды.

**При сварке плавящимся электродом в защитных газах** используют инертные (аргон, гелий или их смеси) и активные газы ( $\text{CO}_2$ , газовые смеси на основе аргона с добавками  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  или обоих газов и др.) В последнее десятилетие интерес к сварке в смесях защитных газов, особенно на постсоветском пространстве, значительно возрос.

**Смеси на основе аргона** с добавками кислорода или углекислого газа, а также кислорода и  $\text{CO}_2$  стабилизируют дугу, уменьшают разбрызгивание металла, полученные швы имеют гладкую ровную поверхность без подрезов, с плавным переходом к основному металлу и благоприятную форму проплавления [90].

Введение в аргон 1%  $\text{O}_2$  уже способствует стабилизации формирования шва, а при добавке 5% перенос металла улучшается и существенно уменьшается разбрызгивание. Присутствие слабоокислительной среды понижает поверхностное натяжение расплавленного металла, что приводит к снижению пористости и улучшению конфигурации шва.

Для дуговой сварки плавящимся электродом углеродистых сталей весьма широко применяют смесь аргона с 20–25% углекислого газа. Менее распространена смесь аргона с 8–18% углекислого газа, а также смесь аргона с углекислым газом (20%) и кислородом (3–5%) [93]. Смеси, содержащие три и четыре компонента, включают еще один инертный газ — гелий (например, 60% Ar + 30% He + 10%  $\text{CO}_2$ , 75% Ar + 15% He + 10%  $\text{CO}_2$ ) [91].

Добавка к активному защитному газу гелия способствует повышению жесткости дуги, улучшению проплавления и формы шва, что является результатом возрастания напряжения на дуге и увеличения ее энергии.

Газовые смеси различного состава поставляют в баллонах, либо защитную газовую смесь на основе аргона приготавливают на предприятии-потребителе защитных газов при помощи газовых смесителей [93, 94]. Согласно [95], при длительном хранении смеси защитных газов в баллонах ухудшается качество сварки, и процесс становится аналогичным сварке в чистом углекислом газе.

Качественные швы могут быть получены только при надежной защите зоны сварки. Сплошную прямолинейную струю, окружающую

щую электрод, наиболее часто используют для защиты зоны сварки. Иногда применяют боковой подвод газа, кольцевую защиту, двухслойную кольцевую защиту, импульсную подачу защитного газа и др. [90].

С увеличением плотности защитного газа и скорости его истечения повышается устойчивость (жесткость) газовой струи, которая затрудняет сдувание струи внешними потоками воздуха. Поэтому при увеличении диаметра сопла для сохранения устойчивости струи необходимо одновременно увеличивать расход газа.

Эффективность защиты в значительной степени определяется конструкцией и размерами горелки, которые выбирают с учетом рода защитного газа, типоразмера сварного соединения и режима сварки [92, 93]. При уменьшении расстояния между горелкой и деталью защита улучшается. Обычно это расстояние составляет 10–30 мм. Качество защиты зоны сварки существенно ухудшается при движении окружающего воздуха (ветер, сквозняк). Вредное влияние ветра уменьшают за счет увеличения расхода газа, применения переносных ветрозащитных устройств (коллапов, щитков, палаток), а также специальных конструкций горелок.

В [96] приведена оценка конкурентоспособности вариантов защитных атмосфер при сварке плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей. При этом применяли способ многокритериального ранжирования, суть которого заключается в использовании функции принадлежности. Эта функция определена в интервале 0–1 и используется в качестве безразмерной шкалы для оценки параметров сравниваемых объектов. Каждому фактическому значению функции придается конкретный экономический смысл, связанный с уровнем конкурентоспособности исследуемой защитной среды. Значения функции принадлежности, равные 0 и 1, соответствуют неприемлемому и полностью приемлемому значениям параметров. Наивысшее значение получает вариант с наибольшим суммарным результатом по всем одинаковым показателям. После этого в соответствии с разработанным интервалом от 0 до 1 определяют уровень конкурентоспособности вариантов.

Для сравнения конкурентоспособности вариантов защиты находили положение на шкале от 0 до 1, которое займет исследуемый вариант. Чем выше суммированное значение функции и чем ближе оно к 1, тем выше конкурентоспособность варианта защитной атмосферы по показателям, характеризующим его защитные свойства. Суммированные значения функции является средним геомет-



<i>Значение функции принадлежности</i>	<i>Характеристика качества</i>
1,00	Вариант отвечает всем требованиям к технологии и качеству, его улучшение не имеет смысла
1,00–0,80	Вариант обеспечивает отличное качество швов и соответствует современным требованиям к технологии
0,80–0,63	Вариант обеспечивает хорошее качество швов и соответствует требованиям к технологии
0,63–0,37	Вариант обеспечивает удовлетворительное качество сварки, требующее различных доработок
0,37–0,20	При применении этого варианта получали плохое качество сварных соединений, не полностью соответствующих технологическим нормам и требованиям
0–0,20	При применении этого варианта обнаружено абсолютно неприемлемое качество сварных соединений (трещины, поры, технология неудовлетворительна по показателям безопасности, экологии и экономическим показателям)

рическим значением функций принадлежности по различным группам параметров.

Значения функции принадлежности применительно к оценке вариантов защиты зоны сварки и их характеристика приведены в *табл. 65* [96].

В *табл. 66* приведены значение функции принадлежности  $\mu$  и фактические значения параметров  $X$ , соответствующие узловым точкам этой функции, по каждому показателю, характеризующему определенный вариант защиты, а также вычисленные суммарные значения функций по группам показателей и суммарные значения функций принадлежности для выполнения сварки в различных защитных газах.

Согласно полученным результатам, наиболее конкурентоспособными являются способы сварки в смесях на основе аргона: 18%  $\text{CO}_2$  + 82%  $\text{Ar}$ , 20%  $\text{CO}_2$  + 78%  $\text{Ar}$  + 2%  $\text{O}_2$  и 12%  $\text{CO}_2$  + 86%  $\text{Ar}$  + 2%  $\text{O}_2$ . Последний состав соответствует самому высокому суммарному значению функции принадлежности.

В сварочных технологиях широко используют шлаки для защиты зоны сварки. Наиболее полно защиту шлаками реализуют при **сварке под флюсом**, где образование капель при плавлении элект-

**Таблица 66. Значение функции принадлежности при различных составах защиты зоны сварки**

Показатель	CO <sub>2</sub>		18% CO <sub>2</sub> + + 82% Ar		20% CO <sub>2</sub> + 78% Ar + 2% O <sub>2</sub>		12% CO <sub>2</sub> + 86% Ar + 2% O <sub>2</sub>		3% O <sub>2</sub> + + 97% Ar	
	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ
<b>Свариваемость</b>										
Сопrotивление металла шва образованию горячих трещин, мм/мин	12,5	0,1602	19	0,893	19,5	0,9447	15,6	0,5106	14,6	0,3947
Стойкость металла шва против образования холодных трещин	0,3	0,3	0,65	0,65	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8
Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре -40°C	25	0,1998	50	0,7963	53	0,8613	51	0,8186	52	0,8403
Совершенство защиты (взаимодействие металла с газом)	0,2	0,2	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9
<b>Служебные характеристики</b>										
Предел прочности, МПа	545	0,4508	580	0,7563	585	0,803	583	0,784	590	0,8508
Предел текучести, МПа	401	0,809	395	0,7503	392	0,720	390	0,700	385	0,650
Относительное удлинение, %	27,0	0,196	30,0	0,502	29,5	0,451	29,0	0,400	28,0	0,298
Относительное сужение, %	62,4	0,424	65	0,749	63,5	0,561	63	0,499	60	0,127
<b>Технологические свойства</b>										
Производительность, кг/ч, при I = 200–210 А, U = 21–26 В	2,3	0,149	3,7	0,8503	3,7	0,8503	3,1	0,550	3,0	0,499
Кoэффициент потерь электродного металла на разбрызгивание, %	4,7	0,075	3,8	0,300	3,2	0,449	1,4	0,899	1,4	0,899

Продолжение таблицы 66

Показатель	CO <sub>2</sub>		18% CO <sub>2</sub> + + 82% Ar		20% CO <sub>2</sub> + 78% Ar+2% O <sub>2</sub>		12% CO <sub>2</sub> + 86% Ar+2% O <sub>2</sub>		3% O <sub>2</sub> + + 97% Ar	
	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ
Коэффициент набрызгивания, %	1,5	0,25	0,3	0,85	0,2	0,9	0,2	0,9	0,2	0,9
Формирование шва b/h	2,4	0,133	3,2	0,399	3,3	0,433	3,3	0,433	3,4	0,46
Возможность сварки током прямой полярности	0	0,1	1	0,99	1	0,99	1	0,99	1	0,99
Чешуйчатость	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Плавность перехода от основного металла к наплавленному	0,3	0,3	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Высота выпуклости, мм	2,5	0,3734	2,2	0,7523	2,2	2,2	2,2	0,7523	2,2	0,7523
Состояние поверхности шва	0,2	0,2	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,95	0,95
<b>Эргономические показатели</b>										
Выделение биологически активных веществ (содержание СО в дуге, %)	90	0,163	18	0,631	20	0,613	14	0,674	0	0,931
Наличие излучения	0,9	0,9	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Возможность сварки в ограниченном объеме	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
Выделение аэрозолей	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
<b>Экономические показатели</b>										
Цена газовой смеси, бел. руб.	8718	0,95043	17495	0,1936	17767	0,1631	17847	0,1631	18987	0,0742
Цена сварочной проволоки, бел. руб.	800	0,249	520	0,9492	520	0,9492	520	0,9492	520	0,9492

Продолжение таблицы 66										
Показатель	CO <sub>2</sub>		18% CO <sub>2</sub> + + 82% Ar		20% CO <sub>2</sub> + 78% Ar + 2% O <sub>2</sub>		12% CO <sub>2</sub> + 86% Ar + 2% O <sub>2</sub>		3% O <sub>2</sub> + + 97% Ar	
	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ	x	μ
Суммарное значение функции по свариваемости		0,2093		0,7256		0,6955		0,6955		0,6990
Суммарное значение функции служебных свойств		0,4172		0,6796		0,5752		0,5752		0,3803
Суммарное значение функции технологических свойств		0,1668		0,6645		0,7482		0,7482		0,7695
Суммарное значение функции эргономических показателей		0,3195		0,47981		0,4877		0,4877		0,5681
Суммарное значение функции экономических показателей		0,4865		0,4286		0,3928		0,3928		0,2654
Суммарное значение функции принадлежности		0,2957		0,5831		0,6028		0,6028		0,4987

родов и их перенос происходят в газовом пузыре, заполненном парами металла и флюса. Взаимодействие с атмосферными газами практически исключается.

Согласно ГОСТ 9087-81 по способу изготовления флюсы делят на плавленные, керамические, спеченные и флюсы-смеси. Плавленные флюсы получают путем плавления компонентов в электрических или пламенных печах. Технология изготовления керамических флюсов предусматривает получение смесей порошкообразных материалов, их скрепление с помощью клеящих веществ, преимущественно жидкого стекла, последующую грануляцию, сушку и прокаливание. Спеченные флюсы получают спеканием компонентов шихты при высоких температурах без плавления. Флюсы-смеси изготавливают механическим смешиванием частиц различных материалов или флюсов.

Хотя по технологии изготовления агломерированные и керамичес-

**Таблица 67. Классификация флюсов по их химическому составу**

Символ	Основные компоненты	Тип флюса
MS	$\text{MnO} + \text{SiO}_2 > 60\%$ ; $\text{CaO} < 15\%$ ; $\text{ZrO}_2 < 5\%$	Марганец-силикатный
CS	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 > 60\%$ ; $\text{CaO} > 15\%$	Кальций-силикатный
AR	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 > 45\%$	Алюминатно-рутиловый
AB	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{CaF}_2 > 55\%$ ; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$ ; $\text{CaF}_2$ (общее содержание F) $\leq 20\%$	Алюминатно-основной
FB	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{CaF}_2 > 50\%$ ; $\text{SiO} \leq 20\%$ ; $\text{CaF}_2$ (общее содержание F) $\geq 15\%$	Флюоритно-основной
W	Флюсы, состав которых не подпадает ни под один из указанных типов	Прочие

кие флюсы несколько отличаются, в отечественной терминологической практике их идентифицируют как флюсы, относящиеся к одному способу изготовления.

В мировой практике распространена классификация флюсов по химическому составу, предложенная Международным институтом сварки (МИС), приведенная в табл. 67 [97].

Для сварки сталей преимущественно применяют оксидные и силикатные флюсы — шлаки. По химическому составу шлакообразующей части эти флюсы делят на кислые, нейтральные и основные. Для качественного определения индекса основности флюса  $B$  используют формулу, рекомендованную Международным институтом сварки:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + 0,5(\text{MnO} + \text{FeO})/\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}{\text{SiO}_2}$$

где CaO, MgO и др. — массовое количество соответствующего соединения во флюсе, %; при  $B > 1,5$  флюс относится к основному типу, при  $B < 1$  — к кислому; а при  $1,0 < B < 1,5$  — к нейтральному.

Кислые флюсы обеспечивают хорошие сварочно-технологические свойства. Однако кремний и марганцевосстановительные процессы, характерные для этих флюсов, снижают уровень механических свойств металла сварных швов. Основные флюсы препятствуют переходу кислорода, кремния и марганца в наплавленный металл, но обладают худшими, по сравнению с кислыми флюсами,

<b>Таблица 68. Свойства флюсов в зависимости от основности</b>					
<i>Свойство</i>	<i>MS</i>	<i>CS</i>	<i>AR</i>	<i>AO</i>	<i>FB</i>
Индекс основности ( <i>BI</i> )	≤0,8	0,7–1,2	0,7–1,4	1,0–2,0	≥2,0
Формирование металла шва	+++	++	+++	++	+
Стойкость против образования пор	+	++	+	++	+++
Стойкость против образования трещин	+	+	+	++	+++
Отделимость шлаковой корки	++	++	+++	+++	+
Подавление выделения сварочного аэрозоля	+	+	+	+++	+++
Стабильность горения дуги	++	++	+++	+++	+
Возможность сварки с высокой плотностью тока	+++	+++	++	++	+
Возможность сварки с высокой скоростью	+++	++	+++	++	+
Подавление кремний-восстановительного процесса	+	+	++	++	+++
Подавление перехода кислорода в металл шва	+	+	+	++	+++
Подавление насыщения водородом сварочной ванны	+	+	+	++	+++
Рафинирование сварочной ванны по сере	+	+	+	++	+++
<i>Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: + – удовлетворительно; ++ – хорошо; +++ – отлично.</i>					

сварочно-технологическими свойствами. Нейтральные флюсы обладают сочетанием свойств, характерных для кислых и основных флюсов. Обобщенная характеристика свойств различных типов флюсов представлена в *табл. 68* [97].

При сварке углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением  $\sigma_B < 450$  МПа целесообразно использовать флюсы типа MS, CS или AR, которые обеспечивают высокую производительность и отличное формирование шва.

При сварке низколегированных сталей повышенной прочности ( $\sigma_B > 450$  МПа), к сварным соединениям которых предъявляют требование по обеспечению хладостойкости при температурах ниже минус 20°C, необходимо использовать нейтральные или слабосиловые флюсы типа CS, AR, AB.

Для сварки сталей более высокой прочности, чтобы исключить опасность образования холодных трещин, применяют высокоосновные флюсы типа АВ или ВВ.

Важным показателем флюса, влияющим на его сварочно-технологические свойства и качество сварных соединений, является содержание в нем влаги. Допустимый уровень содержания влаги во флюсе регламентируется техническими условиями на флюс и обычно находится в пределах 0,05–0,1%. Этот показатель определяет также защитные свойства флюса. С целью снижения содержания влаги во флюсе его сушат перед сваркой, причем в зависимости от физико-химических свойств флюса температура сушки может достигать 950°C [97]. Чем выше содержание влаги во флюсе перед сваркой, а точнее, содержание в нем водорода, тем больше вероятность возникновения пор в металле шва и большее насыщение последнего водородом.

Авторами [98] проведен анализ существующей технологии производства плавящихся флюсов для определения тех ее этапов, которые вносят наибольшую долю потенциального водорода во флюс. Было установлено, что сырьевые компоненты, применяемые при изготовлении сварочных плавящихся флюсов, содержат значительное количество водорода, которое существенно снижается при плавлении компонентов флюса по существующей технологии (в электрической или газопламенной печи с последующей мокрой грануляцией расплава).

Флюсы стекловидного строения (АН-348А, ОСЦ-45, ОСЦ-45М), в зернах которых микропустоты почти отсутствуют, содержат 30–36 см<sup>3</sup> Н<sub>2</sub>/100 г флюса. Пемзовидный флюс АН-60 содержит 62 см<sup>3</sup> Н<sub>2</sub>/100 г.

При выплавке флюса в газопламенной печи водород растворяется во флюсе в большем количестве, чем при плавке в электродуговой печи. Электроплавящиеся флюсы характеризуются тем, что десорбция водорода протекает при более низких температурах.

Показано [98], что прокалка флюса (ГОСТ 9087-81) перед сваркой при температуре 400°C позволяет удалить только влагу, которую адсорбировали зерна флюса при его хранении. Что касается водорода, растворенного во флюсах при плавке в печи, то он остается после прокаливания при температурах выше 800°C.

Установлено, что содержание диффузионного водорода в наплавленном металле при сварке под флюсами АН-60, АН-66, АН-67А, изготовленными в электрической печи, ниже (около 6–7 см<sup>3</sup>/100 г),

чем под флюсом АН-348А, выплавленном в газопламенной печи (до  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ). Меньшее содержание диффузионного водорода в наплавленном металле обеспечивается при сварке под опытным флюсом АН-60СМ, изготовленном путем дробления, отсева и магнитной сепарации шлаковой корки флюса АН-60 ( $2,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ), т. е. в последнем случае были исключены операции выплавки в печи и мокрой грануляции.

Авторами [98] было показано, что критическое содержание водорода в сварном шве, при котором начинают образовываться поры, для всех трех флюсов (АН-348А, АН-60СМ и АН-60) приблизительно одинаково и составляет  $12\text{--}14 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  металла шва.

В последнее десятилетие в мировой практике широкое распространение получили агломерированные (керамические) флюсы [99]. Такие флюсы в сочетании с низколегированной малоперлитной порошковой проволокой дают возможность рафинировать, микролегировать и модифицировать металл шва, управлять составом и распределением неметаллических включений, обеспечивать его более надежную защиту от влияния воздуха, так как оказывают определенное воздействие на состав газовой фазы в зоне горения сварочной дуги.

При использовании агломерированных флюсов применяют различные средства для снижения содержания водорода и повышения стойкости сварных соединений против образования холодных трещин. Опыт применения агломерированных флюсов для сварки низколегированных сталей, используемых при изготовлении сварных конструкций мостов, судов, труб, подтвердил сварочные свойства самих флюсов и способность их обеспечить выполнение повышенных требований к металлу швов и сварных соединений.

Необходимо отметить, что механические свойства сварных швов, их стойкость против образования холодных и горячих трещин и основные служебные характеристики сварных соединений во многом обеспечиваются правильным выбором флюса и электродной проволоки, что является важным элементом технологического процесса.

Для дуговой сварки плавящимся электродом алюминия и алюминиевых сплавов применяют флюсы, состоящие из хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов (табл. 69) [10]. Эти флюсы обладают легкоплавкостью, малой плотностью, хорошей смачиваемостью поверхности свариваемого металла, способностью растворять или абсорбировать оксидную пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,



**Таблица 69. Состав флюсов для сварки алюминия и его сплавов, % (по массе)**

Составляющие вещества	Марки флюсов при сварке												
	полуоткрытой дугой						закрытой дугой				электрошлаковой		
	АН-А1	МАТИ-1	МАТИ-1А	МАТИ-10	АФ-5	АН-А4	ЖА-6А	ЖА-6АА	ЖА-70П	ЖА-72П	АН-А301	АН-А302	АН-А304
Хлористый калий	50	34	47	30	50	57	43	38	До 46	34–40	50	40	–
Хлористый натрий	20	43	–	–	10	–	17	15	15–19	14–17	–	35	–
Криолит	30	23	3	2	–	–	36	43	20–44	36–46	–	–	–
Хлористый барий	–	–	–	68	40	28	–	–	–	–	20	–	–
Кварцевый песок	–	–	–	–	–	–	4	До 1	3–5	До 1	–	–	–
Фтористый кальций	–	–	–	–	–	–	–	3	–	4–6	–	–	15
Хлористый литий	–	–	8	–	–	–	–	–	–	–	20	15	–
Фтористый литий	–	–	–	–	–	7,5	–	–	–	–	8	–	25
Фтористый натрий	–	–	42	–	–	–	–	–	–	–	–	6	60
Фтористый алюминий	–	–	–	–	–	7,5	–	–	–	–	2	4	–

малой гигроскопичностью. Они обеспечивают устойчивое горение дуги, формирование шва, требуемые механические свойства шва.

Механизированную сварку алюминия выполняют под флюсом (закрытой дугой) и по слою флюса (полуоткрытой дугой).

Для дуговой сварки титана и его сплавов под флюсом применяют бескислородные флюсы АНТ-1, АНТ-3, АНТ-7 и др.

**Сварочное оборудование.** Универсальная классификация сварочного оборудования предусматривает использование нескольких групп признаков [100]. Не вдаваясь в детали этой классификации, отметим, что механизированную дуговую сварку плавящимся электродом выполняют при наличии источника питания, устройства подачи электродной проволоки и перемещения сварочного инстру-

мента, узлов и элементов, выполняющих различные вспомогательные функции, блока управления и диагностики, которые во многом определяют качество сварных швов и производительность сварочной операции.

Влияние **источника питания** на энергетические и технологические характеристики процесса сварки определяется прежде всего родом и силой сварочного тока, статическими и динамическими характеристиками трансформатора или выпрямителя.

Источники питания классифицируют по роду тока (переменный или постоянный) и способу регулирования [101, 102, 103].

Сварочные трансформаторы относятся к наиболее простым и достаточно надежным в эксплуатации аппаратам. Необходимо констатировать, что в настоящее время ни в Украине, ни в России не производят современные трансформаторы, обеспечивающие высокую стабильность процесса сварки под флюсом. На мировом рынке современные трансформаторы для сварки под флюсом предлагают фирмы Lincoln Electric (AC-1250) и ESAB (TAF-1250).

В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона разработан ряд способов и устройств повышения устойчивости сварочных дуг и стабильности сварки переменным током [104]. Оснащение сварочных трансформаторов устройствами стабилизации горения дуги расширяет технологические возможности сварки переменным током, обеспечивает повышение качества и производительности работ. Применяя эти устройства, можно понизить напряжение холостого хода сварочных трансформаторов, сократить расход материалов на их изготовление и потери электроэнергии при эксплуатации.

Источники постоянного тока, как правило, обеспечивают более высокую стабильность процесса сварки. Широкое распространение в сварочном производстве получили однопостовые и многопостовые выпрямители. Выпрямители с механическим регулированием сварочного тока используют при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Для получения падающих вольт-амперных характеристик (ВАХ) и регулирования сварочного тока применяют две системы регулирования: трансформаторы с подвижными шунтами и подвижными катушками. Они, безусловно, просты и надежны в эксплуатации, имеют хорошие сварочные свойства, их широко применяют в промышленности Украины и России, но их массогабаритные характеристики не отвечают современным требованиям.

Несмотря на появление новых инверторных систем управления, сварочные выпрямители с тиристорным регулированием остаются

одним из важнейших источников питания для дуговой сварки. Их используют для работы в цехах крупных предприятий и строительстве, обеспечивая надежность и долговечность при интенсивных режимах эксплуатации. Выпрямители с жесткими ВАХ применяют для механизированной сварки в защитных газах плавящимся электродом сплошной и порошковой проволокой стали, алюминия и других сплавов. В отдельных случаях возможна сварка под флюсом. Выпуск выпрямителей только с жесткими ВАХ ограничивает возможности самого способа тиристорного регулирования, снижает технологические возможности источников питания. Предприятия Украины и России практически не выпускают выпрямители с только жесткими ВАХ.

Наиболее целесообразен выпуск универсальных тиристорных выпрямителей с жесткими и падающими ВАХ. В этом случае в зависимости от вида характеристик и диапазона силы тока обеспечивается механизированная сварка в защитных газах сплошной и порошковой проволокой, а также дуговая сварка покрытыми электродами и сварка под флюсом.

Подобные выпрямители выпускает ряд зарубежных фирм. Фирма Lincoln Electric производит серию DC на силу тока 400, 600, 1000 и 1500 А. Последние две модели ориентированы в основном на сварку под флюсом. Несмотря на наличие регулируемой индуктивности в сварочной цепи, в моделях на ток 400 и 600 А предусмотрена возможность изменения наклона жестких ВАХ при сварке проволокой в защитных газах, что влияет на динамику колебаний силы тока в сварочной цепи и управляет пинч-эффектом, снижает уровень разбрызгивания, способствует оптимальному переносу металла и формированию шва.

Модели фирмы ESAB — ESAB Mig на силу тока 400, 500 и 630 А предназначены для механизированной сварки в защитных газах и сварки покрытыми электродами.

В настоящее время ряд заводов Украины и России выпускает значительное число универсальных тиристорных выпрямителей на ток от 315 до 1250 А для всех видов сварки. ОАО «СЭЛМА» (г. Симферополь) выпускает сварочные выпрямители ВДУ-506С, ВДУ-601С, ВДУ-800 и др. Следует отметить универсальные выпрямители, разработанные ОАО «СЭЛМА» — ВД-306ДК, ВД-506ДК и ВДУ-509. Эти выпрямители имеют регулируемый наклон падающих и жестких ВАХ, расширяющих возможности сварки покрытыми электродами и плавящимся электродом в защитных газах [105].

В них впервые реализованы комбинированные внешние вольт-амперные характеристики, где каждый участок характеризует определенную стадию плавления и переноса капли электродного металла и позволяет реализовать новые подходы к управлению процессом и массопереносом. При этом ВАХ делится на составные участки, каждый из которых формируется собственным независимым источником. Выпрямители имеют возможность регулировать угол наклона ВАХ, силу тока короткого замыкания, горячий старт.

На рис. 64 приведены гистограммы распределения длительности коротких замыканий на выпрямителях ВД-506ДК и ВДУ-506 в режиме МИГ. Согласно этим данным длительность коротких замы-

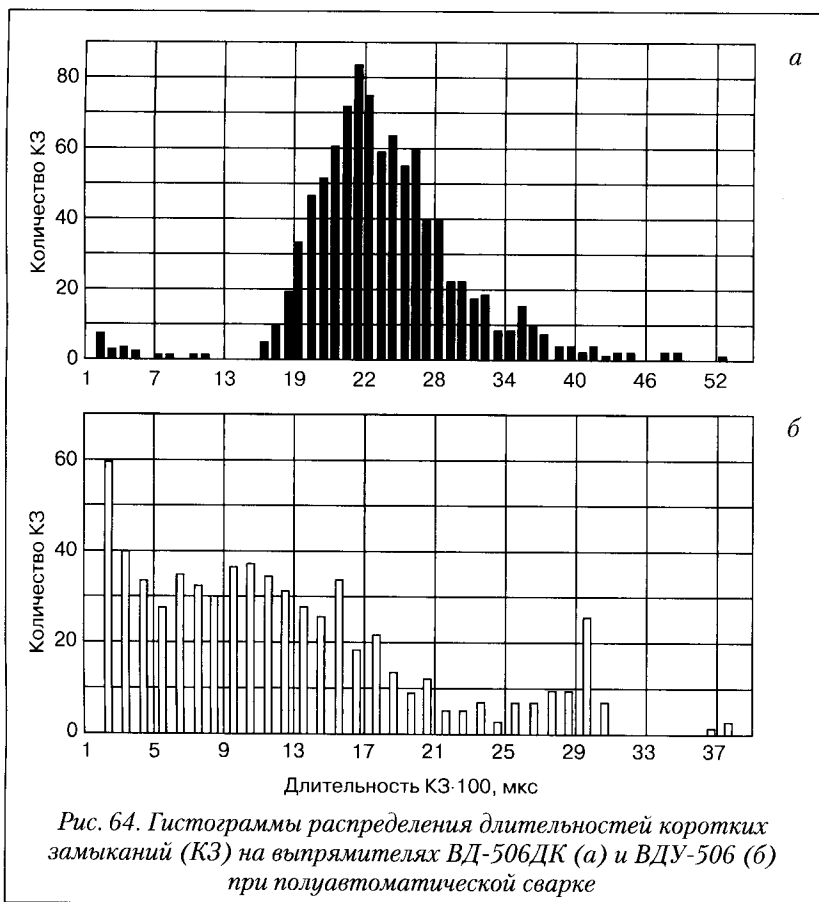


Рис. 64. Гистограммы распределения длительностей коротких замыканий (КЗ) на выпрямителях ВД-506ДК (а) и ВДУ-506 (б) при полуавтоматической сварке

каний на выпрямителях с комбинированной характеристикой достаточно стабильна в отличие от длительности коротких замыканий на традиционном выпрямителе ВДУ-506.

В выпрямителе ВДУ-509 рабочая точка при горении дуги может переключаться с жесткого участка ВАХ (применяется при сварке в вертикальном и потолочном пространственных положениях на силе тока до 280 А проволокой диаметром 1,6 мм, а также для формирования сварного шва с вогнутой поверхностью при сварке угловых соединений) на падающий участок ВАХ (применяется при сварке в нижнем пространственном положении). Сообщается [105] о существенном снижении разбрызгивания при питании дуги от этого источника.

КЗЭСО (г. Каховка) выпускает выпрямители КИУ-301, КИГ-401 и КИУ-501, предназначенные для механизированной дуговой сварки в углекислом газе и смесях газов на основе аргона электродной проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой. Универсальный выпрямитель КИУ-501 можно применять также для дуговой сварки под флюсом, ручной дуговой сварки покрытыми электродами и воздушно-дуговой резки угольным электродом.

Проводились сравнительные исследования технологических свойств выпрямителей КИГ-401, КИУ-501, ВС-400 и ВДУ-506 при сварке в  $\text{CO}_2$  [106]. Установлено, что при использовании выпрямителей КИГ-401 и КИУ-501 во всем диапазоне режимов сварки дуга зажигается практически мгновенно после одного-двух соприкосно-

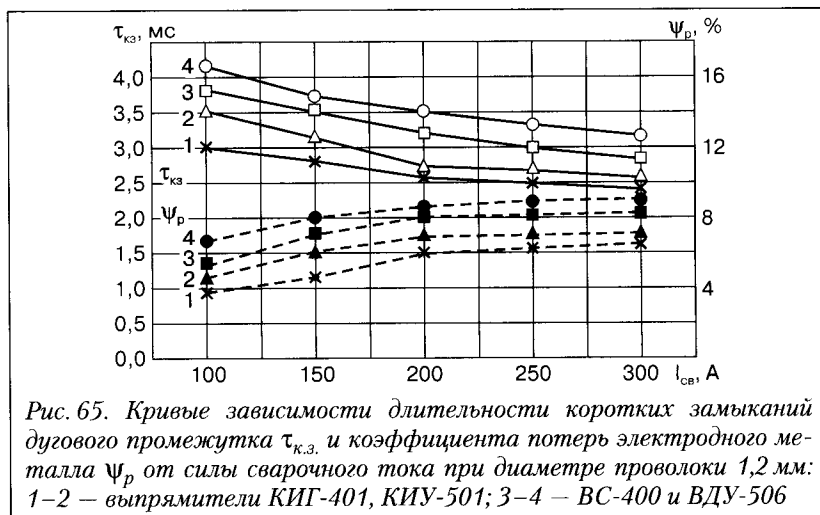


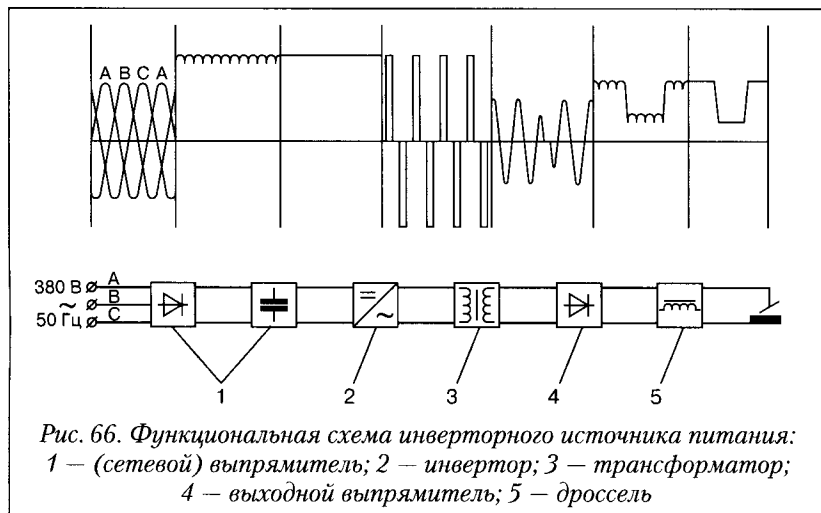
Рис. 65. Кривые зависимости длительности коротких замыканий дугового промежутка  $\tau_{к.з.}$  и коэффициента потерь электродного металла  $\Psi_p$  от силы сварочного тока при диаметре проволоки 1,2 мм: 1–2 — выпрямители КИГ-401, КИУ-501; 3–4 — ВС-400 и ВДУ-506

вений проволоки с поверхностью образца. По степени увеличения потерь электродного металла на разбрызгивание выпрямители можно расположить в следующем порядке: КИГ-401, КИУ-501, ВС-400 и ВДУ-506 (рис. 65). В обратном порядке следует расположить выпрямители по длительности коротких замыканий.

Выпрямители КИГ-401 и КИУ-501 вполне пригодны для сварки в смеси защитных газов на основе аргона и углекислого газа, в том числе в импульсном режиме горения дуги. Они обеспечивают стабильный процесс сварки порошковой проволокой и проволокой из алюминиевых сплавов.

ОАО «Завод Электрик» (г. Санкт-Петербург, Россия) выпускает универсальные выпрямители ВДУ-3020, ВДУ-502-2, ВДУ-506Э, ВДУ-601Э, ВДУ-1202. Выпрямитель ВДУ-502-2 дополнительно имеет возможность регулировать наклон жесткой вольт-амперной характеристики.

В последние годы широкое распространение получают инверторные источники питания. Функциональная схема инверторного источника питания показана на рис. 66 [107]. Напряжение сети промышленной частоты (в данном примере трехфазной, 380 В) преобразуется входным выпрямителем в постоянное порядка 500 В. Это напряжение в свою очередь преобразуется с помощью инвертора в переменное повышенной частоты (от единиц до десятков кГц), которое затем поступает на понижающий высокочастот-



ный трансформатор. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на диодный выпрямитель, к выходу которого через сглаживающий дроссель подключены электрод и изделие.

Питание трансформатора напряжением высокой частоты позволяет существенно снизить расход материалов, идущих на его изготовление. При частоте питающего напряжения 10 кГц масса трансформатора и его габаритные размеры уменьшаются примерно в 3 раза, а при частоте 50 кГц — уже в 15–17 раз. Например, расчетная масса трансформатора мощностью 20 кВ·А при питании напряжением частотой 50 Гц составляет 120 кг, а при 50 кГц — 7 кг. Такое уменьшение массы активных материалов способствует существенному снижению (в 25 раз) потерь мощности, а значит, росту КПД.

Современные мощные транзисторы по сравнению с тиристорами имеют более высокие коммутационные свойства и могут преобразовать частоту напряжения и тока до 100 кГц. Из всех типов транзисторов, которые можно применять в сварочных инверторах, наибольшее распространение получили транзисторы IGBT благодаря легкости управления, способности устойчиво работать с пиковыми токовыми нагрузками, возможности безопасной работы в широкой области, стойкости к перенапряжениям.

Инверторные выпрямители имеют ряд достоинств [107, 108, 109]. Первым и одним из главных достоинств инверторных источников питания является их малая масса. Поэтому они нашли применение прежде всего при выполнении монтажных и ремонтных работ. Из-за малой чувствительности инверторов к колебаниям питающей сети появилась возможность применять сетевые кабели большой длины, что особенно важно в условиях строительных площадок. В качестве второго достоинства следует отметить возможность перехода с аналогового (в тиристорных схемах) на цифровое управление с помощью микропроцессоров. В этом случае решаются многие технологические задачи путем управления формой тока в динамике с высокой быстротой действия (со скоростью срабатывания до 1000 А/мс) и получения различного рода токов (постоянный, импульсный средней и высокой частоты, переменного-постоянный) для многих способов сварки. Третье достоинство — ресурсосбережение, выражающееся в возможности многократного сокращения расхода таких материалов, как медь либо алюминий, а также трансформаторной стали. Наконец, четвертое — это энергосбережение благодаря более высоким, чем у источников традиционного исполнения, КПД и коэффициенту мощности.

Период бурного развития инверторной техники за рубежом завершился примерно к 2001 г., и в настоящее время идет процесс совершенствования и модернизации. В наиболее простом варианте инверторный источник позволяет выполнять механизированную сварку плавящимся электродом в защитных газах низколегируемых и коррозионностойких сталей и алюминия. Используется также при сварке порошковой проволокой. Особенностью высокочастотных инверторов является высокая стабильность и качество сварки различных материалов в широком диапазоне толщин с минимальным разбрызгиванием металла. Такое оборудование в ряде случаев обеспечивает высококачественную сварку электродами со всеми видами покрытий. Сварка неплавящимся электродом обычно является дополнительной функцией. При импульсной сварке плавящимся электродом в смеси газов появляется возможность получения импульсов тока различной частоты и формы. При достаточной технологической проработке это свойство может улучшить качество сварных соединений. Например, введение функции двойного импульса улучшило чистку металла при сварке алюминия, в результате чего сварной шов формируется того же вида, что и при сварке вольфрамовым электродом.

Все современные инверторные источники питания снабжены цифровыми дисплеями, в отдельных применена система «Минилог», обеспечивающая возможность переключения двух режимов сварки на сварочной горелке. В настоящее время наиболее распространена сварка плавящимся электродом конвекционным способом с отдельным регулированием скорости подачи проволоки и сварочного напряжения. В то же время значительно расширяется область применения синергетического способа регулирования одной кнопкой. Такой режим решает проблему установки правильного соотношения подачи проволоки и напряжения для каждого вида сварки в зависимости от ряда исходных параметров (диаметра электродной проволоки, вида свариваемого материала, вида защитных газов, функции заварки кратера, параметров импульсной сварки и др.). Контроль за сваркой и все виды управления осуществляются с панели управления или отдельных пультов. Например, установка «AristoMig Universal» фирмы ESAB имеет 200 программ для обычной импульсной сварки. Полуавтомат фирмы KEMPP1 выполняет 20 программ.

Особым своим достижением фирма «Cloos Schweissttechnik» считает серию из четырех универсальных источников питания с



компьютерным управлением (от GLS353 Quinto «Profi» на силу тока 300 А до GLS603 Quinto «Profi» на силу тока 600 А). Инвертор этих источников работает на частоте 50 кГц, и благодаря этому система управления обладает очень высокой быстротой действия, которое, в частности, обеспечивает надежное поджигание дуги при сварке тонкой алюминиевой проволокой. Надежному возбуждению способствует и так называемый мягкий старт. Возможно применение инверторов и при импульсной сварке с частотой импульсов от 20 до 400 Гц.

Управление с использованием дисплея на жидких кристаллах позволяет достаточно просто установить необходимый режим сварки; при необходимости допустима корректировка этих программ. Возможно присоединение системы управления к персональному компьютеру, посредством которого может быть осуществлен контроль и документирование. Инверторы для сварки плавящимся электродом выпускают ряд зарубежных фирм (во многих из них реализованы решения на принципах синергетики): ESAB — «AristonMig» на силу тока 320–500 А; Fronius — «Trans Puls Synergic» на 210–450 А; Kemppi — «Pro» на 320, 420 и 520 А и др.

В Украине и России примерно с 1997–1998 гг. ведутся работы по созданию промышленных инверторных источников для ручной дуговой сварки. Освоен выпуск нескольких типов источников [110, 111].

Универсальные транзисторные инверторы начали выпускать в Санкт-Петербурге фирма «ФЕБ» — «Магма 315» и «Магма 500», а также ООО «ПТК» — «Инверт-400» (ручная сварка, механизированная сварка плавящимся электродом, сварка неплавящимся электродом — 400 А, ПН = 80%).

В [105] отмечают, что попытки создания инверторных источников для механизированных способов сварки на элементной базе России и Украины были неудачными, так как источники оказались ненадежны, а создание соответствующих источников на базе импортных комплектующих сделало их неконкурентоспособными из-за высокой стоимости.

В объединении «СЭЛМА-ИТС» освоили создание чопперов [105]. В общем виде чоппер представляет собой сварочный инвертор для дуговой сварки ММА, МИГ-МАГ, ТИГ, более точно — сварочный конвертор, в том числе с наложением импульсов на сварочное напряжение, но по цене гораздо дешевле, а по надежности — выше, чем традиционные сварочные инверторные установки. Рабочая частота может быть любая, в зависимости от применяемой элемент-

ной базы. Источником питания для чопперов являются многопостовые источники питания типа ВДМ-1202, ВДМ-63-3. Количество чопперов, которые могут питаться от одного многопостового выпрямителя, определяется характеристикой мощности, но учитывая, что КПД чопперов составляет не меньше 95%, от выпрямителя ВДМ-1202 питается не меньше шести чопперов с рабочей силой тока 200 А или четыре чоппера с рабочей силой тока 300 А. Данное техническое решение позволяет отказаться от традиционного применения балластных реостатов, существенно повысить КПД сварочного поста, поднять на качественно новый уровень производство сварочных работ, повысить их безопасность, используя при этом имеющийся значительный парк многопостовых сварочных источников.

Сварочные посты на основе чопперов могут быть разработаны не только для ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА), но и для МИГ/МАГ-сварки.

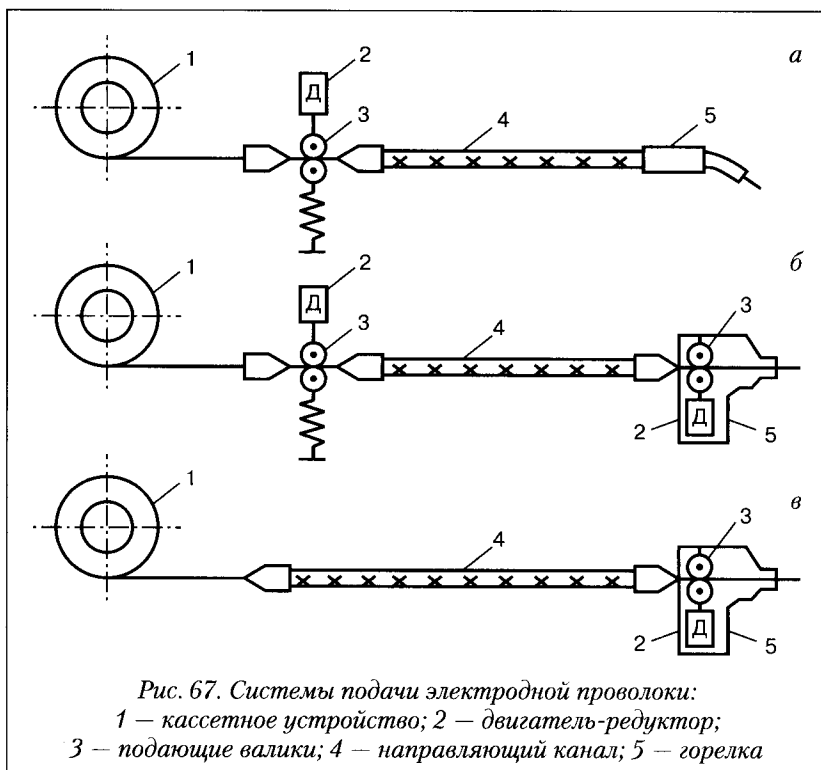
В настоящее время можно констатировать, что благодаря совершенствованию схем управления тиристорными выпрямителями в Украине и России в последние годы продолжали создавать относительно недорогие источники питания для всех видов дуговой сварки (ММА, МИГ/МАГ, ТИГ) на отечественной элементной базе. По сварочным свойствам эти источники, как правило, не уступают лучшим образцам аналогичной сварочной технике зарубежных фирм, а по условиям эксплуатации превосходят их.

Вместе с тем следует отметить и некоторое отставание предприятий Украины и России по ряду вопросов, связанных с промышленным выпуском современного оборудования:

- на рынке отсутствует синергетическое оборудование для автоматизированной сварки;
- отсутствует также оборудование, обеспечивающее программируемый перенос металла;
- недостаточно используются современные дисплеи, руководящие табло и т. д.;
- практически отсутствуют современные отечественные инверторы.

Качество сварочных работ во многом зависит от конструкции и надежности различных узлов и деталей сварочных автоматов и полуавтоматов для дуговой сварки. В частности, следует выделить: системы подачи электродной проволоки; направляющие каналы; токоподводящие устройства; системы зажигания дуги и др.

Различают три основные системы подачи электродной проволоки (рис. 67): толкающего типа, тянущее-толкающего и тянущего [102].



Система подачи толкающего типа (рис. 67, а) является наиболее распространенной в отечественных и зарубежных полуавтоматах. Преимуществами этой системы являются простота устройства, небольшие размеры и масса горелки. К недостаткам следует отнести ограниченную длину шланга, изгиб проволоки в направляющем канале, сложности с подачей проволоки малого диаметра и др.

Система подачи тянуще-толкающего типа (рис. 67, б) может быть использована для подачи тонкой (диаметром менее 1 мм) проволоки на значительное (до 10–20 м) расстояние. Однако горелка в такой системе имеет большую массу и габариты. При отсутствии в системе полной синхронизации используют один двигатель с постоянным моментом (толкающий), а другой — с постоянной скоростью (тянущий).

В системе подачи тянущего типа (рис. 67, в) к электродной проволоке приложена сила натяжения, и она не изгибается в направля-

ющем канале, но при скручивании канала существует опасность разрыва проволоки. Горелка в этой системе имеет значительные размеры и массу. Такую систему подачи проволоки широко применяют в сварочных автоматах и аппаратах для дуговой металлизации.

Кривая зависимости усилия подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм по шлангу длиной 3 мм от угла скручивания  $\theta$  при различных системах показана на рис. 68 [102].

Одним из наиболее существенных требований, предъявляемых к конструкции толкающей системы, является значение тянущего усилия, проталкивающего электродную проволоку в зону дуги.

В соответствии с требованиями ГОСТ 18130-79 тяговые усилия подающих механизмов полуавтоматов для дуговой сварки с толкающей системой подачи электродной проволоки должны составлять: 100 Н — для стальной проволоки диаметром до 1,4 мм и алюминиевой проволоки всех диаметров, 200 Н — для стальной проволоки диаметром 1,6–3,0 мм.

Серьезным требованием к системе подачи является стабильность скорости подачи электродной проволоки. Причинами коле-

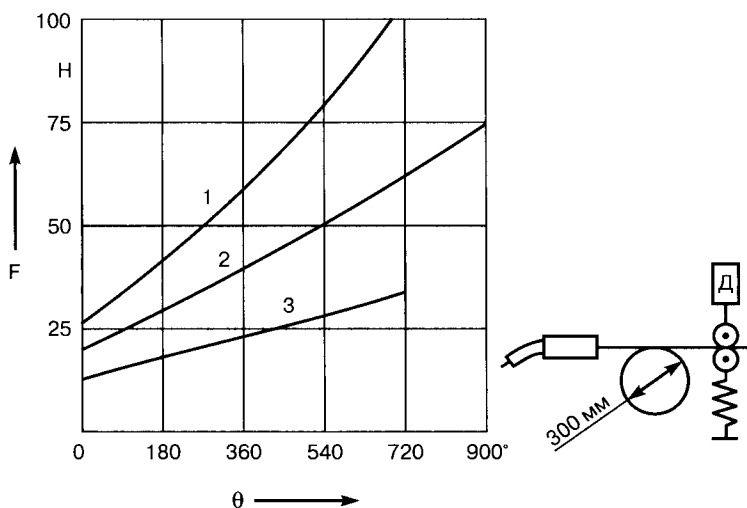


Рис. 68. Кривые зависимости усилия подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм от угла скручивания шланга в системах подачи проволоки: 1 — толкающего типа; 2 — тянущего типа; 3 — тянуще-толкающего типа

баний скорости подачи электродной проволоки в системах подачи толкающего типа являются многие факторы, в том числе и зависящие от принципа подачи и конструктивных особенностей системы. Большую роль при этом играет конструкция и состояние направляющего канала.

**Направляющий канал** представляет собой гибкий шланг, связывающий механизм подачи проволоки с устройством, подводщим к ней сварочный ток и направляющим проволоку к месту сварки. Данный канал является важнейшим элементом шланговых полуавтоматов. Длина каналов определяется спецификой конкретного сварочного аппарата.

Применение гибких направляющих каналов для подачи электродной проволоки в аппаратах для механизированной и роботизированной сварки позволяет уменьшить габариты и массу собственно рабочего органа аппарата.

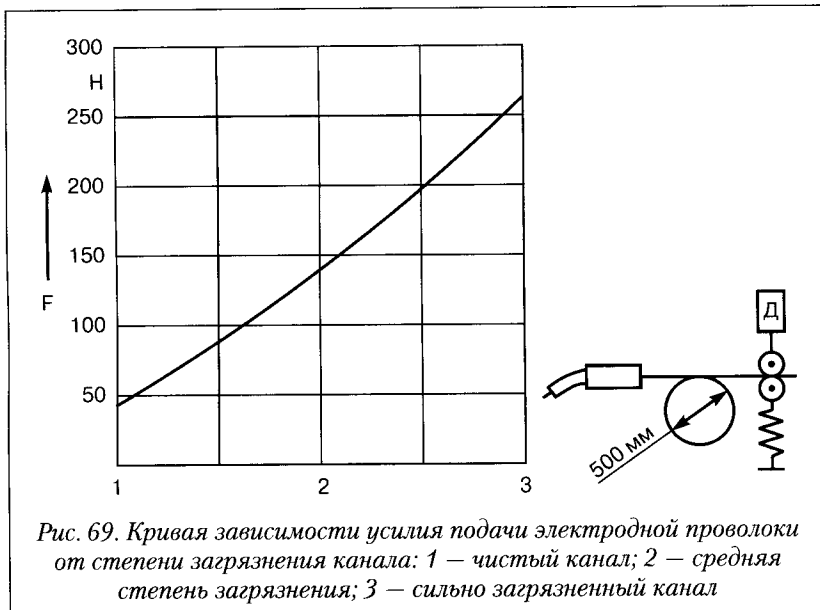
Сопротивление проталкиванию проволоки через канал зависит от его конструкции и длины, материала и состояния рабочей поверхности и от конфигурации изгибов по длине канала. Из-за наличия сопротивления трения между проволокой и стенками направляющего канала проволока изгибается, и чем больше сопротивление трения, тем чаще становятся циклы изгиба.

Изгиб электродной проволоки в большой степени зависит от отношения между диаметром проволоки и внутренним диаметром направляющего канала [100, 102].

В конечном счете подача электродной проволоки с изгибами внутри направляющего канала приводит к нестабильности сварочного процесса, поскольку по сравнению с подачей без изгибов длина электродной проволоки от подающих роликов до дуги увеличивается, причем все время с колебаниями.

Колебания скорости подачи электродной проволоки могут также вызываться сплавлением (прихватыванием) проволоки в токоподводящем наконечнике в результате уменьшения точек соприкосновения, а следовательно, увеличения плотности тока в точках контакта. Сплавление резко увеличивает сопротивление прохождению проволоки, и если кабель направляющего канала подвержен значительным удлинением при растяжении, т. е. имеет недостаточную продольную жесткость, то при срыве точек сплавления происходит увеличение скорости подачи, приводящее к нарушению режима.

Для надежной подачи проволоки должно быть снижено сопротивление проталкиванию, чего достигают путем использования для



направляющих каналов антифрикционных материалов (нейлон, фторопласт, полиэтилен и др.), применения специальных смазок (дисульфид молибдена), а также электродной проволоки с соответствующим покрытием.

При эксплуатации оборудования следует иметь в виду, что увеличение степени загрязнения направляющего канала способствует росту усилия сопротивления подачи. Загрязнение появляется при подаче через канал ржавой проволоки, проволоки с большим слоем технологической смазки, применяемой при волочении, омедненной проволоки с низкой прочностью сцепления медного слоя и др. В конечном счете загрязнение может привести к прекращению подачи. На *рис. 69* показана кривая зависимости усилия подачи стальной электродной проволоки диаметром 2 мм от степени загрязнения канала, где цифры на оси абсцисс обозначают степень загрязненности канала [102]. Шланг имел одну петлю диаметром 500 мм.

Большое влияние на усилие проталкивания оказывает материал подаваемой проволоки. Сопротивление проталкиванию порошковой проволоки и проволоки из алюминия или титана намного выше, чем стальной сплошного сечения [100]. Это требует значительного увеличения усилия проталкивания подающего механизма.

Однако установлено, что повышение при этом сцепного усилия подающих роликов далеко не всегда эффективно, так как проволока часто ломается у входа в канал.

Наиболее ответственной частью **механизма подачи проволоки** является роликовое устройство. Для подачи используют механизмы, состоящие из одной или двух пар подающих роликов, прижатых к проволоке. Тип механизма зависит от типа и материала подаваемой проволоки. Основными параметрами роликового механизма являются усилие прижатия роликов к проволоки, жесткость упругого элемента, диаметр роликов, форма поверхностей, контактирующих с проволокой.

Зная (задавая) величину усилия сопротивления подаче и коэффициент сцепления, можно получить необходимую величину усилия поджатия роликов к проволоке [102].

Коэффициент сцепления может быть повышен за счет конструкции роликов. Они могут быть выполнены цилиндрическими с насечкой, с канавкой и насечкой, шестеренчатыми с канавкой в зубьях шестерен, обрешиненными и т. д. Подающее усилие может быть повышено также за счет применения нескольких ведущих роликов (пары и более). Обычно подающие ролики изготавливают из термообработанной до HRC56-60 стали ХВГ, ХГ, 40Х или ШХ15.

Важным параметром подающего механизма является жесткость прижимной пружины. Для улучшения условий подачи следует использовать упругие элементы (пружины) с невысокой удельной жесткостью на заданном уровне нагрузки.

Выбор оптимальных значений усилия прижатия ролика, жесткости упругого элемента позволяет:

- повысить надежность подачи проволоки без проскальзывания и расширить область применения гладких роликов;
- снизить нагрузки на элементы конструкции и повысить долговечность механизма;
- повысить КПД и улучшить стабильность подачи.

Стабильность работы сварочных полуавтоматов и автоматов и качество сварных швов во многом зависит от **устройств для подвода сварочного тока** к электродной проволоке [100, 102, 112]. Процесс токосяема неразрывно связан с износом (механическим и электромеханическим) контактирующих поверхностей. Механический износ является результатом контактного давления и выражается в механическом переносе частиц материала токоподвода на электродную проволоку. На механический износ решающее влия-

ние оказывают твердость материалов, контактное давление и прочность материала на сдвиг. Для большинства материалов, применяемых в токоподводящих устройствах (медь М1, М2, N3 или МЦ, бронза марок БрАЖ9-4, БрХ-08, БрБ-2), удельное критическое давление находится в пределах 0,8–1,0 МПа.

Электромеханический износ появляется под воздействием мостиковой, дуговой и искровой эрозии, дуговой коррозии и горячего сваривания [102]. Он тем выше, чем выше плотность тока и меньше стабильность контакта. Рассматривая процесс токосяема в сварочных устройствах, нужно иметь в виду его специфические особенности:

- наличие дополнительно к контактному давлению силы трения, воздействующей на контактные слои и токопередающий механизм;
- непрерывные упругопластические деформации контактных поверхностей и пульсации контактного давления вследствие действия различных факторов;
- возможность несовпадения мест механического и электрического контакта на скользящей поверхности из-за неравномерного распределения нагрузки;
- неустойчивое тепловое состояние в контактных точках в результате их перемещения по контактным поверхностям;
- разрушение и удаление продуктов износа трением вследствие перемещения контактных поверхностей;
- большую чувствительность скользящего токосяема к внешним виброударным воздействиям;
- уменьшенную вероятность слипания и сваривания контактирующих поверхностей, но повышенную склонность к электромеханическому разрушению.

В полуавтоматах и автоматах для дуговой сварки плавящимся электродом получили распространение три основных типа токоподводящих устройств [102]: токоподвод с цельным трубчатым наконечником; токоподвод с разрезными вкладышами и цанговым креплением; сборный токоподвод с разрезными вкладышами. Существуют и другие конструкции токоподводов: роликовые, сапожковые и т. д., но они применяются реже. В последние годы все большее распространение получают токоподводящие устройства из порошковых материалов на основе меди и термостойких покрытий их рабочей поверхности [112].

Рациональность использования того или иного типа токоподводящих устройств нужно определять в каждом конкретном случае с учетом ряда факторов [102].



При механизированной сварке *зажигание (возбуждение) дуги* и установление процесса — важные технологические операции, оказывающие влияние на качество начальных участков швов, расход сварочных материалов и электроэнергии, особенно при выполнении коротких и прерывистых швов и дуговой точечной сварке. Эти операции важны при выполнении сварки в поточно-механизированных линиях, роботами и роботизированными системами, а также для синхронизации работы многоголовочных автоматов.

Существуют следующие способы зажигания дуги [113]: размыканием контактов или разрывом перемычки в цепи с током; электрическим пробоем газового или вакуумного промежутка; переходом какого-либо маломощного разряда в дуговой.

Для процессов дуговой сварки применяют контактный и бесконтактный способы зажигания дуги. Контактный — это способ, предусматривающий размыкание контактов в цепи с током, а бесконтактный — электрический пробой межэлектродного промежутка.

Возбуждение дуги и установление процесса сварки тесно связано с характеристикой источников питания, схемно-техническими решениями в системах управления, а также зависит от генераторов импульсов, осцилляторов и других устройств [100, 113].

В настоящее время на рынке Украины предлагается большое количество различных видов и типов сварочного оборудования (включая источники питания) различного технического уровня. В секторе производства сварочного оборудования работает более десяти отечественных фирм, среди которых лидирующие позиции занимают Каховский завод электросварочного оборудования [114] и Симферопольский электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА» [115]. В Украине активно работают торговые представительства известных мировых фирм-производителей сварочного оборудования: «Fronius», «ESAB», «Abicor Binzel», «Lincoln Electric» и др.

Перед отечественными пользователями сварочного оборудования стоит непростая задача выбора. Обычно предпочтение отдают тому производителю, у которого соотношение «цена-качество» наиболее приемлемо. Иногда от потребителей сварочного оборудования можно услышать полярные мнения об эффективности того или иного оборудования в конкретных производственных условиях. По мнению автора, это связано не только с техническим уровнем и надежностью конкретной продукции, но и с организацией на заводах-потребителях системы обслуживания и ремонта оборудования, соблюдением рабочими, сварщиками и операторами правил

эксплуатации оборудования, их квалификацией и общей культурой производства.

**Технологии.** Среди способов дуговой сварки плавящимся электродом механизированная сварка в защитных газах в мировой практике занимает лидирующие позиции. Благодаря известным технологическим и экономическим преимуществам механизированную сварку плавящимся электродом в защитных газах применяют во всех промышленно развитых странах свыше 50 лет. Только в Украине за эти годы потребление низколегированной сварочной проволоки, в основном марки Св-08Г2С, превысило миллион тонн.

Предложенная [116] классификация процессов дуговой сварки в защитных газах по технологическим признакам показана на рис. 70. Для сварочного производства Украины и других стран СНГ характерно широкое применение сварки в  $CO_2$ , обладающей рядом несомненных достоинств [91]. В то же время для данного процесса характерно повышенное разбрызгивание, неблагоприятное формирование швов и относительно низкая пластичность металла шва при отрицательных температурах, особенно при использовании проволоки диаметром 1,6–2,0 мм. Один из известных приемов, поз-



Рис. 70. Классификация процессов дуговой сварки в защитных газах

воляющий в значительной степени устранить перечисленные недостатки, — применение проволоки диаметром 1,0–1,4 мм.

На практике используют различные способы и приемы совершенствования процесса сварки в  $\text{CO}_2$  металлургического и электрического характера [90]. Предложены и реализованы металлургические приемы совершенствования сварки в  $\text{CO}_2$ , основанные на использовании различных сварочных материалов. К ним следует отнести применение газозащитной порошковой проволоки, активированной (профилированной) проволоки, микролегированной кремнемарганцовистой проволоки сплошного сечения с редкоземельными элементами (Св-08Г2СЦ). Благодаря использованию этих сварочных материалов удалось улучшить формирование швов и повысить механические свойства сварных соединений, устойчивость горения дуги и существенно снизить разбрызгивание металла.

По ряду причин микролегированная церием и активированная (профилированная) электродная проволока не получила широкого промышленного применения. В то же время объемы применения газозащитной порошковой проволоки для сварки в  $\text{CO}_2$  имеют устойчивую тенденцию роста. К сдерживающим факторам при этом следует отнести более высокую стоимость порошковой проволоки.

Среди электрических приемов и способов совершенствования процессов сварки в  $\text{CO}_2$  в первую очередь следует выделить способ программирования параметров режима сварки по определенным, заранее заданным законам [90, 105, 115, 116, 117, 118].

Идея способа сварки в  $\text{CO}_2$  с программированием сводится к управлению процессом массопереноса электродного металла не путем традиционного формирования импульсов, отрывающих капли электродного металла, реализующего таким образом сварку без коротких замыканий, а путем принудительного формирования замыканий, управляя силой тока и напряжением дуги. При этом главной особенностью переноса является то, что переход капли электродного металла в сварочную ванну осуществляется под действием сил поверхностного натяжения капли расплавленного электродного металла, что позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях с высоким качеством формирования швов при минимальном разбрызгивании.

В последние годы предложено несколько технологических систем выполнения сварки в  $\text{CO}_2$  с программированием параметров. Сварку способом, получившим название «вынужденные короткие замыкания» (ВКЗ) [105, 115], осуществляют с помощью выпрями-

телей, внешние комбинированные вольт-амперные характеристики которых обеспечивают такой режим работы, при котором каждый их участок определяет любую стадию плавления и переноса капли электродного металла при ручной дуговой сварке и механизированной сварке плавящимся электродом. Фирмой «Линкольн Электрик» разработан способ сварки STT (сокращенно от английского термина «Surface Tension Transfer» – перенос за счет сил поверхностного натяжения) [117]. Сварка способом STT принципиально отличается от способа выполнения обычной механизированной сварки в защитном газе возможностью прямого управления переносом наплавляемого металла в сварочную ванну. Это обеспечивают применяемые при этом способе сварки быстродействующая инверторная схема источника питания, специальный электронный микропроцессорный модуль, принудительно задающий необходимую силу сварочного тока, и контур обратной связи, отслеживающий изменения напряжения дуги. В течение всего цикла переноса капли сила сварочного тока жестко зависит от фазы формирования капли и перехода в сварочную ванну. Идентификация фазы переноса капли осуществляется за счет напряжения, постоянно снимаемого с дугового промежутка.

Сравнение особенностей традиционной сварки в  $\text{CO}_2$ , процессов ВКЗ и STT целесообразно на основе анализа типичных форм кривых силы сварочного тока и напряжений (рис. 71) [105, 115, 117].

Основное отличие процессов ВКЗ и STT состоит в использовании сварочных выпрямителей с повышенными динамическими свойствами. Характерное время короткого замыкания с использованием традиционных выпрямителей типа ВДУ-506, ВС-300 и др. (рис. 71, а) составляет 10–20 мс, с выпрямителями типа ДК и при применении способа ВКЗ (рис. 71, б) – 5–7 мс, а с выпрямителем Invertec II и способе STT – 2–5 мс (рис. 71, в).

При традиционной сварке в  $\text{CO}_2$  (рис. 71, а) частота коротких замыканий составляет не более 30–50 Гц, а разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной при завершении короткого замыкания происходит при близкой к максимальной силе тока дуги. Такой процесс сопровождается значительным разбрызгиванием металла (более 5%), вызванным существенным воздействием электродинамических сил, которые приводят к хаотическому изменению размеров капель электродного металла при сварке и к невозможности стабильно управлять сварочным процессом из-за широкого изменения параметров режима.

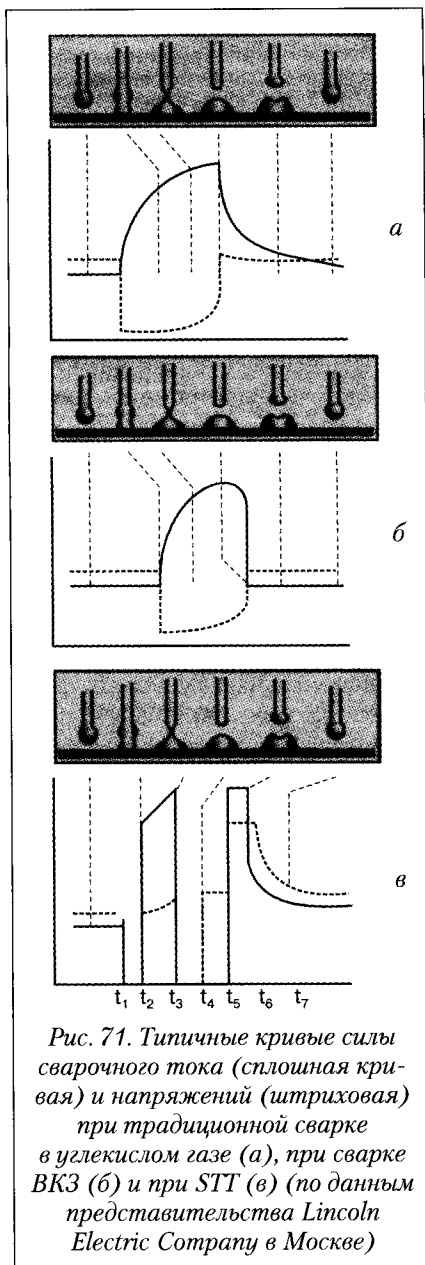


Рис. 71. Типичные кривые силы сварочного тока (сплошная кривая) и напряжений (штриховая) при традиционной сварке в углекислом газе (а), при сварке ВКЗ (б) и при STT (в) (по данным представительства Lincoln Electric Company в Москве)

При сварке способом ВКЗ (рис. 71, б) типичная осциллограмма по виду похожа на предыдущую, за исключением длительности и крутизны переднего и заднего фронтов линии тока дуги, особенно в области завершения короткого замыкания. В этом случае разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при значительно сниженной силе тока дуги (до 40–50 А), при этом резко снижается разбрызгивание электродного металла (до 3% и меньше), частота коротких замыканий 120–150 Гц (для выпрямителя ВД–506ДК-4) и 70–80 Гц (для выпрямителя ВД-306ДК), сварка электродной проволокой диаметром 1,6 мм и менее протекает стабильно и легко управляема.

При сварке способом STT (выпрямителем Invertex STT II) (рис. 71, в) осциллограмма имеет существенное отличие от двух предыдущих. Разрыв перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при еще более сниженной по сравнению с предыдущим вариантом силе тока, разбрызгивание электродного металла менее 2%, частота коротких замыканий — примерно 130–140 Гц, сварка проволокой диаметром 1,2 мм и менее протекает весьма стабильно.

В начальный период короткого замыкания  $t_1$  (рис. 71, в) датчик контура обратной связи выпрямителя Invertec STT II подает на микропроцессор сигнал о возникновении короткого замыкания (напряжение падает до значения, близкого к нулю). Выпрямитель понижает силу тока с базового уровня до 10 А на время 0,75 мс, в течение которого происходит развитие пятна контакта, «врастание» капли в сварочную ванну и образуется надежная перемычка между ванной и электродной проволокой.

В момент  $t_2$  микропроцессор резко повышает силу сварочного тока. На этой короткой первой стадии происходит стремительный рост электромагнитных сил осесимметричного сжатия (пинч-эффект) жидкой перемычки и образование на ней шейки.

На второй стадии периода пинч-эффекта сила сварочного тока растет более плавно. В момент  $t_3$  шейка подготовлена к разрушению; в это время источник питания прекращает плавное повышение силы тока и резко снижает ее до уровня порядка 5 А. Отделение капли (момент  $t_4$ ) происходит без разбрызгивания, и она под действием сил поверхностного натяжения «втягивается» в сварочную ванну.

В течение времени  $t_5-t_6$  действует пиковый уровень силы тока, устанавливаемый сварщиком на лицевой панели сварочного аппарата. Уровень пиковой силы тока довольно высок — чаще всего 350–400 А. При применении выпрямителя Invertec STT такой высокий уровень силы тока действует только после отделения капли и ее переноса в ванну, что значительно повышает качество сварных швов. Оптимальная длительность действия пиковой силы тока устанавливается процессором в диапазоне 1–2 мс.

После окончания действия пиковой силы тока, когда сформировалась капля необходимого объема, выпрямитель экспоненциально понижает силу тока до базового уровня (период  $t_6-t_7$ ). Резкое снижение силы тока в данном случае неприемлемо, поскольку может привести к возникновению возмущений. Сварщик может регулировать скорость снижения силы тока на этом этапе специальной рукояткой на лицевой панели источника, достигая при этом наибольшей стабильности процесса сварки и наилучшей формы сварного шва. Замедление скорости падения тока приводит к увеличению общего тепловложения, что важно при сварке высоколегированных и коррозионностойких сталей.

С переходом силы тока на базовый уровень вновь сформировавшаяся капля начинает приобретать правильную сферическую форму, и весь цикл переноса повторяется.

Выпрямитель Invertec STT II нельзя отнести ни к одной группе аппаратов для сварки с традиционными вольт-амперными характеристиками. Правильнее считать его выпрямителем с высокоскоростным управлением силой сварочного тока, оптимизированным специально для переноса металла сериями коротких замыканий. Как и традиционный сварочный полуавтомат, система на базе Invertec STT II состоит из собственно источника питания, блочно-модульного механизма подачи сварочной проволоки с комплектом соответствующих контрольных и силовых кабелей, а также стандартной горелки для механизированной сварки на 200 или 300 А [117].

При подборе режима сварщик должен установить необходимую скорость подачи проволоки, определяющую производительность наплавки, и настроить механизм подачи проволоки на режим, облегчающий работу и понижающий вероятность возникновения дефектов (двух/четырёхшаговый режим, точечный режим, скорость подачи до зажигания дуги, ускорение при переходе на рабочую скорость, длительность предварительной и послесварочной подачи защитного газа, растяжка дуги в момент прекращения сварки). Настройка источника питания Invertec STT II иная, чем у обычного полуавтомата с жесткой ВАХ. Поскольку процесс сварки полностью контролируется микропроцессором, сварщик лишь задает параметры и форму токовых импульсов, возникающих в контуре при переносе капли: устанавливаются значения базовой (0–125 А) и пиковой (0–450 А) силы тока, а также длительность заднего фронта импульса капли (Tailout). Кроме того, перед началом работы простым переключением двух тумблеров источник настраивают согласно материалу (углеродистая или коррозионно-стойкая сталь) и диаметру (1,0 и менее или 1,2 мм и более) используемой сварочной проволоки.

Применяя способ STT, можно сваривать углеродистые, низколегированные и коррозионностойкие стали, титановые, никелевые и медные сплавы, используя соответствующую газовую защиту. Наибольшей эффективности способа STT достигают при использовании углекислого газа. При этом экологические характеристики по сравнению с этими же характеристиками при традиционной сварке в  $\text{CO}_2$  существенно лучше.

Способ ВКЗ по количеству управляемых параметров и технологическим возможностям уступает способу STT, но заметно превосходит способ обычной сварки в  $\text{CO}_2$  с использованием выпрямителей, имеющих жесткую ВАХ.

Способ ВКЗ используют для сварки стальной, углеродистой, нержавеющей и алюминиевой проволокой сплошного сечения, а также порошковой проволокой [115]. В последнем случае процесс автоматически переходит в струйный. Он эффективен при сварке корневых швов, а также при необходимости снизить коробление свариваемых деталей.

Способы ВКЗ и STT используют при сварке неповоротных стыков трубопроводов, в автомобильной промышленности и других отраслях, при сварке тонколистовых конструкций, металлоконструкций оборудования химического и энергетического машиностроения и др. [105, 115, 117].

Еще одним направлением совершенствования MIG/MAG-сварки является использование импульсной подачи электродной проволоки [90]. Сущность этого способа состоит в управлении переносом капли металла за счет сообщения электроду импульса подачи в направлении ванны, под действием которого капля расплавленного металла приобретает дополнительную кинетическую энергию. Эта энергия способна при мгновенной остановке электрода принудительно оторвать каплю и обеспечить обязательный ее контакт со сварочной ванной. Основными характерными параметрами данного процесса сварки являются шаг и частота импульсов подачи проволоки, которые обычно находятся в пределах соответственно 0,5–3,0 мм и 10–50 с<sup>-1</sup>. Сварка может быть выполнена в аргоне, углекислом газе и смесях газов при использовании электромагнитных механизмов подачи проволоки с цанговыми захватами либо механических квазиволновых редукторов, преобразующих равномерное вращение электродвигателя в импульсно-вращательное движение подающего ролика и, соответственно, в импульсно-поступательную подачу электродной проволоки. Полуавтоматы с такими приводами (А-1220, ПШ-135К) разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона.

Дуговая сварка с программированием скорости подачи электродной проволоки обеспечивает существенное расширение диапазонов рабочих режимов сварки, увеличение и стабильность частоты коротких замыканий дугового промежутка, резкое снижение потерь металла на разбрызгивание, улучшение формирования швов, в том числе при сварке металлов малых толщин в различных пространственных положениях, упрощение техники выполнения электрозаклепочных и коротких швов.

Фирмой «Фрониус» разработан способ роботизированной дуговой сварки СМТ (Cold Metal Transfer — перенос холодного метал-



ла), в этом случае блоки подачи проволоки включены в систему регулирования сварки [118]. Цифровое управление осуществляет импульсную подачу проволоки с частотой до 70 Гц. Используют два блока подачи проволоки: передний блок подает и отводит проволоку с частотой до  $70 \text{ с}^{-1}$ ; задний блок проталкивает проволоку.

Передний блок оснащен безредукторным приводом, высокодинамичным серводвигателем переменного тока, обеспечивающим точную подачу проволоки и постоянное давление прижима. Между двумя блоками привода установлен проволочный буфер, обеспечивающий их независимость друг от друга и служащий дополнительным накопителем для проволоки.

При СМТ цифровая система фиксирует возникновение короткого замыкания и путем отвода проволоки помогает отделению капли. Ток короткого замыкания незначителен, что обеспечивает перенос металла без образования брызг. При этом также достигается минимальное тепловложение. Естественно, что понятие «холодный металл» относительно, но по сравнению с традиционным процессом MIG-MAG СМТ обеспечивает меньшую температуру металла.

СМТ позволяет выполнять сварные и паяные швы без образования брызг, соединять сталь с алюминием, сваривать стыковые швы на металле толщиной до 0,3 мм без использования технологической подкладки, осуществлять тонкую регулировку тепловложения в свариваемый металл.

СМТ используют в автомобильной и авиационной промышленности, а также в производстве прецизионных сварных конструкций различного назначения.

***Сварка в окислительных газовых смесях на основе аргона*** в настоящее время является одним из наиболее широко применяемых промышленных процессов, обеспечивающих высокое качество сварных швов и сварных соединений стальных металлоконструкций [91, 93, 119, 120]. Оптимальные сварочно-технологические свойства имеют смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  и  $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ .

Сварка стальных металлоконструкций в защитных смесях газов на основе аргона имеет характерные особенности и преимущества по сравнению со сваркой в  $\text{CO}_2$ :

- значительное (в 3–4 раза) снижение разбрызгивания и набрызгивания (приваривание брызг электродного металла);
- улучшение формирования швов. Высота усиления шва заметно ниже, чем при сварке в  $\text{CO}_2$ , валик имеет плавный переход к основному металлу;

**Таблица 70. Механические свойства металла шва и наплавленного металла при сварке проволокой Св-08Г2С в смеси Ag + 20%CO<sub>2</sub>**

Основной металл	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость (Шарпи), Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С			
							+20	-20	-40	-60
Металл шва										
СтЗсп (δ=20 мм)	280–290	26–28	423	552	25,5	67,0	96	70	41	–
Ст10ХСНД (δ=20 мм)	290–300	28–29	559	699	21,7	55,1	145	76	56	37
Ст09Г2 (δ=25 мм)	300–320	29–30	490	595	29,3	70,3	196	135	93	65
Ст09Г2С (δ=16 мм)	260–270	26–27	477	596	22,0	58,6	102	86	73	44
Наплавленный металл										
	280–290	27–29	410	525	33,1	69,2	170	18	89	68
Примечание. Механизированную дуговую сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности проволокой диаметром 1,2 мм. Расход защитного газа 16–18 л/мин, вылет электрода 18–20 мм. Указаны средние значения по результатам испытаний 3–5 образцов.										

- повышение показателей механических свойств металла, в том числе значений ударной вязкости при отрицательных температурах (табл. 70) [120];
- улучшение санитарно-гигиенических и экологических характеристик процесса сварки.

К недостаткам сварки в аргоновых смесях относят повышенное световое и тепловое излучение сварочной дуги, большую склонность к образованию пор, вызванных азотом, а также повышенную стоимость смесей. Техника и технология сварки в смесях Ag + CO<sub>2</sub> и Ag + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> обстоятельно рассмотрена в [93].

Необходимо отметить, что технологические преимущества защитных смесей на основе аргона особенно заметно проявляются при значениях силы сварочного тока, обеспечивающих струйный перенос металла. В табл. 71 приведены значения критической силы сварочного тока, при которой наступает струйный перенос, при различных диаметрах сварочной проволоки, полярности тока и при использовании импульсно-дуговой сварки (ИДС) в смеси Ag + 20%CO<sub>2</sub> [120].

**Таблица 71. Значения критической силы тока перехода к струйному переносу электродного металла при сварке в смеси Ar + 20%CO<sub>2</sub> проволокой Св-08Г2С**

Диаметр проволоки, мм	Критическая сила сварочного тока, А, при		
	обратной полярности	прямой полярности	ИДС
1,0	240	–	160
1,2	260	350	180
1,4	300	380	210
1,6	340	420	240
2,0	400	460	–

Согласно этим данным, струйный перенос при прямой полярности наступает при больших значениях силы сварочного тока, чем при обратной. При ИДС мелкокапельный перенос происходит при более низком среднем значении силы сварочного тока по сравнению с условиями струйного переноса электродного металла во время сварки без наложения импульсов.

Смеси на основе аргона позволяют реализовать синергетическую систему управления параметрами импульсов [90, 116]. В данном случае применяется однокнопочный источник питания, в котором заранее запрограммирован пакет оптимальных параметров импульсов для различных марок и диаметров электродной проволоки по принципу «один импульс — одна капля».

Преимущества ИДС с синергетическим управлением параметрами заключается в простоте выбора оптимальных режимов сварки, повышением равномерности плавления и переноса капель электродного металла, в том числе при сварке на малой силе тока, улучшении формирования швов, расположенных в различных пространственных положениях. По сути, ИДС является альтернативой STT и CMT, рассмотренным выше.

В последние годы все большее распространение получает импульсная двухдуговая сварка в смесях на основе аргона (Time Twin) [90]. Сварка протекает в такой последовательности: зажигание — горение дуги — образование капли — отделение капли и переход ее в ванну (на одном электроде, а затем идентично на втором). К достоинствам этого вида сварки относят:

- полное исключение электромагнитного взаимодействия дуг, образующих общую сварочную ванну;
- повышение производительности сварки;

- возможность регулирования глубины проплавления основного металла и ширины шва;
- снижение тепловложения в основной металл и соответствующее снижение ЗТВ и др.

Наибольший технико-экономический эффект от применения сварки в смесях на основе аргона достигают при:

- изготовлении металлоконструкций, которые по техническим условиям не должны иметь приваренных брызг электродного металла;
- производстве металлоконструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур и динамических нагрузок;
- сварке швов малого сечения на повышенной скорости;
- многопроходной сварке швов на толстолистовом металле;
- сварке узлов и соединений на автоматизированных (роботизированных) установках и линиях.

Как уже отмечалось выше, обеспечение предприятий-потребителей смесями газов можно выполнять по двум схемам:

- поставка газов-компонентов смеси отдельно с последующим их смешиванием с помощью однопостовых или рамповых (многопостовых) смесителей на предприятии, где выполняется сварка;
- поставка газовой смеси требуемого состава в баллонах или реципиентах, которые заполняются в специализированных региональных сервисных центрах газоснабжения.

Обычно первый вариант используют на предприятии с большим объемом сварочных работ, а второй — там, где число постов не превышает десяти.

**Сварка под флюсом.** В последние годы совершенствование технологии сварки под флюсом с целью улучшения качественных характеристик процесса осуществляют по трем главным направлениям.

Первое — дальнейшая автоматизация традиционного процесса сварки, охватывающая надежное зажигание дуги, заварку кратера, направление электрода по стыку, раскладку валиков и совершенствование других элементов процесса, в т. ч. позволяющих реализовать программно-управляемые технологии сварки различного назначения.

Второе — создание высококачественных сварочных материалов, и в первую очередь флюсов, обладающих высокими сварочно-технологическими характеристиками при сварке современных конструкционных материалов, к которым по праву относятся высокопрочные низколегированные стали.

Третье — создание новых способов сварки.

Одним из основных требований, которому должна удовлетворять программно-управляемая технология сварки, является обеспечение в процессе сварки переменного (необходимого) объема наплавленного металла в различных сечениях соединения по длине с таким расчетом, чтобы размеры выпуклости сварного шва (или катета шва) не выходили за пределы значений, установленных нормативными документами, несмотря на возможные колебания параметров режима сварки и размер конструктивных элементов соединений для сварки [121].

В изложенном выше подходе объем наплавленного металла является главным управляемым параметром технологии программируемой автоматической дуговой сварки, непосредственно влияющим на качество сварного соединения. Согласно [121], для получения в этом случае швов требуемого качества технология и применяемое оборудование должны обеспечивать:

- автоматический выбор силы сварочного тока, напряжения дуги и скорости сварки в зависимости от толщины металла и вида соединения согласно действующим нормативным документам;
- автоматическое поддержание в ходе сварки параметров режима процесса, установленного в соответствии с нормативными документами, и его корректировку при колебании напряжения в сети, размеров конструктивных элементов, подготовки кромок в соединении и др.;
- автоматическое направление сварочной дуги по заданной траектории с необходимой точностью;
- автоматическое включение перед началом сварки и выключение после ее окончания подачи сварочного флюса и его уборки в процессе сварки.

Описанная технология была реализована при односторонней сварке с двухсторонним формированием швов на флюсомедной подкладке плоских полотнищ с толщиной металла до 20 мм и длиной 10 м. При этом было обеспечено высокое качество сварных швов. Сварку соединений толщиной до 16 мм выполняли одной дугой, а соединений большей толщины — одновременно двумя дугами. Сварку выполняли постоянным током силой 300–1200 А при напряжении дуги 28–46 В электродной проволокой диаметром 2–5 мм под флюсом ОСЦ-45.

Еще одной разновидностью сварки под флюсом является односторонняя сварка стыковых швов с программированием параметров режима (ППР) по разработанной циклограмме [122].

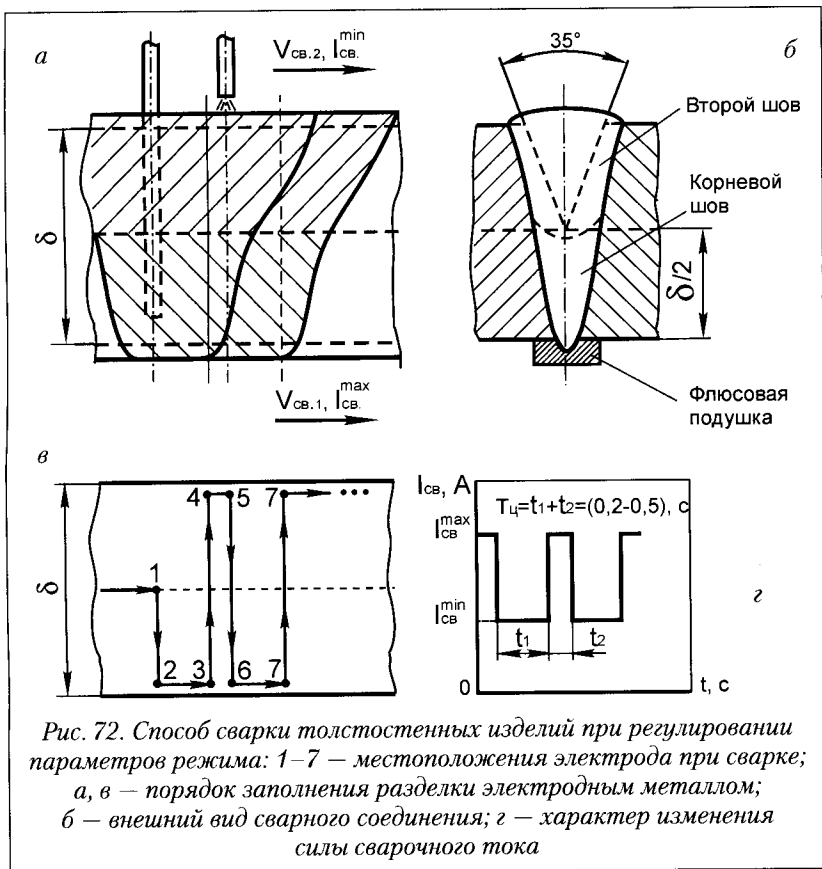


Рис. 72. Способ сварки толстостенных изделий при регулировании параметров режима: 1–7 – местоположения электрода при сварке; а, в – порядок заполнения разделки электродным металлом; б – внешний вид сварного соединения; з – характер изменения силы сварочного тока

Сущность этой разновидности способов сварки с ППР заключается в циклическом изменении силы сварочного тока по определенному закону при одновременном циклическом перемещении электрода вдоль свариваемых кромок по заданному закону, согласующимся с изменением силы тока (рис. 72).

Сварку можно выполнять по различным вариантам циклограмм [122]. По одному из вариантов глубокое проплавление основного металла формируется при неподвижном источнике теплоты и интенсивном росте силы тока дуги, а проплавление и формирование корневой части и поверхности шва — при подвижном источнике теплоты. Этот способ сварки позволяет реализовать послойную управляемую кристаллизацию снизу вверх и создать благоприятные

условия для всплытия шлаковых включений и газовых пор, исключить образование горячих трещин, которые свойственны соединениям, имеющим большую глубину сварочной ванны и малую ширину, существенно повысить производительность.

Особенностью технологии дуговой сварки под флюсом на постсоветском пространстве являлось широкое применение плавящихся флюсов.

Работы последних лет по совершенствованию сварки под флюсом были посвящены снижению вредных примесей и водорода в плавящихся флюсах, поиску современных систем «флюс-проволока», обеспечивающих необходимые свойства сварных соединений [98, 123, 124]. В частности, освоено производство флюсов с двойным рафинированием расплава флюса, что позволило при сохранении основных показателей флюсов по ГОСТ 9087-81 уменьшить насыпную массу флюсов, а также содержание серы и фосфора в таких марках флюсов, как АН-348-АП, АН-47Д и др. (табл. 72) [123].

Пемзовидный флюс АН-348-АП и флюс АН-47Д обеспечивают хорошее формирование и механические свойства сварных соединений при сварке кольцевых швов труб размером 1020×9,5 мм из стали 13ГС1-У проволокой Св-07Г1НМА диаметром 4 мм. Результа-

**Таблица 72. Показатели качества сварочных плавящихся флюсов**

Марка	ГОСТ 9087			ТУ У 05416923.049-99				
	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, масс. %, не более			Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, масс. %, не более		
		С	S	P		С	S	P
АН-348-А	1,3–1,8	–	0,12	0,12	1,3–1,8	–	0,11	0,12
АН-348-АМ	1,3–1,8	–	0,12	0,12	1,3–1,8	–	0,11	0,12
*АН-348-АД	1,3–1,8	–	–	–	1,3–1,8	0,1	0,09	0,10
*АН-348-АДМ	1,3–1,8	–	–	–	1,3–1,8	0,1	0,09	0,10
*АН-348-АП	1,3–1,8	–	–	–	0,9–1,2	0,1	0,09	0,10
*АН-348-АПМ	1,3–1,8	–	–	–	0,9–1,2	0,1	0,09	0,10
АН-47	1,4–1,8	–	0,05	0,08	1,4–1,8	–	0,05	0,08
*АН-47Д	–	–	–	–	1,35–1,60	0,1	0,04	0,07
*АН-47П	–	–	–	–	1,1–1,3	0,1	0,05	0,07

*Примечание. В ГОСТ 9087 на марки флюса, отмеченные (\*), отсутствуют требования к химическому составу.*

**Таблица 73. Показатели механических свойств сварных соединений, сваренных под флюсом**

Флюс	Сварное соединение			Наплавленный металл				
	Тип образца	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Тип образца	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
АН-348АП	Плоский со снятым усилением	620	22,0	Круглый	658	545	14,5	53,0
	Плоский без снятого усиления	620	26,0		645	482	21,5	56,0
АН-47Д	—	—	—		648	509	24,0	51,0
	—	—	—		661	552	20,5	56,0

ты испытаний полностью удовлетворяют требованиям ТУУ322-8-36-96 (табл. 73, 74).

Плавный флюс АН-47ДП обладает улучшенной отделимостью шлаковой корки и обеспечивает высокие механические свойства сварных соединений, выполненных многослойной сваркой (табл. 75) [124]. Флюс АН-47ДП отвечает требованиям технологии многослойной однодуговой сварки толстолистового металлопроката как в отношении сварочно-технологических свойств (бездефектное формирование швов, легкая отделимость шлаковой корки из глубокой разделки), так и показателей прочности, пластичности и стойкости металла швов против хрупкого разрушения. Флюс АН-47ДП, изготовленный способом двойного рафинирования расплава, рекомендуют для производства сварных конструкций ответственного назначения из низколегированных сталей с проволокой того же класса.

Следует отметить, что в странах Западной Европы в последние десятилетия плавные флюсы были заменены агломерированными, на долю которых приходится 95% объемов потребления этих сварочных материалов [83, 125, 126]. Это обусловлено рядом металлургических возможностей агломерированных флюсов: регулирование кремниевосстановительного процесса, рафинирование и микролегирование сварочной ванны, высокая прочность и ударная вязкость сварных соединений. Определились основные области применения агломерированных флюсов: производство труб боль-



**Таблица 74. Результаты испытаний на ударную вязкость**

Флюс	Тип образца	Температура, °С	Ударная вязкость по центру шва, Дж/см <sup>2</sup>			Среднее значение, Дж/см <sup>2</sup>	Ударная вязкость по линии сплавления, Дж/см <sup>2</sup>			Среднее значение, Дж/см <sup>2</sup>
АН-348АП	KCU	-20	99	68	71	79	215	213	238	222
АН-348АП	KCU	-60	66	73	68	69	169	173	173	172
АН-47Д	KCU	-20	126	129	126	127	178	180	168	172
АН-47Д	KCU	-60	110	116	103	110	162	172	197	177
АН-47Д	KCV	0	100	87	70	84	200	195	180	191
АН-47Д	KCV	-20	70	70	75	71	170	116	175	164

**Таблица 75. Показатели механических свойств сварных соединений стали 09Г2С толщиной 40 мм, выполненных под флюсом АН-47ДП проволокой фирмы «Multimet» ИМТ 9 (S2), ИМТ 6 (S2Mo), ИМТ 9Si (S2Si) и проволокой Св-08Г2С (SU31)**

№ шва	Марка проволоки (диаметр, мм)	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\phi$ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> (энергия удара по ISO-V, Дж) при температуре			
						+20°С	0°С	-20°С	-40°С
1	ИМТ 9 (4)	409,8	501,1	25,3	63,5	138,2...148,4	84,0...139,7	51,3...92,8	42,7...48,6
		415,3	500,0	30,3	66,0	(114,6)	(86,8)	(53,3)	(35,8)
2	ИМТ 6 (4)	497,7	586,3	23,7	59,1	105,3...116,6	90,0...118,5	73,0...83,8	57,4...71,2
		434,9	587,4	24,7	59,8	(88,0)	(84,5)	(61,5)	(50,8)
3	ИМТ 9Si (4)	421,7	523,7	30,0	60,0	134,0...152,6	108,1...120,2	83,4...108,7	42,5...61,2
		434,9	545,4	31,7	62,1	(117,0)	(89,8)	(51,4)	(39,8)
4	Св-08Г2С (3)	546,6	642,0	25,0	55,4	158,2...189,7	115,4...142,8	54,5...103,7	56,1...60,0
		585,1	659,4	27,3	59,8	(140,3)	(99,9)	(61,3)	(46,6)

шого диаметра для строительства магистральных трубопроводов, судостроение, изготовление мостовых и фермовых конструкций различного назначения [126, 127].

Применение агломерированных флюсов при производстве труб большого диаметра из сталей класса X-70 и X-80 позволило удовлетворить требования стандарта API SL в части свойств сварных соединений труб для трубопроводов, прокладываемых в условиях Северного моря.

В России, в ОАО «Выксунский металлургический завод», проведены испытания керамического флюса 48АФ-60 при многодуговой сварке труб из сталей 17Г1С-У [127]. Внутренний шов трубы размером 720×12 мм из стали 17Г1С-У сваривали проволокой Св-08ХМ диаметром 4 мм со скоростью 90 м/ч, наружный — омедненной проволокой Св-08ГНМ диаметром 4 мм со скоростью 115 м/ч. Результаты испытаний сварных соединений на ударную вязкость на образцах Шарпи размером 5×10 мм с острым надрезом по центру наружного шва показали, что ударная вязкость при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  составила от 65 до 70 Дж/см<sup>2</sup>.

Хорошие сварочно-технологические свойства агломерированных флюсов в сочетании с соответствующей электродной проволокой позволяют обеспечить не только требуемый уровень механических свойств металла швов, но и сверхнизкое содержание водорода в них, а также повышенную стойкость сварных соединений против коррозии в морской воде. Это предопределило выбор упомянутых материалов для изготовления многоцелевых ледоколов, морских ледостойких стационарных платформ и плавучих буровых установок из ВПНЛ сталей с пределом текучести до 690 МПа [126, 127].

Что касается разработки и применения в последние десятилетия новых промышленных способов сварки под флюсом, то здесь, по мнению автора, следует выделить сварку пульсирующей дугой [90, 128, 129], многодуговую сварку [90, 130, 131] и сварку закладным электродом [132, 133].

При сварке пульсирующей дугой частота модуляции тока обычно от 0,5 до 5 с<sup>-1</sup>. Относительно низкая частота модуляции в сочетании с вариацией амплитудного значения силы тока и формы импульсов тока позволяет в широких пределах управлять проплавляющей способностью дуги, термическим циклом сварки и формированием шва в разделке кромок по сравнению с возможностями управления при сварке в стационарном режиме. При сварке пульсирующей дугой заданная частота, амплитуда и форма импульсов

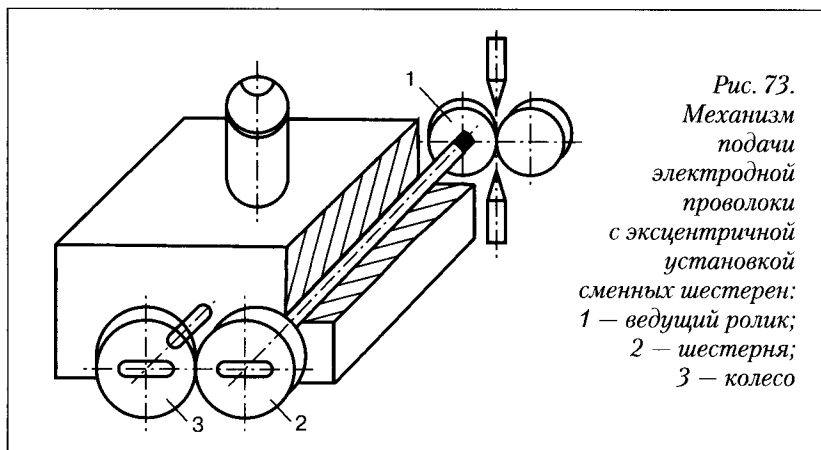


Рис. 73.  
 Механизм  
 подачи  
 электродной  
 проволоки  
 с эксцентричной  
 установкой  
 сменных шестерен:  
 1 — ведущий ролик;  
 2 — шестерня;  
 3 — колесо

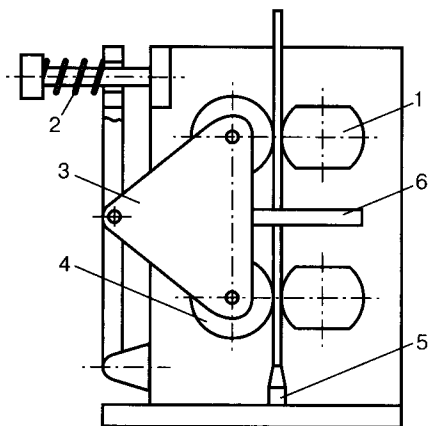
тока могут изменяться за счет программирования повторяющихся циклов изменения скорости подачи проволоки. Важной особенностью группы способов сварки, построенных на этом принципе, является возможность модуляции силы тока дуги без применения специальных импульсных источников питания. Глубина модулирования силы сварочного тока, т. е. отношение тока импульса  $I_{и}$  к току паузы  $I_{п}$ , и форма импульсов для этих способов сварки пульсирующей дугой зависят прежде всего от конструкции и технологических возможностей устройств, обеспечивающих периодическое изменение скорости подачи проволоки [90, 129].

На рис. 73 [129] представлена кинематическая схема механизма подачи, на выходном валу которого с одной стороны установлен ведущий ролик 1, с другой — шестерня 2, находящаяся в зацеплении с колесом 3. Шестерню и колесо, оснащенные элементами регулировки положения и фиксации, можно устанавливать эксцентрично относительно оси вращения валов. При этом амплитуда силы сварочного тока пропорциональна эксцентриситету их установки. Правда, такой механизм подачи может обеспечить только плавное волнообразное изменение силы сварочного тока.

Необходимая форма импульсов сварочного тока с крутым его нарастанием и спадом соответственно на переднем и заднем фронте импульсов может быть достигнута с помощью роликов специальной (не круглой) формы или путем оснащения роликов исполнительными рабочими элементами. В частности, на рис. 74 [129] показана схема механизма подачи проволоки, оснащенного двумя веду-

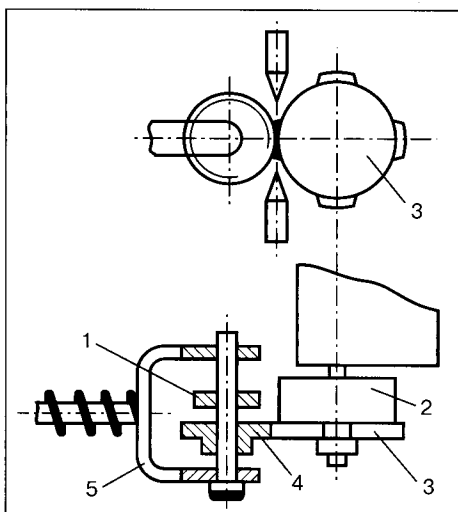
*Рис. 74. Механизм подачи с ведущими роликами некруглой формы:*

- 1 — ведущие ролики;*
- 2 — пружина;*
- 3 — коромысло;*
- 4 — прижимные ролики;*
- 5 — приемный мундштук;*
- 6 — ограничитель*



щими роликами 1 с одинаково расположенными срезами и двумя круглыми прижимными роликами 4, установленными на качающемся коромысле 3. Перед началом сварки ведущие ролики цилиндрической поверхностью поворачивают к прижимным, останавливают, заводят проволоку в приемный мундштук 5, обеспечивают усилие прижатия пружиной 2 и плотно прижимают ограничитель 6 к коромыслу. При постоянном вращении с заданной скоростью ведущих роликов механизм обеспечивает подачу проволоки в периодическом режиме и устойчивый процесс сварки пульсирующей дугой.

На рис. 75 [129] приведена схема механизма подачи, в котором программирование продолжительности взаимодействия прижим-

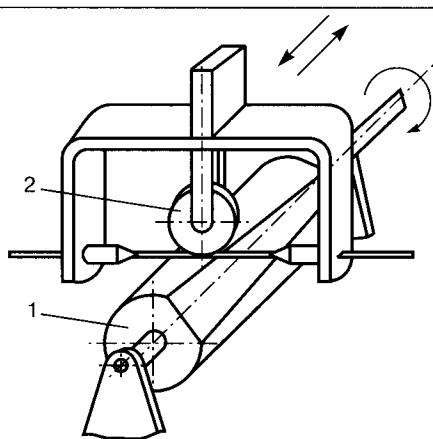


*Рис. 75. Механизм подачи с профилированным кулачком, жестко установленным на одном валу с ведущим роликом: 1 — прижимной ролик; 2 — ведущий ролик; 3 — кулачок; 4 — втулка; 5 — вилка*

ного 1 и ведущего 2 роликов обеспечивают профилированным кулачком 3, жестко соединенным с ведущим роликом и установленным на выходном валу редуктора. Кулачок через подвижную установленную соосно с прижимным роликом втулку 4 своими выступами периодически отодвигает подпружиненную вилку 5, что обеспечивает чередование импульсов сварочного тока и пауз между ними. Применяя кулачки различного профиля, можно изменять программу пульсации тока дуги.

Недостатком механизмов, схемы которых показаны на *рис. 73, 74, 75*, является то, что соотношение между длительностью импульсов тока и пауз, соответствующее установленным значениям циклов подачи проволоки и пауз между ними, невозможно изменить без замены программирующего элемента (профилированного ролика или кулачка). В механизме подачи, схема которого показана на *рис. 76* [129], это исключается тем, что ведущий ролик 1 выполнен в виде вытянутого цилиндра с пазом переменной ширины на образующей поверхности. Относительное перемещение прижимного ролика 2 совместно с мундштуками для направления проволоки вдоль оси вращения цилиндрического ведущего ролика обеспечивает плавное регулирование режима пульсации.

Необходимо отметить, что известные конструкции механических устройств для сварки с периодическим режимом подачи электрической проволоки могут обеспечить заданную длительность циклов подачи  $t$  и паузы между ними  $t_2$ , а следовательно, и частоту  $f = 1/(t_1 + t_2)$  только для одного установленного значения тока им-



*Рис. 76. Механизм подачи с удлиненным цилиндрическим ведущим роликом с пазом переменной ширины на образующей поверхности:  
1 — ведущий ролик;  
2 — прижимной ролик*

пульса. Если по технологическим причинам изменяется  $I_{\text{п}}$ , то в этих устройствах необходимо произвести соответствующую переналадку или заменить программирующий элемент, обеспечив то же значение  $f$  при новой частоте вращения ролика.

Наиболее широкими технологическими возможностями обладают системы, состоящие из серийной сварочной головки для сварки плавящимся электродом и электрически связанного с ней электронного прибора, управляющего работой электродвигателя механизма подачи проволоки [129]. При этом управление скоростью подачи проволоки обеспечивается средствами сварочного аппарата, а частотными характеристиками модуляции тока — электронным прибором.

Сварку под флюсом пульсирующей дугой (СФПД) используют при изготовлении толстостенных трубных узлов и корпусных конструкций с разделкой кромок, горизонтальных или угловых многопроходных швов с разделкой кромки вертикального элемента и в других случаях. При этом одним из преимуществ при применении СФПД многослойных швов является возможность только за счет изменения частотных характеристик процесса управлять формированием каждого слоя соединения при заполнении разделки [129]. Кроме того, пульсация дуги позволяет исключить стекание расплавленного металла, уменьшить необходимое количество проходов для заполнения разделки, улучшить дегазацию сварных швов и снизить трудоемкость процесса.

Пульсирующую дугу применяют также при сварке в защитных газах и порошковой проволокой, ручной сварке покрытым электродом и неплавящимся электродом [90].

По мнению автора, возможности сварки пульсирующей дугой пока еще используются не в полной мере и есть основания предположить, что этот способ будет развиваться, особенно в сочетании с другими способами.

Из **многодуговых процессов сварки** под флюсом широкое промышленное применение получила трех-, четырех- и пятидуговая сварка в общую ванну [90]. Основным преимуществом многодуговой сварки является возможность существенного повышения скорости выполнения швов при обеспечении высокого качества их формирования. С увеличением скорости сварки снижаются потери энергии на нагрев металла околошовной зоны, теплоотвод, образование шлаковой корки. Вследствие этого уменьшается погонная энергия и повышается энергетическая эффективность процесса.

Многодуговые процессы реализуют с использованием различных схем питания дуг. В производственной практике при трехдуговой сварке применяют комбинированное питание дуг: одна дуга (первая) питается постоянным, а две другие — переменным током. Однако экономически целесообразно питать все три дуги переменным током. Это послужило толчком к разработке ряда способов трехдуговой сварки на переменном токе с различным углом сдвига фаз.

При четырехдуговой сварке используют питание первых трех по ходу сварки дуг со сдвигом фаз на  $120^\circ$ , а последнюю дугу питают постоянным током. Применяют также питание всех дуг переменным током при сдвиге фаз токов на  $90^\circ$  [130]. При сварке пятью дугами переднюю дугу питают постоянным током, а последующие — переменным. В этом случае при толщине стенки свариваемой трубы 20,8 мм сила сварочного тока первой дуги равна 1550 А, скорость сварки — 2,3 м/мин.

Современная аппаратура для трех-, четырех- и пятидуговой сварки под флюсом электродной проволокой диаметром 3–5 мм отличается [134]:

- применением малогабаритных мундштуков втулочного типа из специального медного сплава (CuCoBe, CuCrZn), что позволяет существенно уменьшить расстояние между смежными электродами и установить оптимальные углы их наклона. При сварке на максимальной силе тока первых двух дуг используют водяное охлаждение мундштуков;
- использованием подающих механизмов с зависимой скоростью подачи электродной проволоки и применением цифровой системы управления сварочным аппаратом, обеспечивающей управление всеми его механизмами, установку и поддержание требуемых параметров режима горения дуги (силу тока с погрешностью  $\pm 25$  А, напряжения с погрешностью  $\pm 1$  В), возможность управления в цифровом и диаграммном видах, изменения режима сварки по заданной программе в начале и по окончании процесса, регистрации и хранения параметров процесса сварки в электронном виде, а также их последующего просмотра в различном временном масштабе;
- комплектацией аппаратов лазерными указателями и лазерными системами поиска и направления электродов по стыку кромок в вертикальном и горизонтальном направлениях, позволяющими получать дополнительную информацию о состоянии стыка кромок (радиальном смещении кромок, реальной ширине разделки, при необходимости — ее площади и др.);

- комплектацией аппаратов специальными токоподводами щеточного типа, расположенными симметрично по обе стороны от аппаратов вдоль и поперек свариваемого стыка.

Следует подчеркнуть, что использование в современных сварочных аппаратах втулочных мундштуков и пневматической подачи флюса позволяет значительно уменьшить их габариты и обеспечить выпуск четырехдуговых аппаратов для выполнения внутренних швов труб диаметром 426 мм и более.

По желанию заказчика сварочные аппараты комплектуют локальными узлами подготовки, подачи и отсоса флюса, которые включают систему отсоса, сепаратор, систему смешивания флюса после сепарации и «свежего» флюса, его нагрева и хранения в нагретом состоянии, а также систему пневматической подачи флюса.

Многолетняя мировая практика применения многодуговой сварки показывает, что при соответствующем выборе режимов сварки, марки электродной проволоки и флюса, современной сварочной аппаратуры и надлежащего выполнения вспомогательных операций по хранению, подготовке, уборке, сепарации флюса могут быть получены высококачественные сварные соединения ответственных металлоконструкций (трубы для магистральных газопроводов, резервуары, корпуса судов и др.) с обеспечением требуемой высокой производительности.

Автор придерживается точки зрения, что двух- и многодуговые процессы сварки под флюсом и в защитных газах имеют перспективу дальнейшего существенного развития и применения при изготовлении многих металлоконструкций различного назначения.

В последние годы промышленное распространение получила дуговая сварка неподвижным (закладным) плавящимся электродом (НПЭ) [132, 133]. Схема дуговой сварки НПЭ показана на рис. 77 [132]. Схемы сварки НПЭ стыкового соеди-

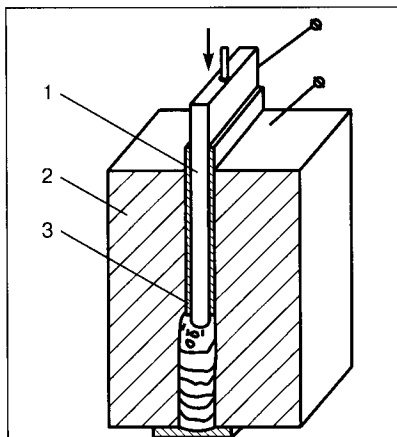
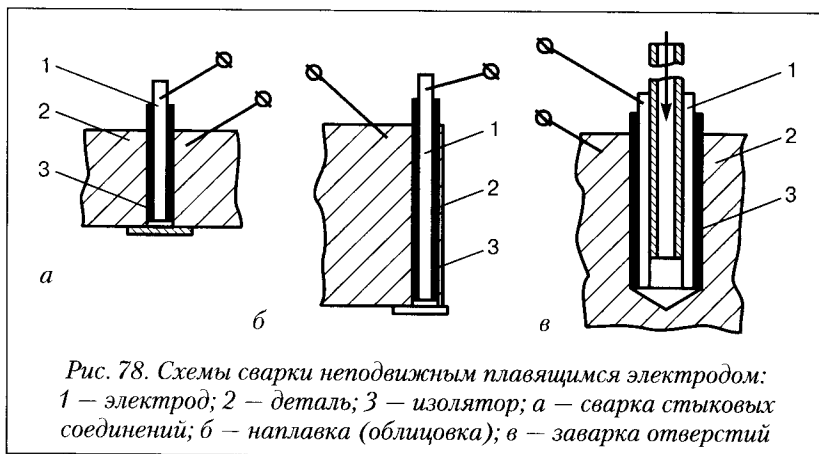


Рис. 77. Схема дуговой сварки неподвижным плавящимся электродом: 1 — неподвижный плавящийся электрод; 2 — свариваемый металл; 3 — изолятор





*Рис. 78. Схемы сварки неподвижным плавящимся электродом: 1 — электрод; 2 — деталь; 3 — изолятор; а — сварка стыковых соединений; б — наплавка (облицовка); в — заварка отверстий*

нения, наплавки (облицовки) плоской поверхности и заварки отверстий показаны на *рис. 78*.

Отличительной особенностью дуговой сварки НПЭ является наличие небольшого зазора между электродом и свариваемыми частями (0,5–1,0 мм), заполненного изолятором. Несмотря на столь узкий зазор, при сварке обеспечивается устойчивое горение электрической дуги. Сварку выполняют в вертикальном положении за один проход. При этом дуга движется самостоятельно в пределах всего сечения шва, обеспечивая полное его проплавление. По мере плавления электрода происходит заполнение пространства между свариваемыми деталями жидким металлом. Так как сборочные зазоры в стыке, хотя и минимальные, существуют, по мере образования шва может возникнуть дефицит металла электрода. Для его компенсации предусмотрена дополнительная подача металла, например, в виде проволоки сплошного сечения или порошковой, через отверстия в неподвижном электроде. Через это отверстие можно подавать другие добавки, такие как раскислители, шлакообразующие, газообразующие, легирующие, позволяющие регулировать качественные показатели сварного шва.

При дуговой сварке НПЭ не требуется специальной защиты зоны сварки от окружающего воздуха.

Технология дуговой сварки НПЭ предусматривает проведение предварительных операций, обеспечивающих стабильное горение дуги в течение всего процесса сварки [133]: очистку кромок свариваемых деталей от твердых частиц, органических соединений, вла-

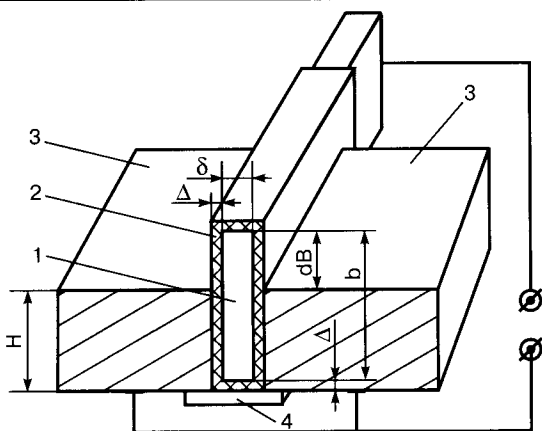


Рис. 79. Схема сборки деталей для дуговой сварки неподвижным плавящимся электродом: 1 — пластинчатый электрод; 2 — диэлектрическое покрытие; 3 — свариваемые детали; 4 — подложка ( $H$  — толщина свариваемых деталей,  $\delta$  — ширина электрода,  $b$  — высота электрода без покрытия)

ги и других загрязнений. При этом шероховатость свариваемых поверхностей  $R_z$  должна быть не ниже 40 мкм. В приспособлениях для сборки свариваемых деталей не должно присутствовать остаточное магнитное поле.

При выполнении дуговой сварки НПЭ по схеме, показанной на рис. 79 [133], предварительно определяют толщину диэлектрического покрытия  $\Delta$  и превышение пластинчатого электрода над поверхностью свариваемых деталей  $dB$ . Параметр  $\Delta$  выбирают исходя из условий гарантированного обеспечения термоэлектрической изоляции электрода от стенок свариваемого стыка и минимального размера, достаточного для заполнения зазора между кромками соединяемых деталей металлом электрода с учетом его превышения над стыком.

В [133] для изготовления диэлектрического покрытия использовали мелкодисперсный флюс 48-ОФ-6, который наносили на электрод по специальной технологии. После определения  $\Delta$  превышение электрода над плоскостью стыка свариваемых деталей определяют по формуле

$$dB = [\Delta(2H + 1)] / \delta.$$

Общая высота электрода  $B = H + dB$ .

При дуговой сварке НПЭ применяют источники питания со специальными ВАХ, но можно использовать и стандартные источники питания серийного производства (ВДУ-1201 с пологопадающей характеристикой или ВСВУ-800 с комбинированной) [133].

Требуемое значение силы сварочного тока при использовании источника питания тока ВСВУ-800 определяют из экспериментального соотношения

$$I_{св} = 375 + 100\delta.$$

При сварке с использованием источника питания ВДУ-1201 вводят поправку, учитывающую уменьшение силы сварочного тока при увеличении напряжения дуги

$$\Delta I_{св} = \frac{H \cdot \Delta \cdot U_{гср}}{(\delta + \Delta)L_{гср}} \cdot K,$$

где  $U_{гср}$  — среднее напряжение дуги, В;  $K$  — коэффициент, характеризующий наклон ВАХ источника питания, А/В;  $L_{гср}$  — средняя длина дуги, мм.

Зажигание дуги в момент начала сварки производят коротким замыканием металлической перемычки, установленной между торцом электрода и свариваемыми деталями.

С помощью дуговой сварки НПЭ можно выполнять следующие операции [132]:

- сварку стыковых, угловых, тавровых и нахлесточных соединений;
- облицовку металлических поверхностей с полной проплавкой свариваемых кромок;
- сварку однородных и разнородных металлов и сплавов;
- наплавку слоев с особыми свойствами;
- ремонтное восстановление отверстий и плоских поверхностей без последующей обработки.

В *табл. 76* приведены сравнительные данные, характеризующие особенности использования процесса дуговой сварки НПЭ, электрошлаковой сварки (ЭШС) и сварки с принудительным формированием (СПФ) [132].

К достоинствам дуговой сварки неподвижным плавящимся электродом относят:

- простоту и доступность оборудования;
- высокую производительность;
- низкое тепловложение;

**Таблица 76. Сравнительные показатели, характеризующие способы сварки**

<i>Параметр</i>	<i>НПЭ</i>	<i>ЭШС</i>	<i>СПФ</i>
Толщина свариваемого металла, мм	20–100	20–100	12–80
Зазор, мм	8–10	18–30	10–16
Напряжение, В	35–45	40–55	28–48
Сила тока, А	400–1200	450–850	400–700
Скорость сварки, м/ч	6–15	0,5–2,2	1–7
Удельное тепловложение, кДж/см <sup>2</sup>	15–30	120–200	40–80

- малую толщину сварного шва при небольшом проплавлении основного металла;
- возможность гибкого металлургического воздействия на металл шва при ограниченном влиянии на процесс сварки;
- получение мелкозернистой структуры металла шва при сварке металла больших толщин;
- малое потребление присадочных материалов;
- низкий уровень послесварочных напряжений и деформаций;
- отсутствие необходимости нахождения в зоне сварки рабочего-сварщика или оператора, контролирующего ход сварки;
- возможность сварки в малодоступных, замкнутых и др. местах;
- возможность осуществления сварки по заданным компьютерным программам с изменением режимов по ходу сварки.

Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что технология сварки плавящимся электродом продолжает развиваться и можно ожидать появления новых технологий и способов сварки на базе современных достижений электроники, электротехники и металлургии.

## **2.2. Дуговая сварка неплавящимся электродом**

При сварке неплавящимся электродом источником теплоты является дуга, возбуждаемая между вольфрамовым или угольным электродом и изделием. Угольные электроды в настоящее время находят ограниченное применение. Сварку вольфрамовым электродом выполняют в инертных газах (аргон, гелий или смеси этих газов).

Технологические характеристики сварки вольфрамовым электродом зависят главным образом от состава, формы и размеров торца последнего, состава инертного газа, рода, полярности и силы сварочного тока, а также других факторов, которые будут рассмотрены ниже [102, 135].

**Выбор и эксплуатация вольфрамового электрода.** Применяемые вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949-80 «Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия».

Для сварки в инертных газах применяют электроды диаметром 0,5–10 мм из чистого вольфрама (ЭВЧ), вольфрама с присадкой двуокиси тория (ЭВТ), вольфрама с присадкой окиси лантана (ЭВЛ), вольфрама с присадкой окиси иттрия (ЭВИ).

Размеры электродов и предельные отклонения размеров должны соответствовать указанным в *табл. 77*.

При применении вольфрамовых электродов, активированных окислами тория ( $\text{ThO}_2$ ), лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), иттрия ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) и других элементов с малой работой выхода электрона, блуждание катодного пятна отсутствует, повышается общая устойчивость дуги, заточенный конец не оплавляється, а при отсутствии коротких замыканий на ванну практически исключается вероятность засорения шва вольфрамовыми включениями.

**Таблица 77. Размеры вольфрамовых электродов и предельные отклонения размеров**

Марка	Номинальный диаметр, мм	Длина, мм
ЭВЧ	0,5	Не менее 3000 в мотках
	1,0; 1,6; 2,0; 2,5	75±1; 150±1
	3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	200±2; 300±2
ЭВЛ	1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0	75±1; 150±1
	5,0; 6,0; 8,0; 10,0	200±2; 300±2
ЭВИ-1	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0	75±1; 150±1
	8,0; 10,0	200±2; 300±2
ЭВИ-2	2,0; 3,0; 4,0	75±1; 150±1
ЭВИ-3	5,0; 6,0; 8,0; 10,0	200±2; 300±2
ЭВТ-15	2,0; 3,0; 4,0; 5,0	75±1; 150±1
	6,0; 8,0; 10,0	200±2; 300±2

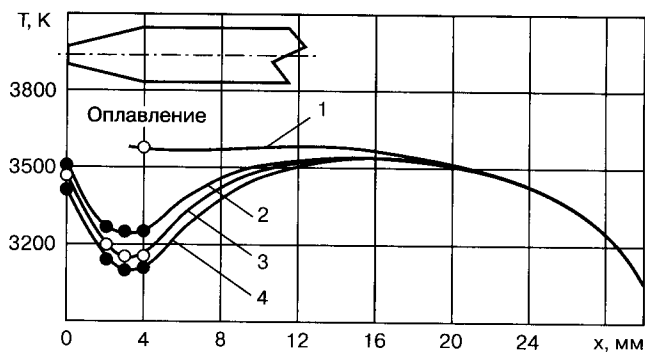
В состав вольфрамового электрода обычно вводят 1,5–3,0% окислов активирующих элементов. При длительной работе электрода активирующие элементы при высокой температуре в зоне активного пятна испаряются интенсивнее вольфрама. Поступление новых порций активирующих элементов происходит за счет диффузии в глубинных слоях твердого вольфрама.

Коэффициент диффузии иттрия на два порядка выше, чем аналогичный коэффициент тория и лантанидов. Поэтому иттрий благодаря интенсивной диффузии способен длительное время поддерживать необходимую концентрацию в зоне активного пятна. Вольфрамовые электроды с присадкой иттрия оказываются наиболее стойкими.

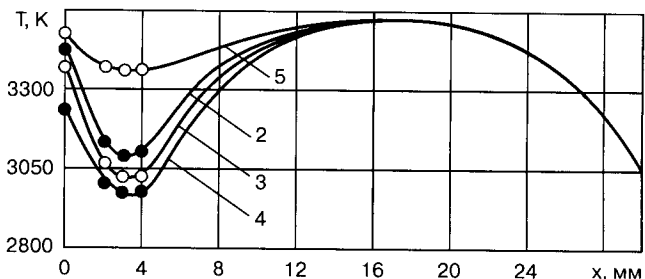
Эрозия вольфрамовых электродов в большой мере зависит от рода и силы сварочного тока, марки электрода, эффективности его охлаждения и газовой защиты. Если охлаждением электрода при данном значении силы сварочного тока поддерживается температура, при которой термоэмиссия электронов достаточна для обеспечения потребной плотности тока, то эрозия в этом случае минимальная. При переохлаждении электрода увеличивается доля ионного тока между электродом и плазмой столба, тепловой поток в тело электрода, а вместе с ним и эрозия. При аргонодуговой сварке на силе тока до 500 А удельный расход вольфрама колеблется в зависимости от технологических условий в пределах  $1 \cdot 10^{-8}$ – $8 \cdot 10^{-6}$  г/(А·с). Поэтому вопрос о выборе оптимального теплового режима для вольфрамового электрода является весьма важным.

В [136] исследовали влияние состава защитного газа на тепловые условия работы неплавящихся электродов. Установлено, что характер разрушения электрода зависит от особенностей его нагрева. Если с увеличением силы тока температура на рабочем участке достигает значения  $T_{пл}$  быстрее, чем на вылете, то происходит его оплавление, если наоборот — разрушение наступает за счет локального расплавления электродного стержня на вылете. Интенсивность увеличения температуры на рабочем участке и вылете электрода зависит от его конструкции, материала и состава защитного газа.

Согласно [136] при сварке на режимах, близких к критическим, распределение температуры по длине вылета электродов с конической заточкой при различных соотношениях компонентов газовой смеси имеет выраженный минимум, расположенный в зоне основания конуса (рис. 80). Наличие конической заточки приводит к сжатию катодного пятна, локализации его на вершине конуса, увеличе-



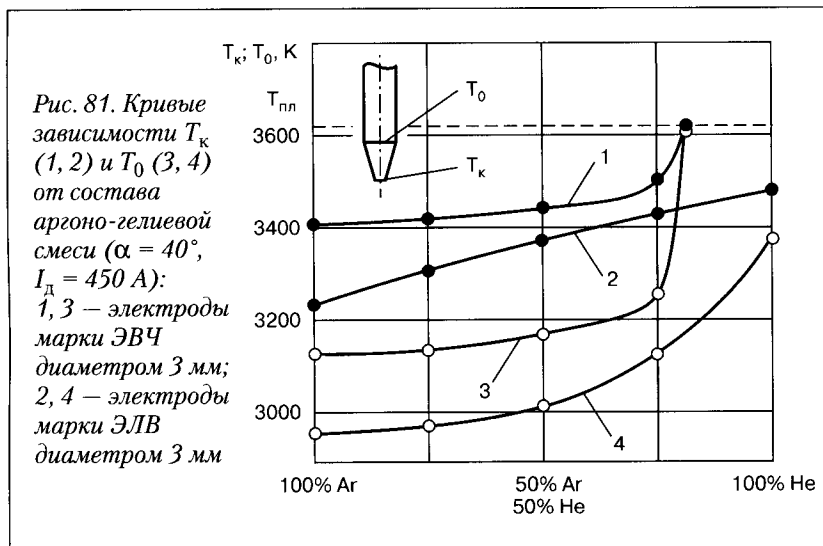
a



б

Рис. 80. Кривые распределения температуры по длине вылета электродов диаметром 3 мм ЭВЧ (а) и ЭЛВ (б) ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $I_d = 450$  А, длина дуги  $L_d = 2$  мм, вылет  $L_B = 40$  мм): 1 — 20% Ar + 80% He; 2 — 25% Ar + 75% He; 3 — 50% Ar + 50% He; 4 — 100% Ar; 5 — 100% He

нию плотности тока в направлении рабочего торца и, как следствие, возрастанию температуры. В то же время по данным [137] отсутствие конической заточки (электрод с цилиндрическим рабочим участком) исключает локальное увеличение температуры на рабочем торце при плотностях тока свыше  $55\text{--}70$  А/мм<sup>2</sup>. Независимо от формы рабочего участка при отмеченных плотностях тока температура электрода на вылете может превышать максимальное значение на рабочем торце или быть существенно ниже. Интенсивность увеличения температуры рабочего участка с увеличением силы тока в значительной мере определяют конструкция электрода и характер протекания катодных процессов. В результате независимо от исходного соотношения температур разрушение электрода с ростом силы тока может произойти как на рабочем участке за счет



его оплавления, так и на вылете электрода из-за чрезмерно высокого тепловыделения на его омическом сопротивлении.

На этот процесс существенно влияет состав защитного газа. С увеличением содержания гелия в смеси наблюдается преимущественно увеличение температуры рабочего участка (рис. 81), в то время как на вылете электрода ее распределение практически не изменяется [136]. Для лантанированного электрода температура  $T_K$  не достигает  $T_{пл}$  при любом соотношении аргона и гелия, а разрушение неплавящегося электрода всегда происходит примерно на середине вылета и носит «взрывной» характер. Наиболее интенсивный рост температуры рабочего участка наблюдается при увеличении содержания гелия — 75% и более.

Зависимость между максимально допустимой силой сварочного тока  $I_{св}$ , А и диаметром электрода  $d_э$ , мм при аргонодуговой сварке на постоянном токе прямой полярности выражается следующей эмпирической формулой [102]

$$I_{св} = 65d_э^{2/3}.$$

В табл. 78 приведены значения силы сварочного тока для различных марок и диаметров электродов при аргонодуговой сварке. Допустимая сила тока для других типов электродов находится в пределах этого диапазона.



**Таблица 78. Допустимые значения силы тока для вольфрамовых электродов**

<i>Диаметр электрода, мм</i>	<i>Постоянный ток прямой полярности, А</i>	<i>Постоянный ток обратной полярности, А</i>	<i>Переменный ток без постоянной составляющей, А</i>
Вольфрамовый электрод чистый			
1,0	15–60	–	15–20
1,6–2,0	100–200	–	20–60
3,0	80–250	25–40	60–150
4,0	200–360	40–50	120–200
5,0	350–550	50–80	180–300
6,0	500–700	80–125	250–340
Вольфрамовый иттрированный электрод марки ЭВИ-3			
1,0	25–85	–	20–40
3,0	80–350	25–40	60–200
4,0	200–500	40–50	120–250
5,0	400–750	50–80	180–300
6,0	450–900	80–125	280–500
8,0	600–1200	–	350–650

Электроды из чистого вольфрама применяют для сварки на переменном токе алюминия и его сплавов. Конец вольфрамового электрода в этом случае оплавляется с образованием полусферы на торце. При силе сварочного тока ниже допустимого значения образуются шарообразные капли, которые перемещаются по торцу электрода и периодически срываются в столб дуги. Максимальное значение силы сварочного тока ограничивают в связи с образованием чрезмерно большой капли расплавленного вольфрама, которая затрудняет сварку. Электроды из чистого вольфрама могут быть использованы и при сварке на постоянном токе, однако токовая нагрузка должна быть ниже, чем при использовании торированных или лантанированных электродов.

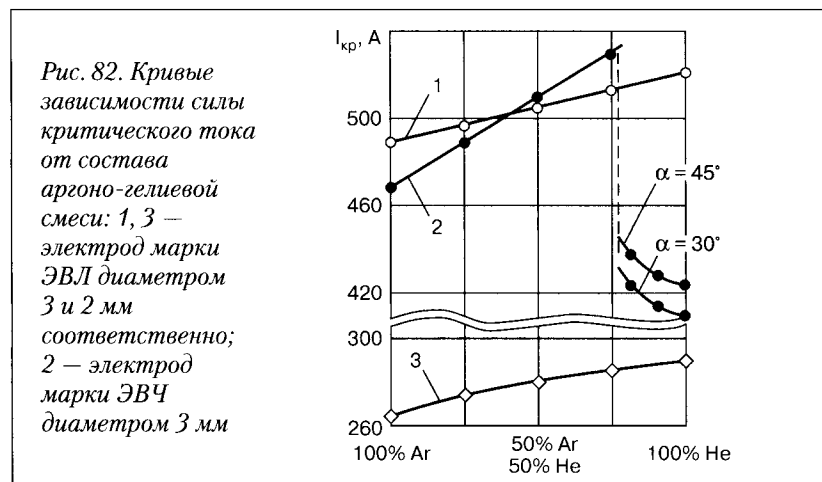
Торированные или лантанированные электроды, как правило, применяют для сварки на постоянном токе прямой полярности с заточкой электрода на конце с высотой, равной 2–3 диаметрам электрода. Острая заточка электрода исключает блуждание дуги по поверхности электрода.

Иттрированные вольфрамовые электроды обеспечивают максимальную токовую нагрузку по сравнению с токовой нагрузкой при использовании других марок вольфрамовых электродов. Их рекомендуют для сварки как на переменном, так и на постоянном токе.

Практический интерес представляют приведенные в [136] зависимости критического тока  $I_{кр}$  от состава аргоно-гелиевой смеси для электродов из лантанированного и чистого вольфрама (рис. 82). Критическим называли ток, при котором наблюдалось быстрое, прогрессирующее изменение формы рабочего участка или, при определенных условиях, — локальное разрушение в средней части вылета.

Для вольфрамовых электродов с присадками оксидов лантана и иттрия характерно некоторое возрастание  $I_{кр}$  с увеличением содержания гелия в смеси. Поскольку во всех случаях разрушение электрода происходило на вылете, рост  $I_{кр}$  с увеличением содержания гелия в защитном газе авторы [136] объясняют увеличением отвода тепла от корпуса электрода в результате повышения коэффициента теплоотдачи смеси.

Для электродов диаметром 3 мм из чистого вольфрама при изменении содержания гелия в смеси Ag + He от 0 до 75%  $I_{кр}$  возрастает (см. рис. 82). Однако при дальнейшем увеличении содержания гелия происходит резкое снижение стойкости электрода и изменяется характер его разрушения: наблюдается оплавление рабочего участка. Последнее обстоятельство, по мнению авторов, обусловлено увеличением катодного падения потенциала.



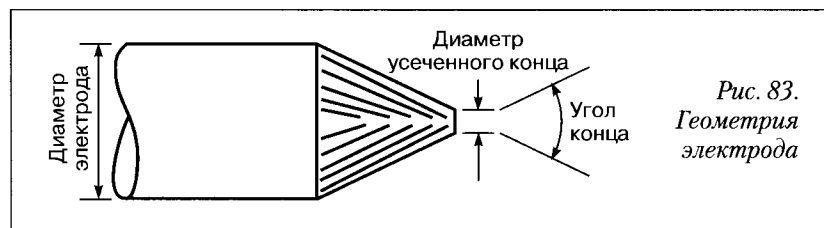
Из практики сварки известно, что боковая поверхность и конец вольфрамового электрода при правильном выборе параметров режима сварки и размеров электрода должны блестеть. Матовая поверхность означает, что тепловая нагрузка на электрод превышает рекомендуемую. Если поверхность электрода после сварки приобретает синий или черный цвет или имеет зеленый налет, это означает, что расход защитного газа недостаточен или время его продувки после отключения дуги мало.

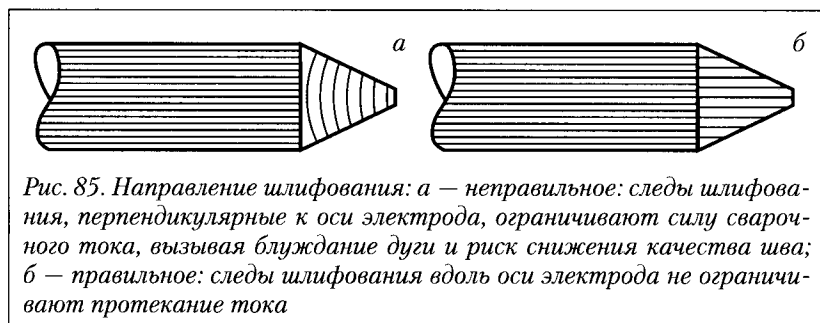
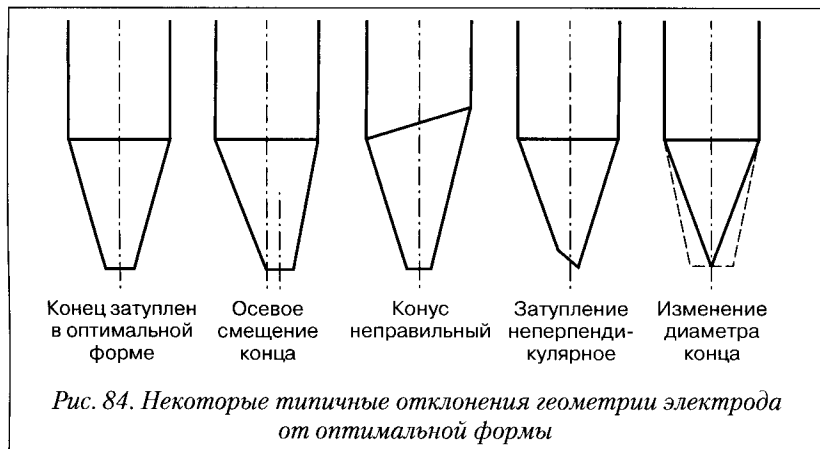
При длительной работе вольфрамового электрода на его рабочей поверхности у торца образуются наросты окислов вольфрама, так называемые «коронки», которые могут приводить к произвольному перемещению катодного пятна и блужданию дуги по поверхности сварочной ванны. Вероятность образования «коронки» уменьшается при интенсивном охлаждении электрода и улучшении газовой защиты.

На практике используют вольфрамовые электроды с заточкой под углом  $20-90^\circ$ . При этом конец неплавящегося электрода имеет форму усеченного конуса (рис. 83). Больший угол конуса и диаметр обеспечивают увеличение срока службы электрода, хорошие условия для проплавления, позволяют выполнять сварку на форсированных режимах без опасности эрозии электрода. Уменьшение угла и диаметра вызывает стабилизацию горения дуги, а также позволяет вести сварку на меньшей силе тока.

Любое отклонение геометрии электрода от оптимальной формы оказывает отрицательное влияние на качество шва (рис. 84) [138]. Царапины, следы шлифования оказывают большое влияние на проводимость электрода. Поэтому важно обеспечить шлифование электрода строго параллельно его оси (рис. 85) [138]. Для оптимальной формы электрода нужно, чтобы чистота его поверхности равнялась  $0,5 Ra$ .

Стабильного качества шва можно достичь, используя электроды, подготовленные на специальных шлифовальных машинах.





Обычно практикуемое ручное затачивание на универсальных шлифовальных кругах не гарантирует положительного результата.

**Особенности процесса сварки.** Для получения качественных швов при сварке неплавящимся электродом важно обеспечить устойчивое горение дуги, которое зависит от свойств электрода, состава защитного газа, источника питания и параметров электрической цепи.

Способность энергетической системы (источник — дуга) поддерживать длительное непрерывное горение дуги при возможных колебаниях ее параметров (длины, силы тока и величины напряжения) принято называть энергетической устойчивостью горения дуги [135]. Дуга с неплавящимся вольфрамовым электродом в процессе сварки по разным причинам может изменять длину. Для обеспечения постоянства проплавляющей способности дуги, т. е.

для устойчивости режима при изменении длины дуги, необходимо соответствующее изменение силы тока.

При сварке от источников питания без регуляторов желательна крутопадающая характеристика источника, обеспечивающая наиболее стабильное проплавление металла.

Однако наибольшая стабильность проплавления основного металла и формирования шва может быть достигнута при применении источников питания с регуляторами, построенными на базе электронных приборов.

Аргонодуговая сварка (АДС) постоянным током прямой полярности характеризуется максимальной проплавляющей способностью, и ее применяют для соединения изделий из углеродистых, легированных сталей, меди, никеля, титана и ряда других металлов и сплавов [135]. Для различных режимов аргонодуговой сварки на постоянном токе прямой полярности в диапазоне силы токов до 600 А доля тепловой мощности, вводимой в изделие, 40–90%, потери на нагрев вольфрамового электрода — примерно 5%, а лучевые потери от столба дуги — 7–35%.

Автоматическую сварку на постоянном токе прямой полярности применяют для соединения алюминиевых сплавов толщиной 15–20 мм. В этом случае процесс сварки, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, выполняют короткой дугой в гелии с погружением конца вольфрамового электрода внутрь сварочной ванны [139]. К достоинствам технологии гелиеодуговой сварки (ГДС) на постоянном токе прямой полярности относят высокую проплавляющую способность, в 1,5–2,0 раза большую по сравнению с проплавляющей способностью АДС, что дает возможность выполнять однопроводную сварку металла большой толщины на высоких скоростях, в 1,5–2,0 раза уменьшить тепловложение по сравнению с тепловложением при аргонодуговой сварке, уменьшить ЗТВ.

К недостаткам процесса относят:

- необходимость выполнять сварку короткой дугой, что требует применения автоматического управления;
- необходимость подходить к подготовке металла и к точности сборки соединений с более высокими требованиями, чем при АДС;
- удорожание процесса сварки.

Гелиеодуговую сварку на постоянном токе прямой полярности рекомендуют применять для сварки конструкций ответственного назначения из высокопрочных термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов.

Сварку постоянным током обратной полярности применяют для стыковых соединений из алюминиевых сплавов. Концентрация нагрева в этом случае ниже, швы имеют меньшую глубину и большую ширину проплавления, чем при сварке током прямой полярности или переменным током. К достоинствам сварки током обратной полярности следует отнести постоянное нахождение катодного пятна на изделии. При этом вследствие катодного распыления происходит эффективное разрушение окисной пленки с обеспечением высокой чистоты поверхности сварочной ванны. Процесс характеризуется высокой стабильностью горения дуги и хорошим сплавлением основного и присадочного металлов даже при не слишком тщательной подготовке поверхности изделия для сварки. Однако значительная тепловая нагрузка на вольфрамовый электрод-анод и опасность попадания материала электрода в шов ограничивают мощность дуги и производительность этого процесса. Как правило, сварка ведется на силе тока до 150 А.

Сварка переменным током является наиболее применяемой при изготовлении конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов. Очистка окисной пленки происходит в полупериод обратной полярности, когда основной металл является катодом. Так как разогретый вольфрамовый электрод лучше эмиттирует электроны, чем алюминий, то кривая напряжения дуги имеет несимметричную форму; в ней имеется постоянная составляющая, которая в свою очередь вызывает появление постоянной составляющей тока. Величина последней обусловливается суммарным омическим сопротивлением сварочной цепи.

Постоянная составляющая тока в сварочной цепи влияет на качество сварки алюминиевых сплавов. При сварке этих сплавов сварочная ванна даже при небольшом содержании  $O_2$  и  $N_2$  в аргоне оказывается покрытой тугоплавкой пленкой окислов и нитридов, препятствующих сплавлению кромок и формированию шва. При обратной полярности благодаря катодному распылению происходит разрушение окисной и нитридной пленок и, таким образом, улучшается сплавление кромок и формирование шва. Уменьшение силы тока в полупериоды обратной полярности, т. е. возникновение в цепи постоянной составляющей тока, приводит к загрязнению поверхности сварочной ванны, затруднению сплавления кромок и ухудшению формирования швов.

Выпрямление сварочного тока компенсируют схемой управления сварочного источника [135]. Газовую защиту при сварке непла-

вящимся электродом в большинстве случаев осуществляют аргоном. Применение гелия взамен аргона увеличивает проплавляющую способность дуги, устраняет пористость и улучшает формирование шва при высоких скоростях сварки. Для повышения тепловой мощности дуги при сварке меди применяют азот. Расход газа, необходимый для получения чистых, качественных швов зависит от ряда факторов: состава основного и присадочного металлов, формы и размеров сопла, типа соединения и условий выполнения сварки (заводских или при монтаже). Расход аргона при ручной сварке алюминия увеличивается с 300 л/ч при силе тока 100 А до 900 л/ч при силе тока 500 А.

Газовую защиту обратной стороны шва при сварке титана, легированных сталей и никелевых сплавов осуществляют поддувом аргона. Азот используют для защиты обратной стороны шва при сварке меди. При сварке алюминия газовую защиту обратной стороны шва обычно не применяют.

Время продувки газа после отключения дуги зависит от значения силы сварочного тока. Его выбирают в пределах 5–20 с, и оно должно быть достаточным, чтобы предотвратить окисление поверхности сварочной ванны и торца вольфрамового электрода.

Сила сварочного тока и скорость сварки определяют необходимое вложение теплоты, и их выбирают в зависимости от состава и толщины свариваемого металла. Формирование и размеры шва при сварке неплавящимся электродом зависят от теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну. При сварке на силе тока до 150 А проплавление достигается главным образом за счет передачи теплоты от дуги и конвекции расплавленного металла, влияние же давления незначительно. В диапазоне сил сварочных токов 250–600 А существенную роль в проплавлении и формировании шва играет механическое воздействие дуги.

*На рис. 86 показаны кривые влияния силы сварочного тока на параметры проплавления и силовое воздействие дуги на сварочную ванну [102].* Зависимости глубины  $H$  и ширины  $B$  проплавления получены при сварке пластин из стали IX18H9T толщиной 16 мм со скоростью сварки 10 м/ч; диаметр лантанированного электрода 5 мм, угол заточки  $60^\circ$ , диаметр притупления 2 мм, длина дуги 2 мм, расход аргона 15 л/мин.

Увеличение силы сварочного тока с 300 до 600 А приводит к линейному возрастанию силового воздействия дуги  $F$  с  $6 \cdot 10^{-2}$  до  $15 \cdot 10^{-2}$  Н. В связи с этим столб дуги углубляется в расплавленный

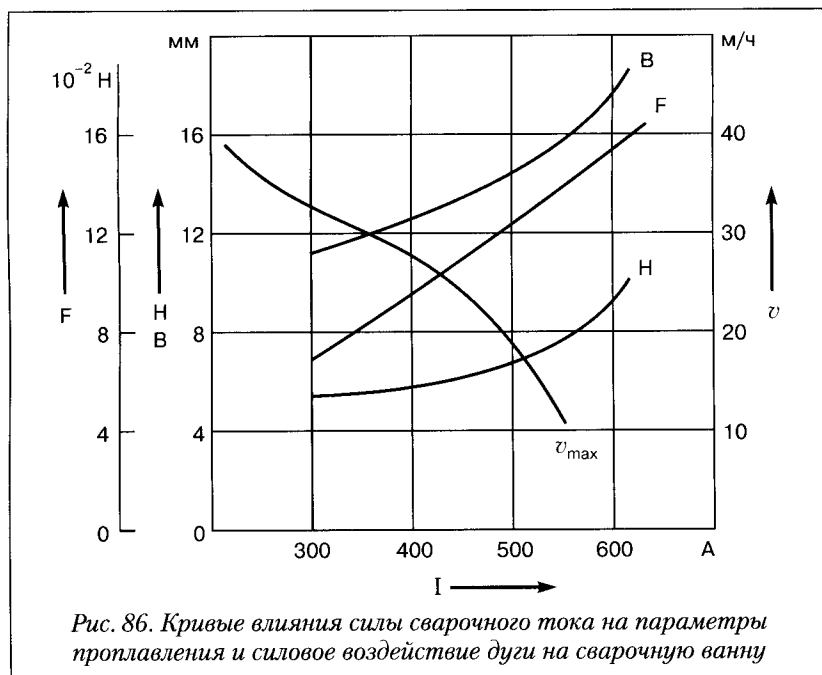


Рис. 86. Кривые влияния силы сварочного тока на параметры проплавления и силовое воздействие дуги на сварочную ванну

металл, в результате чего уменьшается прослойка жидкого металла под дугой и улучшаются условия передачи теплоты в основной металл. Однако глубина проплавления  $H$  увеличивается всего лишь на 40–80%, а ширина  $B$  возрастает почти в 2 раза.

Область хорошего формирования швов ограничена кривой максимально допустимой скорости сварки  $v_{max}$  (см. рис. 86). В диапазоне силы тока до 400 А допустимая скорость снижается плавно, а в диапазоне силы тока 400–500 А резко падает вниз. При скоростях сварки ниже критической шов формируется равномерно, расплавленный металл заполняет шов по всей ширине. Если скорость сварки превышает допустимую, образуются подрезы, наблюдается периодическое нависание верхних слоев расплавленного металла над кратером сварочной ванны, захлестывание газом столба дуги и образование газовых полостей в швах. В корневой части иногда образуются непрерывные газовые каналы.

Влияние угла заточки вольфрамового электрода (катода) на образование газовых полостей и подрезов исследовали в работе [140]. Эксперименты показали, что с увеличением угла заточки электрода



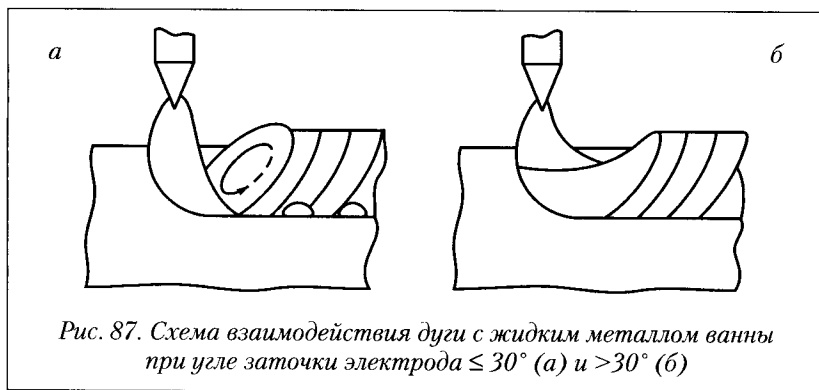


Рис. 87. Схема взаимодействия дуги с жидким металлом ванны при угле заточки электрода  $\leq 30^\circ$  (а) и  $> 30^\circ$  (б)

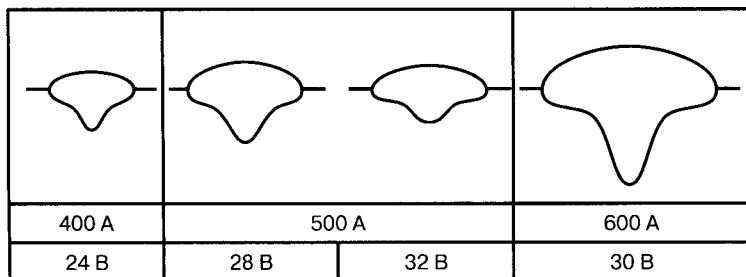
склонность к образованию газовых полостей заметно уменьшается (рис. 87). При концентрированном распределении скоростного напора дуги, характерного для малых углов заточки электрода, давление плазменного потока достаточно велико, дуга углубляется почти до корня шва, вытесняя металл. При этом образуется значительный подпор жидкого металла (рис. 87, а), что может привести к обратному натеканию металла шва и захлестыванию газовых полостей в корне шва.

При больших углах заточки электрода скоростной напор дуги распределяется почти по всей поверхности жидкого металла, а кратер в ванне приобретает пологую форму (рис. 87, б). В последнем случае швы имеют меньшую склонность к образованию подрезов.

Вероятность появления указанных дефектов шва снижается при использовании гелия вместо аргона, уменьшении длины дуги или увеличении угла заточки вольфрамового электрода.

Длина дуги (напряжение дуги) является одним из основных параметров, влияющих на формирование шва и проплавляющую способность (рис. 88) [141]. При сварке короткой дугой (низкое напряжение дуги) может образоваться проплавление специфической формы с резким углублением по оси шва. Такая форма характерна для сварки при высокой плотности тока, особенно при аргонодуговой сварке, когда дуга углубляется в расплавленный металл вследствие интенсивного вытеснения жидкого металла из-под основания дуги.

Длину дуги выбирают в зависимости от типа соединения, марки и толщины свариваемого металла. Для сварки без присадочной проволоки длину дуги устанавливают в пределах 0,5–2 мм, а при



0 5 10 15 мм

Рис. 88. Формы проплавления в зависимости от силы тока и напряжения дуги (аргонодуговая сварка алюминия плавящимся электродом диаметром 3,2 мм,  $v_{св} = 18$  м/ч)

использовании присадочной проволоки длина дуги может быть увеличена до 3–4 мм. Сварку в различных пространственных положениях обычно выполняют при минимально возможной длине дуги с целью сокращения объема сварочной ванны и улучшения формирования шва. С увеличением длины дуги линейно растет напряжение дуги, увеличивается ее диаметр и пятно нагрева. При этом, как правило, глубина проплавления уменьшается, а ширина шва во всех случаях интенсивно возрастает.

Стабильность проплавления при сварке длинными, свыше 4 мм, дугами снижается вследствие того, что уменьшается жесткость столба дуги и возможны его отклонения и искривления.

**Техника и режимы сварки.** Сварку вольфрамовым электродом применяют для стыковых, угловых, нахлесточных соединений в различных пространственных положениях [102, 135, 141]. Форма подготовки кромок зависит от толщины соединяемых элементов и возможности производить сварку с одной или двух сторон. Стыковые соединения стали толщиной до 3–4 мм, а алюминия толщиной до 5–6 мм сваривают без скоса кромок. Проплавление корня шва стыкового соединения с разделкой кромок обычно осуществляют без присадочной проволоки, затем разделку заполняют расплавленным металлом за необходимое число проходов с подачей присадочной проволоки. В некоторых случаях присадочную проволоку подают при выполнении корневого прохода, например при сварке металлов, склонных к растрескиванию.

Соединение жидкотекучих металлов, например алюминия, меди, магния и их сплавов, рекомендуют выполнять в нижнем положении. При необходимости ведения сварки на вертикальной плоскости шов следует выполнять сверху вниз для толщин до 5 мм и снизу вверх — для больших толщин. В этих случаях сварку рекомендуют выполнять одновременно с двух сторон. При использовании такого приема можно сваривать встык элементы или детали из алюминиевого сплава толщиной до 16 мм.

Сварка горизонтальных стыковых швов на вертикальной плоскости и потолочных стыковых швов затруднена из-за вероятности вытекания расплавленного металла из сварочной ванны, поэтому их следует избегать; там, где избежать сварки таких швов нельзя, их выполняют с разделкой кромок за несколько проходов.

Ручную сварку угловых соединений алюминиевых сплавов толщиной до 5 мм выполняют с двух сторон без разделки кромок, применяя присадочную проволоку.

Дугу зажигают с помощью устройства поджига дуги (УПД) (осциллятора) или уменьшенным до 7–10 А током зажигания. При ручной сварке алюминия и отсутствии устройства поджига дуги дуга должна зажигаться на угольной или медной пластине. При сварке труб с разделкой кромок дуга зажигается в разделке или на ранее наплавленном металле шва. Зажигание дуги на свариваемом металле вне разделки не допускается.

В начале шва необходимо разогреть кромки свариваемых элементов, плавно перемещая дугу на небольшом участке. Присадочную проволоку вводят после образования сварочной ванны.

В ряде случаев присадочную проволоку вводят в сварочную ванну возвратно-поступательными движениями небольшими порциями серповидными колебательными движениями поперек шва. Это обеспечивает благоприятные условия для перемешивания и сплавления присадочного материала с основным.

В процессе сварки необходимо следить, чтобы разогретый конец присадочной проволоки находился внутри потока защитного газа. Погружая проволоку в сварочную ванну, нужно одновременно слегка отводить от ванны конец вольфрамового электрода. Подача проволоки и отвод конца вольфрамового электрода должны выполняться плавно, без резких движений, могущих нарушить течение защитной струи газа. При ручной сварке тонкостенных деталей горелку рекомендуют перемещать справа налево. Ось вольфрамового электрода должна отклоняться от вертикали на угол 10–30° в сто-

рону, противоположную направлению сварки. Присадочную проволоку подают впереди столба дуги в переднюю часть ванны под углом 5–20° к поверхности свариваемого металла. При механизированной сварке сталей этот угол может быть увеличен до 35–55°. Не следует вводить конец присадочной проволоки в столб дуги, где под действием высокой температуры она интенсивно плавится и разбрызгивается.

Для соединения металлов больших толщин, особенно алюминия и его сплавов, рекомендуют применять правый способ ручной сварки, так как в этом случае обеспечивается удобство наблюдения за процессом и лучшее перемешивание присадочного и основного металлов.

Присадочная проволока должна находиться в одной плоскости с вольфрамовым электродом. Для механизированной сварки применяют присадочную проволоку диаметром 1–2,5 мм. При ручной сварке диаметр проволоки может быть увеличен до 5 мм.

Нельзя допускать касания торцом вольфрамового электрода расплавленной ванны жидкого металла. Если касание произошло, сварка должна быть приостановлена, а загрязненный участок шва должен быть зачищен или вырублен. Торцев вольфрамового электрода следует зашлифовать и прожечь, возбуждив дугу на вспомогательном медном элементе. После вынужденного обрыва дуги сварку возобновляют на расстоянии не менее 10–15 мм до обрыва, не допуская заметного усиления шва.

Кратеры швов должны быть тщательно заплавлены. Гашение дуги должно производиться путем постепенного уменьшения силы сварочного тока. Время снижения силы тока не менее 5 с. К моменту обрыва дуги сила сварочного тока должна быть снижена до значения, исключающего возникновение дефектов в шве.

При выполнении однослойного стыкового шва или первого слоя многослойного стыкового шва должно быть обеспечено полное его проплавление с образованием проплава с обратной стороны шва. Обратный валик формируется на весу или с помощью подкладок.

Подкладку обычно выполняют с продольной канавкой глубиной 0,5–2,0 мм и шириной 3–20 мм. Подкладки изготавливают из меди при сварке сталей и жаропрочных сплавов, при сварке алюминиевых и титановых сплавов — из нержавеющей стали. В ответственных случаях, где загрязнения медью недопустимы, используют подкладки из того же материала, что и изделие, или керамические материалы.

Газ для защиты обратной стороны шва подают через отверстие в подкладке. Газовую защиту обратной стороны шва при сварке труб осуществляют с помощью заглушек, располагающихся по обе стороны от стыка. С обратной стороны шва не должно создаваться чрезмерного давления газа на сварочную ванну во время сварки или к концу ее, так как это может привести к образованию вогнутого валика или даже выдуванию сварочной ванны.

Ориентировочные режимы ручной и автоматической сварки стали IX18H9T приведены в *табл. 79*. Ориентировочные режимы ручной и автоматической сварки алюминиевых сплавов даны в *табл. 80* и *81*. В *табл. 82* даны ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки титана за один проход. Сварку выполняют горелкой, имеющей козырек длиной 60–100 мм для дополнительной газовой защиты остывающего шва. О качестве защиты можно ориентировочно судить по цвету шва. При хорошей газовой защите поверхность шва имеет серебристый цвет. При насыщении газами ее цвет изменяется от светло-желтого до серого.

В *табл. 83* приведены ориентировочные режимы однопроводной автоматической сварки вольфрамовым электродом титана

**Таблица 79. Режимы ручной и автоматической сварки стали IX18H9T**

Форма кромок	Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Диаметр присадочной проволоки, мм	Примечание
Ручная сварка						
Без скоса	2,0	80–100	10–11	–	1,2–1,6	–
V-образные	4,0	60–90 (1-й проход)	10		–	
		60–90 (2-й проход)	10–11		1,6–2,0	
Автоматическая сварка						
Без скоса	1,0	50–100	9–10	30–60	–	Расход аргона 5–10 л/м
	1,5	75–150	9–10	14–50		Диаметр вольфрамового электрода 3 мм
	2,5	110–200	10	12–21		Ток постоянный прямой полярности

Таблица 80. Ориентировочные режимы ручной сварки алюминиевых сплавов

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки					
				Сила сварочного тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число про- ходов	
	2	0+1,0	-	70-80	2	2-2,5	5-6	2	
	3	0+1,5		100-140	3	3	7-8		
	4	0+2,0		160-190	4	3-4	7-8		
	2	0+1,0	-	80-100	3	2,5-3,5	5-6	1	
	3		-	120-140		3	7-8		
	2	0+1,0	-	80-100	2	2,5-3,5	5-6	1	
	3			120-140	3	3	7-8	1	
	4			160-210	4	4	7-8	2	
	4	0+1,0	1,0+0,5	150-200	6	3-4	7-8	1	
	6		1,0+1,0	250-300	5	4	8-9		
	8		1,0+1,0	300-350	5-6	4-5	9-10		2
	10		1,0+1,0	350-400	6-7	4-5	10-12		
	4	1,0+1,0	1,0+0,5	220-260	4	3-4	8-10	1	
	6	1,5+1,0	1,0+1,0	260-300	4-5	4	10-12		
	8	2,0+1,0	1,0+1,0	320-360	5-6	4	12-14		
	10	2,0+1,0	1,0+1,0	380-420	6-7	4-5	16-18		
	15	2,5+1,0	1,0+1,0	440-480	8	4-5	16-18		

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки					
				Сила сварочного тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число про- ходов	
	10	0+1,0	1,0+0,5	350-400	6-7	4-5	10-12	4	
	15	0+1,5		380-420	7		16-18		
	20	0+1,5		480-550	8		18-20		
	2	0+0,5	-	100-120	2-3	2	5-6	2	
	4	0+1,0		170-220	4		3-4		7-8
	6	0+1,5		240-280	5		4		8-10
	4	0+1,0	0,5+0,5	170-220	4	4	8-10	2	
	10	0+1,5	1,0+0,5	350-400	6-7		4-5		10-12
	15	0+2,0	1,5+0,5	380-420	7		4-5		16-18

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	s, мм	b, мм	c, мм	Режим сварки				
				Сила сварочного тока, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число про- ходов
	8	0+1,0	0,5+0,5	280–320	5–6	4	8–10	2
	10	0+2,0	1,0+0,5	350–400	6–7	4–5	10–12	
	15	0+2,0	1,5+0,5	380–420	7	4–5	16–18	
	20	0+2,0	1,5+0,5	480–550	8	4–5	18–20	5
	2	0+0,5	0+1,0	100–120	2–3	2–3	5–6	2
	4	0+1,0		150–200	4	3	8–10	
	6	0+1,5		220–260	5	4	8–10	
	4	0+1,0	0,5+0,9	150–200	4	3–4	8–10	2
	10	0+1,5	1,0+0,9	320–380	6–7	4–5	10–12	
	15	0+2,0	1,5+0,5	360–400	7	4–5	16–18	3



Таблица 81. Ориентировочные режимы автоматической сварки алюминиевых сплавов

Подготовка кромок свариваемых деталей и форма выполнения шва	S, мм	b, мм	с, мм	Режим сварки							
				Сила тока, А	Диаметр присадочного электрода, мм	Диаметр проволоки, мм	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Число проходов	
	2-3	0+1,0	-	120-150	3-4	2	15-25	90-100	6-9	2	
	4			200-220	4-5		15-20	75-90	16-18		
	4		1,0+0,5	150-200	4-5	2	12-18	90-100	10-14	2	
	6		1,0+1,0	250-300	5-7	2-3	12-18		14-18		
	8-10		1,0+1,0	370-400	7-8	2-3	10-16		16-20		
	2-3		0+1,0	-	130-170	3-4	2	20-25	75-100	6-10	1
	4				240-280	5	2-3	15-20		10-15	
	6				280-320	6	2-3	15-20		10-15	
	8-10		1,0+1,0	-	370-420	7-8	2-3	10-15	90-100	15-20	2
	10				340-380						

**Таблица 82. Ориентировочные режимы ручной сварки титана с подачей присадочной проволоки**

Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона для защиты	
				шва	обратной стороны шва
0,5	25–35	8–10	1,0–1,2	5–6	2
0,8	40–50		1,0–1,6	6–7	2–3
1,0	50–60			6–8	
1,5	70–90	9–11	1,6–2,0	7–8	2–4
2,0	90–100	11–13		8–10	
2,5	110–120			10–12	
3,0	120–140				

**Таблица 83. Ориентировочные режимы однопроходной автоматической сварки титана без разделки кромок и присадочной проволоки**

Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	
0,8	60–80	8–10	25–35	5–8	
1,0	70–100	9–11		6–8	
1,5	120–150	10–12		7–9	
2,0	160–200			25–30	
2,5	190–240	11–13		25–30	9–11
3,0	280–300				

встык без разделки кромок и присадочной проволоки. Сварку выполняют на медной подкладке с глубиной паза до 2 мм, расход аргона на поддув со стороны корня шва 2–3 л/мин.

В табл. 84 приведены ориентировочные режимы автоматической сварки меди встык присадочной проволокой из бронзы БрКМц3-1. Медь толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок, а при толщине 6–10 мм — с V-образной разделкой кромок с углом раскрытия 70–90° и притуплением 1,5–2,0 мм.

Для расширения диапазона свариваемых толщин и типов материалов, увеличения производительности сварки вольфрамовым электродом, повышения постоянства провара и качества шва в целом разработаны различные промышленные способы сварки: свар-

**Таблица 84. Ориентировочные режимы сварки меди**

Толщина, мм	Зазор между кромками, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Температура нагрева, °С	Расход газа, л/мин	Число проходов
Аргонодуговая сварка							
2	0–0,5	100–120	10–14	25–30	–	10–12	1
3	0,5–1,0	200–220	11–15	25–30	–	12–14	1
4	1,0–1,5	380–400	12–16	30–35	300–400	12–14	2
Азотодуговая сварка							
2	0–0,5	70–90	20–24	20–22	–	16–18	1
3	0,5–1,0	120–140	22–26	20–22		18–20	1
4	1,0–1,5	180–200	24–28	18–20		18–20	2
6	1,0–1,5	260–280	26–30	16–18	400–600	20–22	3
8		380–400	30–35	12–14		20–22	6
10		400–420	31–36	12–14		22–24	6

ка пульсирующей дугой с подогревом присадочной проволоки; с использованием активных флюсов и активных газов; несколькими вольфрамовыми электродами и др. Эти способы продолжают совершенствоваться и развиваться.

**Сварка пульсирующей дугой.** Особенность сварки пульсирующей дугой состоит в том, что скорость и количество вводимой в изделие тепловой энергии определяются режимом пульсации дуги, который в свою очередь устанавливается по определенной программе в зависимости от свойств свариваемого материала, его толщины, пространственного положения шва и т. п. [142]. Скорость нарастания и спада электрической мощности дуги, частота и амплитуда ее пульсации изменяются в довольно широких пределах.

Пульсация сварочного тока, напряжения и сопротивления дуги определяют характер и количество вводимой в изделие теплоты, а изменение длины дуги за счет углубления ее в сварочную ванну под влиянием изменяющегося давления, площади поперечного сечения дуги и ее диаметра влияет на проплавление, геометрические формы разделки кромок деталей для сварки, ширину шва, его формирование.

При сварке пульсирующей дугой металл плавится во время импульса тока и кристаллизуется в течение паузы. Дуга перемещается

с постоянной скоростью или отдельными шагами, синхронизированными с импульсами сварочного тока. В результате шов представляет собой серию частично перекрываемых точек. К параметрам режима относят амплитуды тока импульса и тока паузы, длительность импульса и паузы, шаг перемещения.

Сварка пульсирующей дугой обеспечивает лучшую стабильность проплавления в различных пространственных положениях, меньшую чувствительность к неточностям сборки. Снижение теплового потока в моменты тока паузы позволяет уменьшить перегрев сварного соединения, а следовательно, и деформацию.

Если автоматическую сварку ведут с присадочной проволокой, то ее подачу осуществляют в момент тока импульса; при токе паузы скорость подачи уменьшают или снижают до нуля. Когда автоматическую сварку выполняют с поперечными колебаниями сварочной горелки, например при соединении неповоротных стыков труб с разделкой кромок, импульсы сварочного тока подаются в моменты нахождения дуги у кромок. Во время прохождения дуги через центральную часть разделки силу сварочного тока уменьшают с одновременным уменьшением скорости подачи присадочной проволоки. Это позволяет улучшить сплавление кромок и получить более равномерное формирование шва во всех пространственных положениях.

При ручной сварке пульсирующей дугой сварщик следит за миганиями дуги, задерживая на месте горелку в момент тока импульса, и перемещает ее примерно на  $2/3$  диаметра сварочной ванны в момент тока паузы. Присадочную проволоку в этом случае подают в зону сварки без окунания конца электрода в ванну, как это принято при аргонодуговой сварке непрерывным током.

В *табл. 85* приведены ориентировочные режимы автоматической и ручной сварки пульсирующей дугой неповоротных стыков трубопроводов из стали IX18H9T. Сварка пульсирующим током неповоротных стыков трубопроводов, особенно малого диаметра, обеспечивает равномерность проплавления как корня шва, так и стенок разделки.

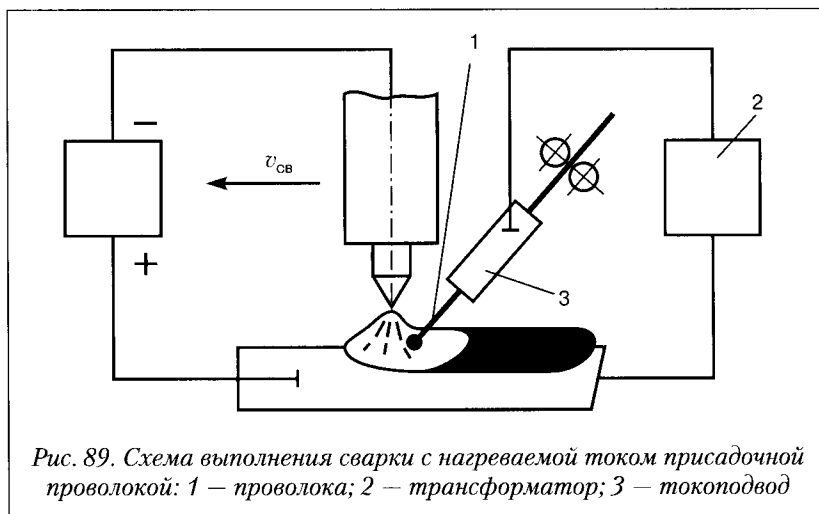
**Сварка присадочной проволокой, подогреваемой током.** Обычно сварку подогреваемой присадочной проволокой выполняют по схеме, представленной на *рис. 89* [102]. Через присадочную проволоку *1* пропускают ток от дополнительного трансформатора *2*. Механизм подачи присадочной проволоки и токоподвод *3* должны быть электрически изолированы от изделия.

**Таблица 85. Ориентировочные режимы сварки поворотных стыков пульсирующей дугой трубопроводов из стали IX18H9T**

Форма кромок	Толщина стенки, мм	№ прохода	Сила сварочного тока, А		Длительность, с		Скорость сварки, м/ч
			импульса	паузы	импульса	паузы	
Автоматическая сварка							
Без скоса	1,0	1	80–85	8	0,1–0,15	0,15–0,25	6–18
	2,0		105–110	8	0,2–0,25	0,25–0,3	10–12
	4,0		110	20	1,0	0,7–0,8	4
Ручная сварка							
Без скоса	1,0–1,5	1	40–50	6–8	0,1–0,15	0,15–0,25	–
	2,0–2,5		50–70		0,4–0,6	0,3–0,5	
V-образные, угол раскрытия 60–70°, притупление 1 мм	2,5–4,0	1	105–125	6–8	1,5–2,0	0,3–0,5	–
		2		–	–	–	

*Примечание. Расход аргона: в горелку – 6–12 л/мин, на поддув – 2–6 л/мин.*

Присадочная проволока в зависимости от требований к способу сварки и характеристик конкретной детали может подаваться в сварочную ванну спереди, сбоку, сзади.



При пропускании тока присадочная проволока нагревается за счет джоулевой теплоты. Применение нагретой присадочной проволоки позволяет существенно увеличить производительность сварки. При силе сварочного тока 330 А наибольшая производительность наплавки при применении холодной присадочной проволоки из нержавеющей стали 1,3 кг/ч, а при применении нагретой — до 3,5 кг/ч; она может быть еще увеличена при поперечных колебаниях дуги [102]. При силе сварочного тока 500 А и поперечных колебаниях дуги производительность увеличивается до 12 кг/ч. Другим преимуществом этого способа является снижение вероятности образования горячих трещин при сварке сталей аустенитного класса. Нагрев присадочной проволоки обеспечивает снижение пористости в наплавленном металле.

Этот способ находит применение при сварке сосудов и поворотных стыков труб из углеродистых, нержавеющей сталей и медно-никелевых сплавов. Особенно эффективно применение подогрева присадочной проволоки для заполнения стыковых соединений, имеющих разделку с параллельными кромками.

В [143] сообщается о ТИГ-сварке в ультразвуки зазор (до 5 мм) с подачей горячей присадочной проволоки. Улучшению сплавления шва со стенками способствует импульсно-дуговой способ сварки и применение гелия в качестве защитного газа. Разработанная сварочная горелка имеет ширину 3 мм и длину 200 мм.

Фирма «Фрониус-Факел» рекламирует оборудование для дуговой сварки с присадочной подогреваемой проволокой (способ «TIG-Hotwire») [144]. Принципиальная схема этого способа показана на *рис. 90*. Отличительной особенностью способа TIG-Hotwire является использование отдельных импульсных источников сварочного тока и тока подогрева. Источник питания, используемый для нагрева проволоки, обеспечивает рабочее напряжение от 1,5 до 5 В, что позволяет исключить возникновение сварочной дуги на горячей проволоке. Синхронная подача импульсов как от сварочного источника, так и от источника подогрева способствует повышению качества сварных швов, а также выполнению работ в различных пространственных положениях.

TIG-Hotwire применяют для сварки обычной и высокоуглеродистой стали, двухфазных нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов, а также износостойкой наплавки стеллита.

При сварке с нагреваемой током присадочной проволокой происходит взаимодействие сварочного тока, протекающего по дуге, с

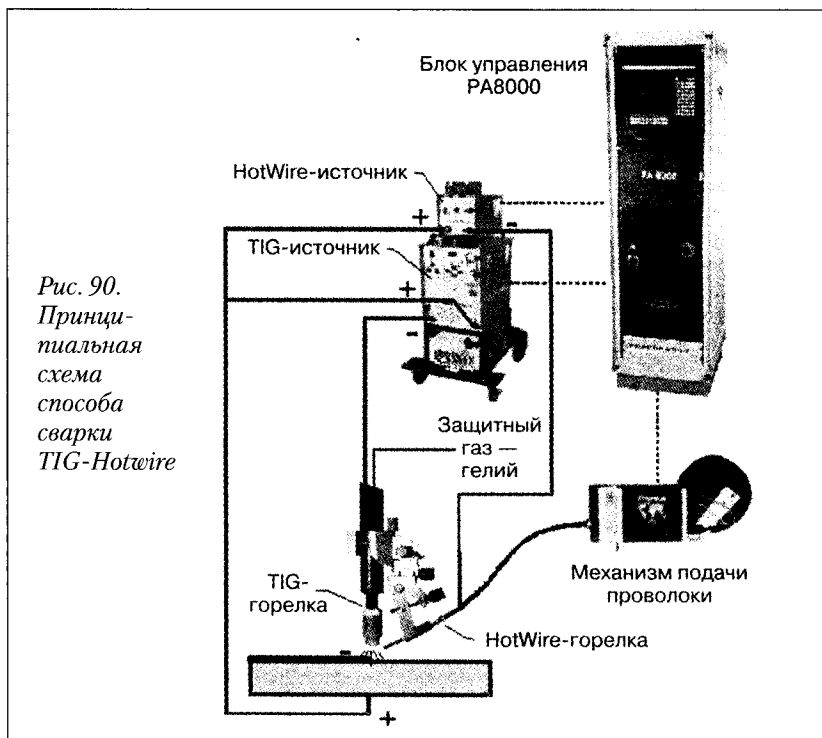


Рис. 90.  
Принципиальная  
схема  
способа  
сварки  
TIG-Hotwire

магнитным полем тока подогрева, вызывающее отклонение дуги от вертикальной оси.

В [145] исследовали влияние колебаний дуги, обусловленных пропуском переменного тока через присадку, на параметры проплавления, структуру, разупрочнение и механические свойства сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов, полученных при сварке неплавящимся электродом.

В качестве источника питания сварочной дуги использовали MW 450 (фирма «Фрониус», Австрия), с помощью которого изменяли частоту тока в пределах 50–250 Гц. Для создания электромагнитного поля вокруг присадочной проволоки через ее участок пропускали переменный синусоидальный ток частотой 50 Гц, используя трансформатор ТДМ-315 и балластный реостат РБ-300. Установлено, что пропускание переменного тока через присадку при ТИГ-сварке приводит к постоянному изменению положения дуги и колебаниям расплавленного металла сварочной ванны. Параметры

проплавления швов при этом зависят от амплитуды и частоты перемещения дуги, определяющихся током, проходящим через дуговой промежуток и участок присадки, и частотой смены его полярности. С повышением частоты сварочного тока от 50 до 250 Гц частота колебаний дуги также увеличивается, а глубина проплавления растет. При малых значениях силы тока, проходящего через присадку, глубина шва меньше, чем при сварке стационарной дугой. С возрастанием значений силы тока подогрева потеря мощности, обусловленная отклонением дуги, компенсируется подогревом за счет проходящего через нее тока, что приводит к увеличению глубины проплавления шва. Кроме того, повышение температуры присадки, поступающей в сварочную ванну, приводит к значительному уменьшению ширины шва. Поэтому при одинаковой глубине проплавления степень разупрочнения металла шва и ЗТВ меньше при сварке с колебаниями дуги, вызванными пропуском тока через присадку.

Показано [145], что применение аргодуговой сварки неплавящимся электродом с колебаниями сварочной ванны, вызванными пропуском тока через присадку, позволяет повысить механические свойства сварных соединений сплава АМг6. Прочность металла шва, полученного при использовании присадочной проволоки СвАМг63, увеличивается на 2%, а сварных соединений — на 5%, ударная вязкость металла шва — на 47%, а угол загиба — на 127% по сравнению с теми же данными при обычной сварке стационарной дугой.

**Сварка с электромагнитным воздействием.** Применение внешних электромагнитных воздействий (ЭМВ) является одним из эффективных способов повышения и стабилизации показателей качества швов при TIG-сварке [146, 147, 149, 150]. От направления, значения и временных характеристик индукции магнитного поля (МП) зависят характер и эффективность ЭМВ на дугу и металл сварочной ванны.

При сварке в нижнем положении аксиальные МП относительно поверхности сварочной ванны используют для управления ее гидродинамикой, что позволяет эффективно воздействовать на процессы кристаллизации швов и благодаря этому повышать их стойкость против образования и развития горячих трещин, снижать пористость и улучшать пластичность [147].

Аксиальные магнитные поля применяют также для улучшения формирования горизонтальных швов на вертикальной плоскости.



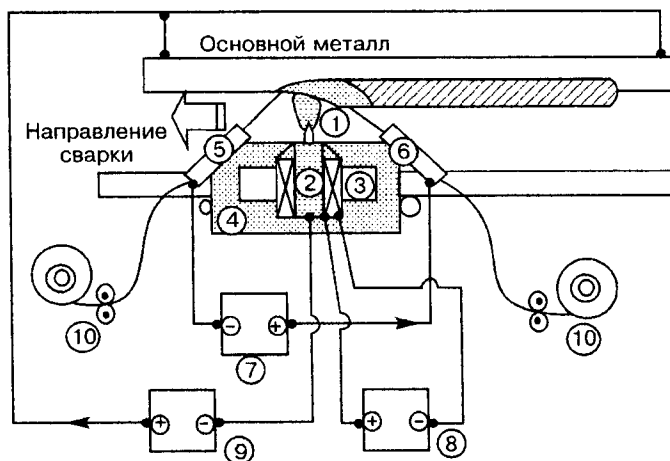
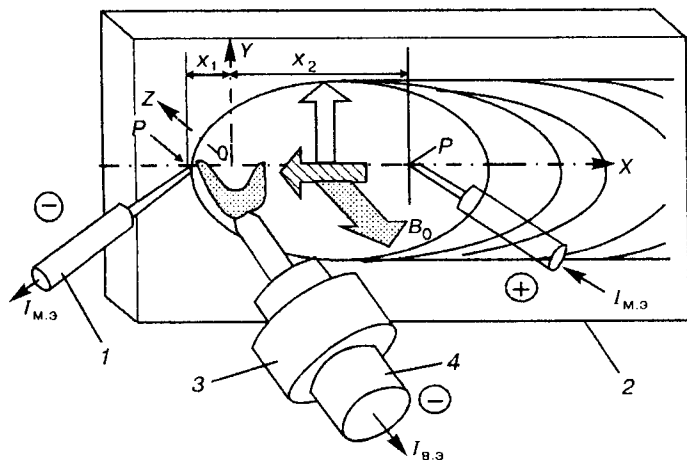
С целью предупреждения вытекания расплавленного металла сварочной ванны, повышения производительности и качества сварки горизонтальных швов предложен способ ЕСМР, который позволяет удерживать расплавленный металл в сварочной ванне и обеспечивает необходимую форму валиков с помощью электромагнитных сил (*рис. 91*) [146]. При этом две присадочные проволоки, присоединенные к положительному и отрицательному полюсам источника питания, вводятся в переднюю и хвостовую часть сварочной ванны (*рис. 91, а*). Вместе со сварочной ванной они образуют дополнительную цепь, по которой протекает электрический ток. Под воздействием магнитного поля, наведенного перпендикулярно поверхности основного металла посредством намагничивающей катушки, расположенной на одной оси с горелкой для ТИГ-сварки, внутри сварочной ванны возбуждается направленная вверх электромагнитная сила, уравнивающая силу тяжести, что способствует предотвращению провисания валика. Кроме того, возрастает скорость наплавки за счет нагрева джоулевой теплотой двух присадочных проволок.

На *рис. 91, б* показана принципиальная схема подключения вольфрамового электрода, присадочной проволоки и намагничивающей катушки к источникам питания. Способ ЕСМР применяем для горизонтальной кольцевой сварки крупногабаритных конструкций из нержавеющей лакированной стали.

Согласно [146] при сварке стыкового соединения из нержавеющей лакированной стали по способу ЕСМР были получены удовлетворительные технические характеристики при трехкратном увеличении скорости наплавки по сравнению со скоростью наплавки ТИГ-сваркой с одной подогретой проволокой.

Вращение дуги в аксиальном магнитном поле и особенности движения расплава ванны при сварке с ЭМВ могут быть использованы для регулирования глубины проплавления основного металла, управления формированием швов и повышения на этой основе скорости однопроходной сварки. Установлена возможность управления формой и пространственным положением дуг, горящих на двух вольфрамовых электродах, которые питаются от одного источника (расщепленный электрод), путем наложения аксиального магнитного поля (*рис. 92*) [147]. В этом случае ввод аксиального магнитного поля приводит к вращению дуг и их разделению с ростом индукции ЭМВ на два устойчивых самостоятельных конуса, подобных показанным на *рис. 92, б*. Расстояние между осями элект-

a



б

Рис. 91. Принципиальная схема способа сварки ЕСМР с двумя проволоками: а — участок шва, положение сварочной горелки, магнитной катушки и присадочных проволок (1, 2 — соответственно передняя и задняя проволоки; 3 — катушка; 4 — горелка); б — схема горизонтальной ТИГ-сварки двумя проволоками с ЕСМР (1 — дуга; 2 — горелка для ТИГ-сварки; 3 — намагничивающая катушка; 4 — тележка; 5, 6 — соответственно передняя и задняя проволоки; 7 — источник нагрева проволоки; 8 — устройство намагничивания; 9 — сварочный источник питания; 10 — механизм подачи проволоки)

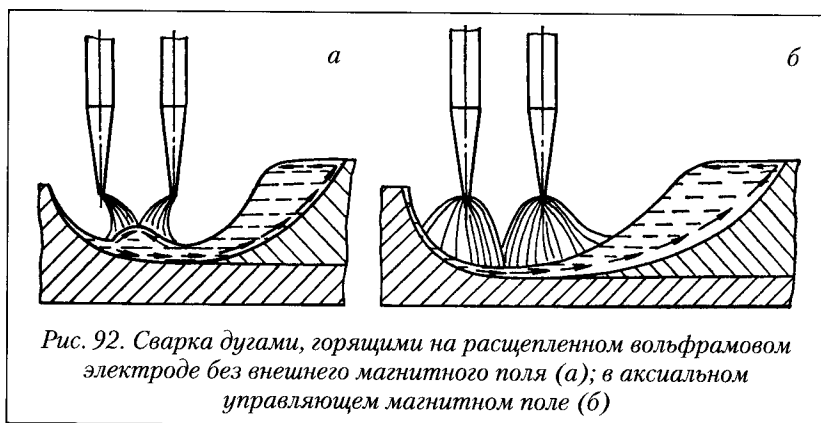


Рис. 92. Сварка дугами, горящими на расщепленном вольфрамовом электроде без внешнего магнитного поля (а); в аксиальном управляющем магнитном поле (б)

родов не превышает диаметра электрода. В этих условиях глубина проплавления титановых пластин с повышением индукции для швов, сваренных при продольном размещении электродов относительно стыка, увеличивается на 25–55%; существенно снижается склонность к образованию газовых полостей и пор.

Магнитоуправляемую дугу используют и при TIG-сварке титана в узкий зазор по схеме, показанной на рис. 93 [148]. При таком способе величина вылета вольфрамового электрода достигает 160 мм и электромагнитные силы, действующие на него в процессе

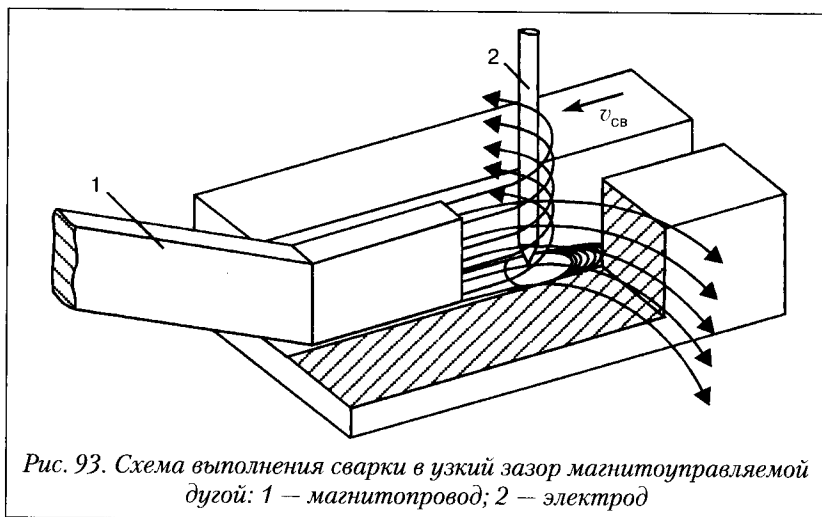


Рис. 93. Схема выполнения сварки в узкий зазор магнитоуправляемой дугой: 1 — магнитопровод; 2 — электрод

сварки, могут вызывать упругую и даже пластическую деформацию. В результате такой деформации нарушается пространственное положение электрода в зазоре, снижается стабильность горения дуги и ухудшается формирование шва. Поэтому при выборе диаметра электрода для сварки в узкий зазор магнитоуправляемой дугой необходимо не только учитывать предельно допустимый ток для данной марки электрода, но и условия сохранения пространственного положения и формы электрода. Только при таких условиях может быть обеспечено качественное формирование швов без образования дефектов.

В [150] показана эффективность использования TIG-сварки с ЭМВ при изготовлении металлоконструкций из алюминиевых сплавов. Установлено, что в этом случае сварка с ЭМВ позволяет снизить содержание включений  $Al_2O_3$  в объеме шва в результате интенсификации катодной очистки на 30–40%. Сварка сопровождается дроблением оставшейся на поверхности ванны окисной пленки и перераспределением ее в объеме шва таким образом, что минимальное содержание ее наблюдается в корне шва.

Для повышения производительности и качества дуговой сварки алюминия используют сварку трехфазной дугой. Наилучшие результаты при магнитном управлении сварки трехфазной дугой были получены при использовании сварочной горелки, в которой один из электродов выполнен в виде полого цилиндра, а второй — стержневой, причем эти электроды расположены концентрично друг относительно друга и перпендикулярно к свариваемой поверхности (рис. 94) [150].

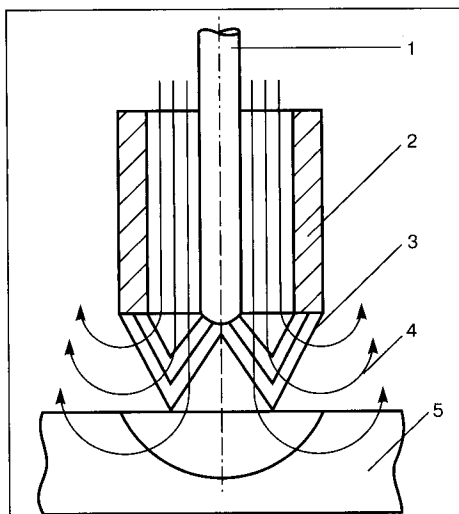


Рис. 94. Схема расположения электродов при сварке трехфазной дугой: 1 — стержневой электрод; 2 — кольцевой электрод; 3 — дуга, горящая между электродами 1 и 2; 4 — силовые линии управляющего магнитного поля; 5 — сварочная ванна

При сварке трехфазной дугой с ЭМВ очистка поверхности ванны от окисной пленки обеспечивается дугой, вращающейся между кольцевым электродом и изделием, а электромагнитные перемешивания расплава — в результате взаимодействия внешнего управляющего магнитного поля с протекающим по расплаву током дуги, горящей между стержневым электродом и изделием.

Обжатие столба дуги, горящей между стержневым электродом и изделием, струей защитного газа и деформация дуги, горящей между стержневым и кольцевым электродами, в сторону изделия при сварке трехфазной дугой горелкой с кольцевым электродом увеличивают глубину проплавления с электромагнитным воздействием на 24–43% в сопоставлении с проплавлением при сварке трехфазной дугой серийной горелкой (с двумя стержневыми электродами).

Описанный выше способ, кроме повышения производительности, обеспечивает измельчение структуры, повышение ее однородности и существенное повышение герметичности сварных соединений.

Реализуют внешние электромагнитные воздействия также с помощью цилиндрических электромагнитов, расположенных концентрично по отношению к электроду, двух- и четырехполюсных, а в последние годы и шестиполюсных электромагнитных систем [151]. Последние считают наиболее универсальными и перспективными.

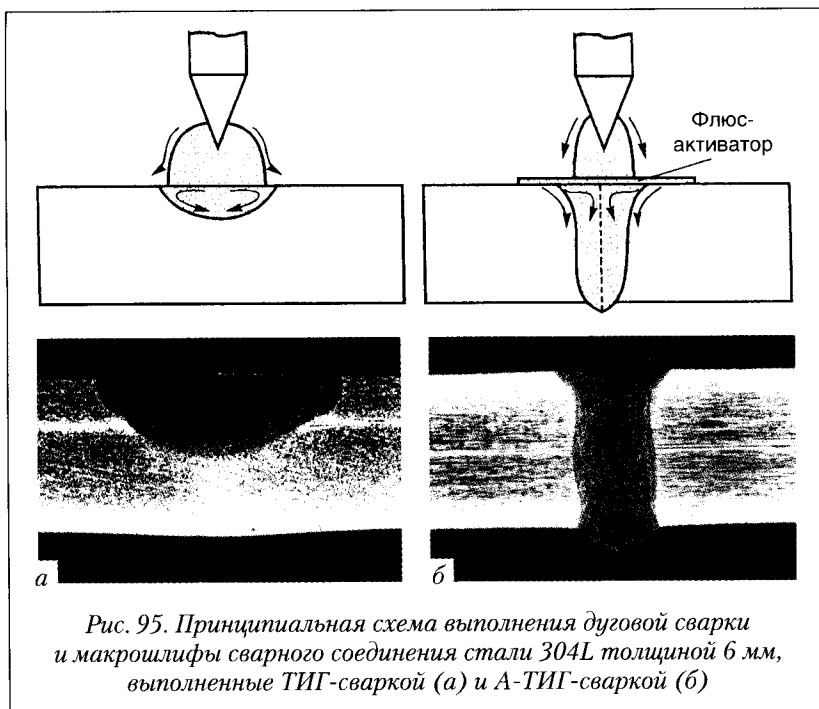
#### **Сварка с использованием активных флюсов (А-TIG-сварка).**

В последние годы все большее внимание исследователей и производителей привлекает сварка вольфрамовым электродом в инертном газе по слою флюса (А-TIG-процесс). Принципиальной основой этого сварочного процесса является введение в зону сварки 0,10–0,01% (от массы расплавляемого металла) элементов, имеющих склонность к образованию отрицательных или положительных ионов, что позволяет варьировать в широких пределах значения коэффициента формы шва без изменения режима сварки (рис. 95) [153]. При аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом можно получать узкие швы с глубоким (до 12 мм) либо широкие швы с малым (около 1–2 мм) проплавлением.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса разработана в ИЭС им. Е. О. Патона в середине 1960-х гг. сначала для сварки титана, а затем для сталей и сплавов на основе меди и получила широкое промышленное применение.

К достоинствам А-TIG сварки относят [152, 153, 154]:

- глубокое проплавление металла и узкие швы;
- относительно низкую погонную энергию;



*Рис. 95. Принципиальная схема выполнения дуговой сварки и макрошлифы сварного соединения стали 304L толщиной 6 мм, выполненные ТИГ-сваркой (а) и А-ТИГ-сваркой (б)*

- небольшую протяженность зоны термического влияния;
- уменьшение остаточных сварочных деформаций;
- повышение производительности сварки и качества швов;
- расширение технологических возможностей ТИГ-сварки.

Эффекты, характерные для А-ТИГ-сварки, являются следствием контракции дуги при этом процессе. Контракция положительного столба дуги и ее анодного пятна является результатом воздействия комплекса факторов (экранирование металла вокруг сварочной ванны жидким флюсом и стабилизация в ее пределах анодного пятна, повышение теплопроводности дугового газа и др.) [154]. При этом глубокое проплавление при А-ТИГ сварке в основном обусловлено ростом силы Лоренца в результате контракции дуги и увеличения плотности тока на аноде. Определенную роль играет и переход поверхностно-активных элементов из флюса и основного металла в сварочную ванну, и их влияние на градиент поверхностного натяжения расплавленного металла, вызывающий соответствующее его перемещение [152].

В состав флюсов для сварки титана входят галогениды, для сварки сталей — галогениды и окислы. Для сварки титана применяют флюсы систем  $\text{SrF}_2\text{-LiF}$  (АНТ-15А),  $\text{CaF}_2\text{-MgF}_2$  (АНТ-17А),  $\text{CaF}_2\text{-LiF-LaF}_5$  (АНТ-19А) [135, 155]. Для аустенитных сталей применяют флюсы системы  $\text{CaF}_2\text{-LiF}$ , а также  $\text{TiO}_2\text{-MgO-LiF}$ . Для сталей перлитного класса применяют флюсы системы  $\text{TiO}_2\text{-MgF}_2$  [135].

Флюсы изготавливают в виде порошков. К ним добавляют различные связующие, с помощью которых получают флюсовые пасты, стержни, волокна и порошковую проволоку. При правильно выбранном составе и способе нанесения их расход при сварке не превышает 1 г на 1 м шва. Применяют различные способы введения флюса в зону сварки [152, 153, 155].

Одним из наиболее распространенных способов применения активирующего флюса является нанесение малярной кистью тонкого слоя флюса в виде пастообразной суспензии на поверхность металла. Используют также флюсовые стержни (карандаши), флюсографы, аэрозольное распыление [135, 153, 156]. Каждый из перечисленных способов нанесения флюса и материалов имеет свои достоинства и недостатки.

К основным достоинствам аэрозольных активирующих флюсов относят равномерное нанесение покрытия по длине шва и по толщине слоя, повышение технологичности и удобства применения, а также длительный срок хранения в готовом к употреблению виде [153].

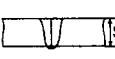
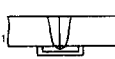
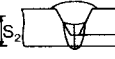
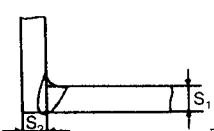
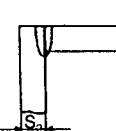
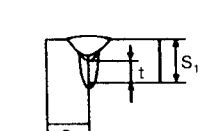
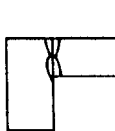
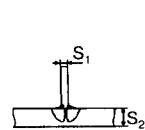
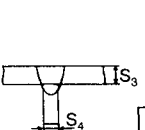
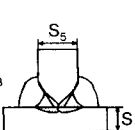
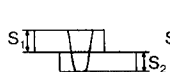
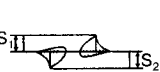
Флюсограф — устройство многократного использования, которое периодически заправляют флюсом-пастой в необходимом для работы количестве [156]. В нерабочем состоянии флюсограф герметично закрыт. Для приведения его в состояние готовности достаточно снять защитный колпак и с помощью рабочего органа нанести флюс тонким слоем на поверхность металла. Флюсограф позволяет четко дозировать расход флюса, исключает запыление и задымление рабочего пространства, создает безопасные условия труда для сварщиков.

В табл. 86 приведены примеры выполнения соединений сваркой А-TIG [156].

Следует отметить, что применение флюсов-активаторов не имеет ограничений в зависимости от типа соединения и положения шва в пространстве. Однако при этом должны быть выполнены следующие дополнительные требования:

- равномерное нанесение флюса-активатора на свариваемые поверхности;

**Таблица 86. Примеры соединений, которые могут быть выполнены способом сварки А-ТИГ**

Вид соединения	Характер выполнения шва	Форма поперечного сечения шва	Пределы значений толщины $S$ и припусков $t$ , мм
Стыковое	Односторонний		$S_1=1...8$
			$S_2=8...12$
			$S_3=9...25$ и выше
			$t=5...8$
Угловое	Односторонний		$S_1=1...8$
			$S_2=3...20$ и выше
			$S_1=5...20$ и выше
			$S_2=5...60$
Тавровое			$S_1=3...6$ и выше
			$S_2=3...6$ и выше
			$S_3=4$
			$S_4=5$ $S_5=6$
Внахлестку			$S_1=1,5...3,0$
			$S_2=1,5...3,0$



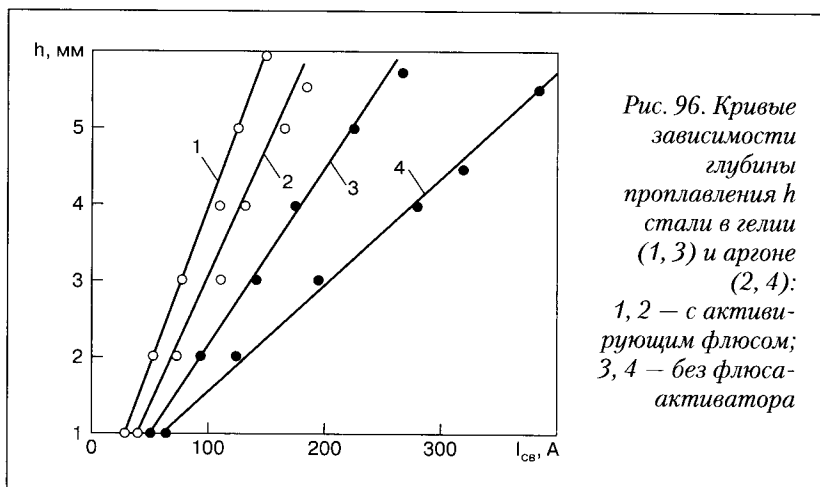
- удержание от вытекания большого объема расплавленного металла при свободном формировании шва.

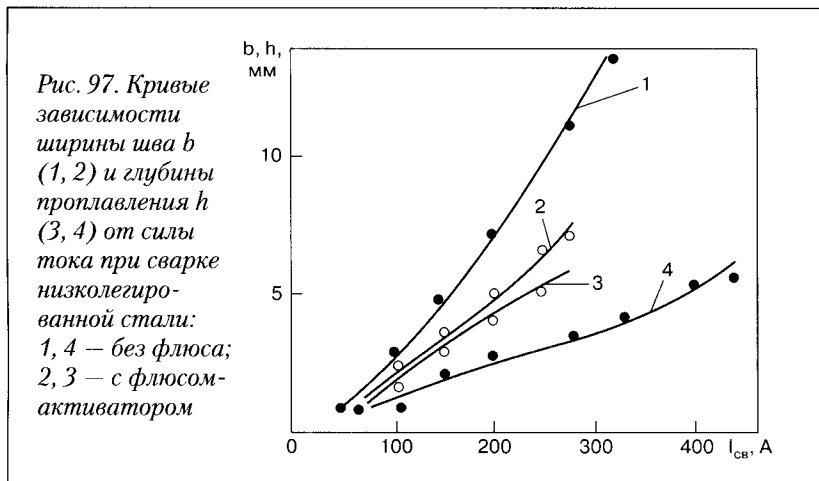
Такие требования обычно возникают, когда силы поверхностного натяжения металла недостаточны для удержания ванны, что обычно присуще низколегированным и нержавеющей сталям при сварке на весу (без подкладки или поддува газа) металла толщиной свыше 6–7 мм. При наличии подкладки толщина свариваемого за один проход металла достигает 10–12 мм, а при выполнении двухпроходной двусторонней сварки можно получить стыковое соединение толщиной до 25 мм.

А-TIG сварку можно выполнять в аргоне, гелии и других инертных газах или их смесях. Гелий, который имеет более высокий потенциал ионизации по сравнению с аргоном, позволяет при одинаковой силе сварочного тока увеличить глубину проплавления примерно на 20–25% (рис. 96) [157].

Флюс-активатор не выполняет функцию защиты зоны сварки от воздуха, а лишь влияет на процессы, протекающие на поверхности сварочной ванны и периферии столба дуги. Поэтому при сварке с флюсом-активатором следует придерживаться тех же рекомендаций по защите зоны сварки инертным газом, что и при обычной TIG-сварке.

Однако при выборе режимов А-TIG-сварки следует принимать во внимание тот факт, что зависимость формы и размеров шва от значений силы тока по сравнению с обычной TIG-сваркой имеет





различный характер (рис. 97) [157]. Особенно это проявляется при изменении значений силы сварочного тока. На рис. 97 видно, что при обычной TIG-сварке с увеличением сварочного тока более интенсивно растет ширина шва, а при A-TIG-сварке — глубина проплавления.

При TIG и A-TIG односторонней сварке в нижнем положении с полным проплавлением трудно получить усиление шва с двух сторон, поскольку происходит проседание металла под воздействием давления дуги и собственной массы. С лицевой стороны, как правило, образуется канавка, поверхность которой расположена ниже поверхности соединяемых деталей. Для устранения этого недостатка целесообразно выполнять второй проход шва с использованием присадочной проволоки и колебаний электрода. При сварке сталей с низкой теплопроводностью и высоким термическим коэффициентом линейного расширения для получения необходимого усиления допустимо не применять присадочный материал, если использовать автоопрессовку, которую осуществляют повторным нагревом шва по определенному термическому циклу. Сочетая параметры термического и деформационного циклов в сварном соединении, можно таким образом превысить напряжение сжатия, вызвав пластические деформации, благодаря чему образуется усиление шва без использования присадочной проволоки.

Теплофизические свойства сталей, и в первую очередь теплопроводность, значительно влияют на режимы сварки. Согласно

[157] при сварке стали 20 толщиной 6 мм со скоростью 100 мм/мин для обеспечения полного проплавления сила сварочного тока должна составлять 175 А. При сварке стали 12Х18Н10Т (теплопроводность которой выше, чем стали 20) такой же толщины и с той же скоростью сила сварочного тока должна равняться 155 А, т. е. силу тока необходимо уменьшить на 18–20%.

Флюсы-активаторы в различном исполнении, предназначенные для сварки сталей, содержат тугоплавкие оксиды, для расплавления которых необходимо определенное количество теплоты. Поэтому режимы сварки могут зависеть от толщины слоя флюса-активатора, нанесенного на свариваемые кромок.

Было установлено [157], что при сварке на силе тока до 300 А изменение толщины слоя с 0,05 до 0,30 мм практически не влияет на глубину проплавления стали. С увеличением толщины слоя (более 0,3 мм) для получения такой же глубины проплавления необходимо силу сварочного тока увеличить на 10–15%, что связано с ростом затрат теплоты, необходимой для плавления избытка флюса.

Оптимальная толщина слоя флюса-активатора на поверхности кромок обычно не превышает 0,1–0,2 мм при ширине слоя примерно 8–10 мм. При этом расход флюса составляет 1 г на 1 м шва.

Стабильность проплавления металла и формирования швов при сварке с флюсами-активаторами так же, как и без них, зависит от стойкости вольфрамового электрода. При быстром износе и разрушении его рабочего конца дуга горит неустойчиво и «блуждает» по поверхности катода и анода, что приводит к образованию непроваров, несплавлений и включений вольфрама в металле шва. Флюс-активатор, содержащий такие мощные окислители, как фтор и кислород, снижает стойкость вольфрамового катода в короткой сварочной дуге, изменяя форму его заточки [157, 158].

Установлено [158], что изменение формы заточки связано с появлением на электроде в процессе сварки двух видов образований: кольцеобразного налета в виде дендритовидных кристаллов («короны») и нароста, образующегося на электроде со стороны сварочной ванны. Появление «короны» обусловлено попаданием кислорода в зону сварки и связано с образованием, возгонкой и последующим осаждением на сравнительно холодных участках электрода оксидов вольфрама ( $WO_2$  и  $WO_3$ ). Появление «короны» предупреждают увеличением расхода защитного газа. Нарост образуется путем переноса на поверхность рабочей части электрода через дуговой промежуток материала анода (свариваемого металла и про-

дуктов диссоциации компонентов флюса) в виде паров и последующего их осаждения на ней. На интенсивность образования нароста оказывает влияние в первую очередь состав легирующей присадки электрода, а также угол его заточки и длина дугового промежутка. По данным работы [158] лучшие результаты стойкости электрода получены при сварке вольфрамовым электродом с 1,5% мас.  $Y_2O_3$  и углом заточки  $45^\circ$ .

В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны флюсы-активаторы серии ПАТИГ для сварки легированных и нержавеющей сталей разного класса — ПАТИГ С-А и некоторых сплавов на никелевой основе — ПАТИГ Н-А [153, 159, 160].

Показано [153], что флюсы ПАТИГ С-А дают хорошие результаты при А-TIG-сварке сталей на основе железа с нормальным содержанием углерода (0,08–0,25% С), дополнительно легированных марганцем, кремнием, хромом, никелем, молибденом, ванадием, ниобием, азотом, вольфрамом в умеренных количествах. Качество соединений зависит от углеродного эквивалента. Может происходить подкалка шва и ЗТВ. Необходимые свойства таких соединений получают за счет соответствующей термической обработки. При сварке сталей, содержащих малое количество раскислителей, в швах обнаруживаются поры, которые устраняют, используя присадочную проволоку с повышенным содержанием марганца и кремния.

Механические свойства металла швов, выполненных из хромоникелевых сталей аустенитного класса типа FeCr-18...20Ni-9...13, равноценны механическим свойствам металла швов, выполненных без применения флюсов-активаторов [153].

Сварные соединения хромоникелевых сталей аустенитно-мартенситного класса типа FeCr-16Ni-4 толщиной до 20...25 мм после А-TIG сварки требуют стандартного отпуска. При этом достигается равнопрочность сварного соединения с хорошей пластичностью и вязкостью металла шва.

Хорошо свариваются А-TIG-сваркой дуплексные хромоникель-молибденовые стали системы FeCr-18...30Ni-4...8MoTi. При этом оптимизации фазового состава металла шва достигают, добавляя к аргону 2–4% азота, которые не влияют на стабильность сварки и форму шва [153].

При А-TIG-сварке никелевых сплавов с использованием флюсов ПАТИГ Н-А также удается увеличить проплавление, уменьшить количество проходов и снизить тепловложение.

В общем случае А-TIG-сварка позволяет увеличить глубину проплавления в 2–4 раза; уменьшить или исключить влияние на проплавление способа производства стали (сплава); выполнять однопроводную сварку стыковых соединений до 10–12 мм без разделки кромок; устранять дефекты различных типов (поры, трещины, непровары и т. д.) путем переплава металла на глубину до 12 мм без проведения механической выборки дефектов; уменьшать сварочные деформации; увеличивать производительность сварочных работ в 2–7 раз; сокращать расход материалов и трудовые затраты в 3–6 раз [152, 153, 154].

В [161] изучали особенности аргодуговой TIG-сварки стали Ст3 с алюминиевым покрытием. При сварке алюминированных сталей основной проблемой является насыщение металла шва алюминием, который, взаимодействуя с железом, образует интерметаллиды типа  $Al_3Fe$ ,  $Al_3Fe_2$ ,  $Fe_2Al_5$  и др. Наличие этих соединений значительно ухудшает пластические и прочностные свойства шва. Следствием этого является увеличение склонности металла шва к образованию трещин. Кроме того, алюминий обладает способностью растворять водород, которая с повышением температуры увеличивается до резкого скачка при температуре плавления, что приводит к повышенной пористости металла шва.

Отрицательное влияние указанных факторов на качество соединений удалось снизить за счет применения при аргодуговой сварке флюсов, содержащих соединения хлора, фтора или кислорода. Наименьшее содержание алюминия (до 1,76%) в металле сварного шва наблюдалось при А-TIG-сварке алюминированной стали по слою флюса, содержащего хлорид железа.

Испытания сварных соединений на статическое растяжение показали, что пластичность образца, сварку которого производили в аргоне по слою оксида железа, повышается в три раза, по слою хлорида железа — в 5 раз по сравнению с пластичностью образцов, полученных при аргодуговой сварке без флюсов-активаторов.

Состав флюса влияет также на напряжение дуги и форму шва. В частности, флюс, содержащий хлорид алюминия, вызывает уменьшение напряжения дуги на 0,3 В и соответственно уменьшение ширины верхней части шва на 3 мм, корня шва — на 1 мм. Флюс, содержащий оксид железа, увеличивает напряжение дуги на 2,2 В и ширину верхней части шва на 3 мм, корня — на 1 мм.

В середине 1960-х гг. А-TIG-сварку начали использовать для соединения титановых сплавов [154, 155]. Экспериментально было

**Таблица 87. Параметры швов при сварке по слою  
однокомпонентных флюсов ( $I_{св}=100$  А,  $U=10$  В,  $U_{св}=15$  м/ч)**

Флюс	Ширина шва, мм	Глубина проплавления, мм	Площадь проплавления, мм <sup>2</sup>	Увеличение напряжения дуги, В	Коэффициент формы проплавления
LiF	4,3	3,2	8,6	1,0	1,34
NaF	3,2	3,8	12,16	2,6	0,84
KF	3,0	4,2	12,6	4,5	0,71
RbF	2,8	4,9	13,7	6,0	0,57
CsF	2,8	5,0	14,0	6,0	0,56
MgF <sub>2</sub>	3,5	3,4	9,9	1,8	1,03
SrF <sub>2</sub>	4,6	2,6	7,2	0,8	1,76
CaF <sub>2</sub>	5,0	2,4	6,3	0,6	2,38
BaF <sub>2</sub>	5,6	1,8	5,9	0,4	3,10
Без флюса	6,8	1,5	5,8	–	4,34

установлено, что при движении дуги вдоль стыка в момент ее перехода с титанового сплава, не покрытого флюсом, на слой галогенида визуально отмечается самопроизвольное сжатие дуги и изменение ее цвета. При этом напряжение дуги возрастает, а сила сварочного тока снижается. Дуга погружается вглубь металла, а ширина шва значительно уменьшается.

Результаты измерения параметров швов и осциллографирования режимов аргонодуговой сварки с различными однокомпонентными флюсами позволили установить прямую связь между эффектом изменения напряжения дуги и формой проплавления (табл. 87) [155]. Как следует из табл. 87, коэффициент формы проплавления с использованием некоторых флюсов может быть меньше 1, а глубина проплавления возрастет более чем в 3 раза по сравнению с этими данными при сварке без использования флюса. В то же время с точки зрения технологичности ни один из фторидов щелочных и щелочно-земельных металлов не пригоден для использования в качестве однокомпонентного флюса. Если флюсы LiF, CaF<sub>2</sub>, SrF<sub>2</sub> и BaF<sub>2</sub> обладают недостаточной эффективностью с точки зрения увеличения глубины проплавления, то KF, RbF и CsF чрезвычайно гигроскопичны. При сварке с флюсом NaF наблюдаются периодические выбросы металла из сварочной ванны на электрод. Что касается флюса MgF<sub>2</sub>, то он не обеспечивает стабильной

сварки (ширина и глубина проплавления периодически изменяются). Поэтому для А-TIG-сварки титана обычно используют флюсы двойных и тройных фторидных систем [135, 155].

В общем виде в [155] сформулированы требования к флюсу для А-TIG-сварки:

- флюс должен хорошо смачивать свариваемый металл;
- обеспечивать в зоне дуги образование паров, способных к диссоциации;
- температура кипения флюса должна быть выше температуры плавления и ниже температуры кипения металла;
- флюс должен активно взаимодействовать с металлом в твердом и жидком состояниях;
- продукты взаимодействия должны быть достаточно стойкими при температуре дуги, содержать электрически отрицательные элементы, иметь высокое эффективное сечение захвата электронов с образованием отрицательных ионов;
- электропроводность расплавленного флюса должна быть значительно ниже, чем металла сварочной ванны.

Как отмечалось выше, введение флюса в зону сварки сопровождается изменением электрических параметров дуги, и в первую очередь напряжения, что приводит к изменению глубины проплавления. При этом каждому значению силы сварочного тока соответствует определенная величина напряжения дуги, при которой достигается максимальная глубина проплавления.

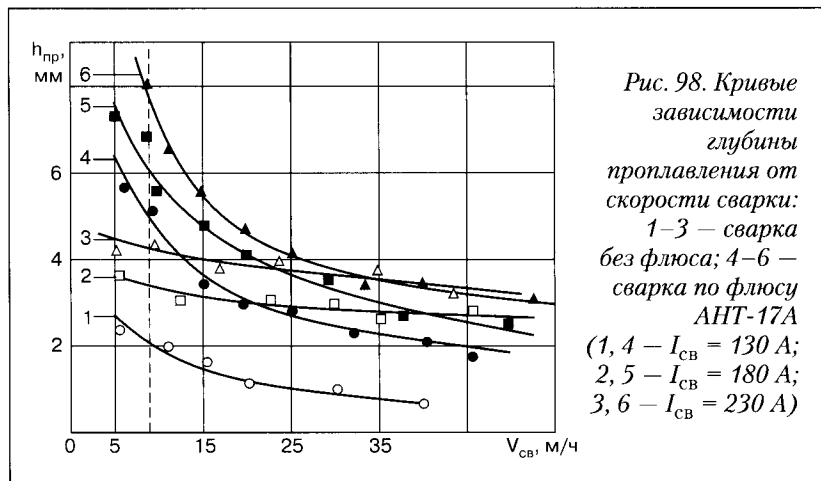
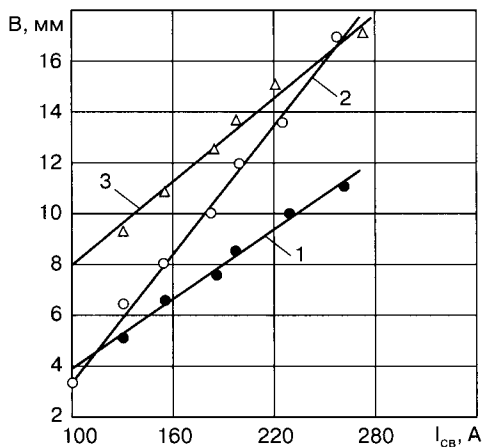


Рис. 99. Кривые зависимости ширины шва (1, 3) и обратного валика (2) от силы сварочного тока при сварке по флюсу АНТ-17А (1, 2) и при сварке без флюса (3)



Между величиной сварочного тока и глубиной проплавления в общем случае наблюдается прямая зависимость, но при сварке по флюсу глубина проплавления возрастает значительно быстрее, чем при сварке без флюса с той же скоростью (рис. 98) [155].

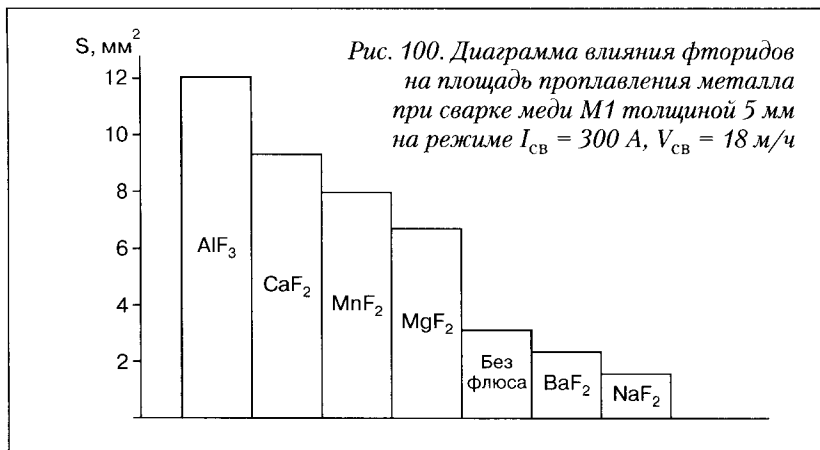
На рис. 99 показана зависимость ширины шва и обратного валика от силы сварочного тока при однопроходной сварке титанового сплава ОТ4 толщиной 5 мм. С повышением силы сварочного тока ширина обратного валика при наличии флюса увеличивается быстрее, чем ширина лицевого валика.

При таком проплавлении имеется возможность получения тавровых соединений металла толщиной 1–12 мм при различных сочетаниях толщины полки и стенки.

А-TIG-сваркой можно соединять заклепочными швами листы титановых сплавов толщиной до 12 мм без рассверливания и выполнения углублений в верхнем листе, форма проплавления при этом близка к цилиндрической. Диаметры цилиндра при оптимальных режимах не превышают толщины привариваемого листа. Возможна также сварка многослойных конструкций.

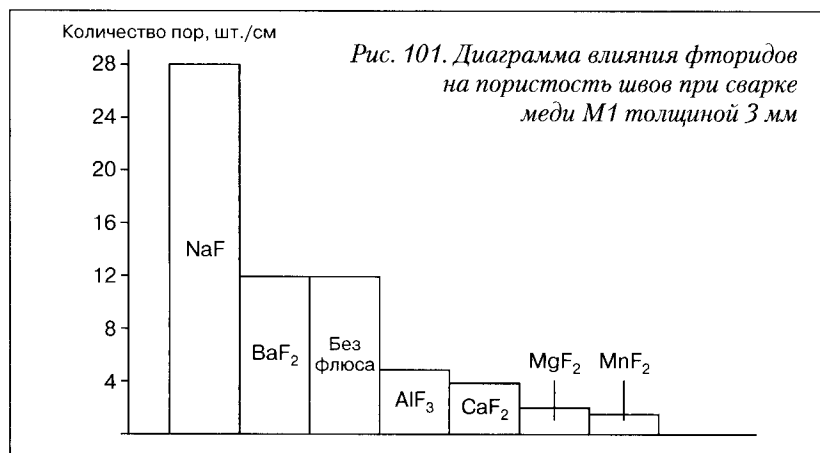
Широкое применение А-TIG-сварки при изготовлении конструкций из титановых сплавов связано прежде всего с возможностью обеспечения глубокого проплавления при низкой погонной энергии, небольшой протяженностью зоны термического влияния, возможностью получения швов без пор.





Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования А-TIG-сварки меди и некоторых ее сплавов показали перспективность этого способа для сварки высокотеплопроводных материалов [162]. Установлено, что при сварке меди этим способом не только увеличивается глубина проплавления (рис. 100), но и имеется возможность металлургического воздействия на сварочную ванну с целью снижения пористости швов (рис. 101).

Основной флюсов-активаторов для сварки меди и медных сплавов являются фториды щелочных и щелочноземельных металлов и алюминия.



**Таблица 88. Марки флюсов для сварки меди и медных сплавов и области их применения**

Марка флюса	Область применения
АН-М15А	Сварка технических марок меди
АН-М17А	Сварка оловянистых бронз
АН-М19А	Микроплазменная сварка листов меди малых толщин
АН-М21А	Сварка полос из меди М1 под последующую прокатку
АН-М23А	Сварка медноникелевых сплавов
АН-М25А	Сварка листов латуни малых толщин

**Таблица 89. Режимы, рекомендуемые при А-TIG-сварке меди различной толщины**

Толщина металла, мм	$I_{CB}, A$	$U_{д}, B$	$V_{CB}, м/ч$
2	300–320	14–16	16–18
4	360–380	14–16	10–12
6	450–480	14–16	6–8

При А-TIG-сварке меди обеспечивается устойчивое горение дуги, хорошее формирование и внешний вид швов.

В табл. 88 приведены марки флюсов для сварки меди и медных сплавов [164].

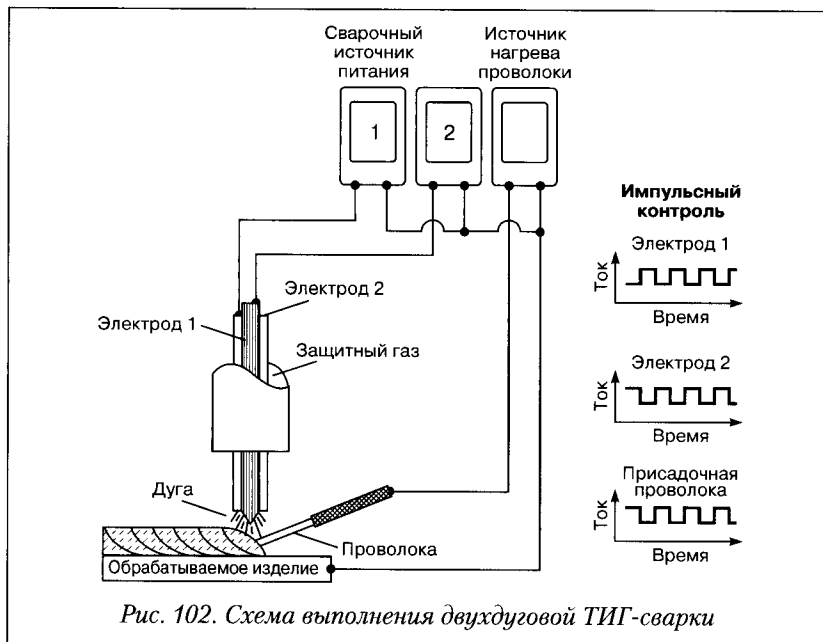
В табл. 89 приведены рекомендуемые режимы однопроходной А-TIG-сварки меди с применением флюса-пасты АН-М15А.

В настоящее время А-TIG-сварка меди и сплавов на ее основе получает все большее распространение.

**Сварка несколькими дугами.** TIG-сварка несколькими дугами является эффективным средством повышения производительности сварки и качества швов.

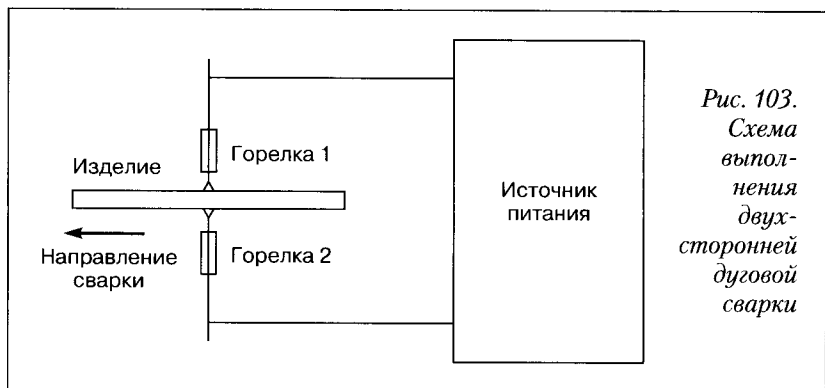
Разработан способ двухдуговой импульсной TIG-сварки с подачей подогреваемой присадочной проволоки (рис. 102) [163]. Питание дуг и присадочной проволоки осуществляют от отдельных импульсных источников тока. Каждый источник регулируют отдельно. Путем синхронизации импульсов тока и изменения расположения электродов можно управлять формированием швов.

При сварке горизонтальных и вертикальных многослойных швов вольфрамовые электроды прямоугольного сечения располагают перпендикулярно направлению сварки. Глубина разделки до-



стигает 150 мм. Сварку выполняют на силе тока 300–600 А, напряжении дуги 9–12 В, производительности наплавки 17–27 г/мин. Сварка была применена при строительстве резервуаров для хранения сжиженного природного газа.

Ведутся разработки двухсторонней двухдуговой ТИГ-сварки (рис. 103) [164]. Существует многолетняя практика сварки не-



**Таблица 90. Ориентировочные режимы трехдуговой сварки  
прямошовных труб**

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм	Сила сварочного тока, А			Скорость сварки, м/ч	Общий рас- ход аргона, л/мин
		1-я дуга	2-я дуга	3-я дуга		
19	1,0	120–150	180	200	330	30
	1,2			До 250	300	
	1,5			240		
60	3,0	275	280	310	120	
76	4,0	250	150	140	50	

сколькими вольфрамовыми электродами, расположенными вдоль линии шва. Число электродов выбирают в зависимости от толщины металла и необходимой скорости сварки. На практике, как правило, используют двух- или трехэлектродные горелки. Расстояние между электродами устанавливают в пределах 15–30 мм. Чем ближе электроды, а следовательно, и сварочные дуги располагаются ближе друг к другу, тем выше концентрация нагрева и скорость сварки. Минимальное расстояние определяют из условия устойчивого горения сварочных дуг, которые под действием электромагнитных сил взаимно притягиваются и искривляются. Длину каждой дуги устанавливают в пределах 0,5–1 мм. При многодуговой TIG-сварке прямошовных труб из нержавеющей сталей скорость сварки увеличивается в 2–3 раза по сравнению со скоростью при одnodуговой сварке.

В табл. 90 приведены ориентировочные режимы сварки тремя дугами прямошовных труб из нержавеющей сталей [102].

Аналогичный способ многодуговой сварки используют для соединения оболочек кабелей.

В настоящее время альтернативой приведенному выше способу сварки является способ лазерной сварки.

**Оборудование для TIG-сварки.** Оборудование для сварки неплавящимся электродом в инертных газах классифицируют по роду сварочного тока (постоянный или переменный), способу применения (ручное, автоматическое), назначению (универсальное или специализированное) и составу (в зависимости от механизмов, расширяющих технологические возможности) [102].

В состав оборудования для ручной сварки постоянным током входят: источник сварочного тока, сварочная горелка, устройство

для первоначального поджига (возбуждения) сварочной дуги, аппаратура управления сварочным циклом и газовой защитой.

Оборудование для ручной сварки переменным током дополнительно включает устройство для стабилизации горения дуги (стабилизатор) и устройство для компенсации или регулирования постоянной составляющей силы сварочного тока.

Обычно основные узлы, кроме горелки, конструктивно объединены. Такое устройство, снабженное горелкой (или комплектом горелок на разную силу тока), называют установкой.

В состав оборудования для автоматической сварки входят: сварочная установка, сварочная головка, устройство для перемещения сварочной головки или изделия, аппаратура управления механизмами автомата.

Простейшая сварочная головка состоит из: сварочной горелки, устройства для установочных перемещений горелки (настройка на шов и установка длины дуги). Обычно сварочная головка содержит также стабилизатор длины дуги или автоматический регулятор напряжения дуги, механизм для подачи присадочной проволоки, механизмы для установочных перемещений мундштука и для подвода присадки к сварочной ванне, устройство для колебания горелки поперек стыка.

Головка может быть самоходной, устанавливаться на самоходную тележку-трактор (автомат тракторного типа) или выполненной в подвесном варианте. Современные автоматы обычно снабжаются системами слежения за линией стыка изделия.

В состав оборудования для сварки неплавящимся электродом при необходимости включают устройство для принудительного жидкостного охлаждения горелки и токоведущих кабелей. Оно состоит из насоса, теплообменника и резервуара с охлаждающей жидкостью. Теплообменник обычно имеет вентилятор для ускорения охлаждения теплоносителя.

Источники сварочного тока для TIG-сварки отличаются крутопадающей внешней статической характеристикой. Такая характеристика обеспечивает стабильную силу тока при колебаниях длины дуги и устойчивость процесса сварки. При этом напряжение холостого хода источника в 4–6 раз превышает дуговое.

В связи с тем, что глубина проплавления при TIG-сварке весьма чувствительна к колебаниям силы тока, предъявляются повышенные требования к стабильности силы тока при изменении напряжения питающей сети. При сварке металлов толщиной 2–5 мм в

обычных условиях достаточно поддерживать силу сварочного тока с точностью до  $\pm 5\%$ . При сварке очень тонких материалов, сварке на весу, а также при особых требованиях точность стабилизации должна быть повышена до 1–2%. При сварке пульсирующей дугой такие же требования стабильности распространяются на амплитуду импульса и длительность импульса и паузы.

При сварке неплавящимся электродом широкое применение находят инверторные источники питания. Фирма «Fronius», как и другие западные фирмы, предлагает потребителям целую гамму инверторных источников для TIG-сварки на максимальную силу тока от 100 до 450 А в различном исполнении (Trans Tig 1600, 1700, 2200, 2600, 2600Cel, 3000 и др.). Масса источников питания находится в диапазоне от 8,4 до 30 кг.

При работе с такими источниками питания первоначальный поджиг дуги может осуществляться как контактным касанием, так и с помощью высокочастотного поджига.

Горелки для TIG-сварки делят на ручные и автоматические, на горелки с естественным и водяным охлаждением.

Для закрепления вольфрамового электрода и токоподвода к нему чаще всего применяют цанговые зажимы. Цанги вынимаются либо в сторону дуги, либо в противоположном направлении. Существуют также и бесцанговые зажимы, например, с винтом, который крепит вольфрамовый электрод. Применяют и другие способы крепления неплавящегося электрода.

При сварке неплавящимся электродом эффективность газовой защиты сварочной ванны во многом зависит от аэродинамических свойств проточной части сопла горелки. Наиболее широкое применение нашли сопла, имеющие коническую камеру на входе газа и цилиндрический канал на выходе. Длина начального участка газовой струи, осуществляющего защитные функции, для такой конструкции сопла приблизительно равна внутреннему диаметру цилиндрического канала. Это позволяет выполнять сварку при выдвижении вольфрамового электрода из сопла на 4–10 мм.

Конструкция сопла горелки должна быть удобной для выполнения швов в труднодоступных местах и глубоких разделках. При сварке высокоактивных металлов, таких как титан, цирконий, либо при работе на открытых площадках, на сквозняке на сопло дополнительно устанавливают защитную приставку или камеру.

Промышленность выпускает горелки на номинальный сварочный ток от 75 до 500 А.

Устройства для первоначального поджига дуги делятся на два класса: устройство поджига от короткого замыкания касанием и устройства поджига через зазор. Поджиг коротким замыканием осуществляют путем кратковременного контакта электрода и изделия и последующего их разведения.

При поджиге коротким замыканием возможен перенос материала электрода в сварной шов (образование вольфрамовых включений). Для устранения этого нежелательного явления зажигание следует осуществлять при малой силе тока, не превышающей 5–20 А (в зависимости от формы заточки конца электрода).

Главное достоинство поджига касанием — отсутствие высоковольтных устройств и вызываемых ими при пробое дугового промежутка радиопомех.

В качестве устройств для поджига через зазор применяют возбудители дуги или осцилляторы [102].

Возбудители могут быть предназначены для поджига дуги постоянного или переменного тока. Они могут питаться от сети или непосредственно дуговым напряжением. Последние возбудители обладают преимуществами перед первыми, так как не нуждаются в дополнительной питающей цепи, автоматически включаются при подаче напряжения на дуговой промежуток и автоматически же прекращают работу после поджига дуги. Важнейшими выходными параметрами возбудителя являются выходное напряжение (3–5 кВ), энергия импульса (от 0,01 до 1 Дж) и сила тока поджигаемой дуги.

Стабилизатор горения дуги является необходимым элементом оборудования для TIG-сварки на переменном токе промышленной частоты. Он предназначен для обеспечения повторного поджига дуги при смене полярности с прямой на обратную. Стабилизатор должен генерировать импульсы достаточной энергии и длительности, чтобы обеспечить повторный поджиг дуги. Обычно амплитуда импульса напряжения стабилизатора достигает 400–600 В.

От правильного выбора, эксплуатации, ремонта и наладки оборудования для TIG-сварки в огромной степени зависит качество выполнения сварочных работ. При этом основной рабочий инструмент — сварочная горелка в процессе эксплуатации подвергается наибольшей нагрузке и поэтому нуждается в постоянном контроле и профилактике. Перед включением после перерыва в работе необходимо проверить состояние газового тракта горелки. Обычно проверку осуществляют внешним осмотром и контрольным зажиганием дуги. После зажигания дуги и выдержке ее в течение одной-двух

минут на рабочем токе дуга отключается. Поверхность электрода должна быть светлой, неокисленной. Наличие на поверхности синего налета свидетельствует о подсосе воздуха в газовый тракт или недостаточности времени поступления газа после погасания дуги. Неокисленной должна остаться также и поверхность кратера на изделии. Наличие на ней синего или желтого налета при чистом вольфрамовом электроде свидетельствует о неравномерности потока газа, например, о нарушении газовой линзы или засорении одного из каналов для ввода газа в сопло.

В горелках с водяным охлаждением необходимо регулярно перед включением после каждого перерыва в работе (но не реже одного раза в неделю) проверять целостность водяного тракта и прохождение воды (охлаждающей жидкости). После 300–400 ч эксплуатации такая проверка должна быть ежедневной.

В установках, снабженных искровыми осцилляторами (для поджига дуги), периодическому контролю и очистке должны подвергаться электроды разрядных промежутков.

При эксплуатации оборудования для сварки неплавящимся электродом нужно применять обычные правила профилактики, относящиеся как к электрической, так и к механической части оборудования, изложенные в соответствующих инструкциях. В частности, периодически необходимо проверять состояние контактов в разъемных соединениях и электродов в разъемных соединениях и электромеханических реле. При сварке на переменном токе с емкостным подавлением постоянной составляющей в токе дуги особое внимание следует обратить на реле, шунтирующее конденсаторную батарею во время поджига дуги. Окисление контактов этого реле может нарушить процесс поджига, а их замыкание — процесс горения дуги. Аналогичный эффект возникает и при окислении или замыкании контактов реле дуги.

В автоматах, снабженных стабилизаторами длины дуги или системами автоматического регулирования напряжения дуга (АРНД), необходимо ежедневно проверять состояние этих механизмов, обращая особое внимание на легкость хода, и проверять, нет ли люфтов. Также необходимо наблюдать за состоянием механизма попереочного перемещения в системах слежения за стыком и в устройстве колебания электрода поперек шва.

В устройствах для подачи присадки надо постоянно следить за жесткостью крепления мундштука для ввода присадки в ванну и проверять, нет ли проскальзывания в подающих роликах.



Неисправности оборудования для TIG-сварки делят на проявляющиеся в наладочных операциях и определяемые только при зажигании и горении дуги.

К первой группе относятся неисправности в механизмах автомата и в цикловых операциях схемы управления, например, заедание в механизме перемещения горелки, несвоевременное включение или несрабатывание газового клапана и т. п. Поиск и устранение таких неисправностей не имеют специфических особенностей и обычно отражены в инструкциях по обслуживанию установок и автоматов.

Неисправности второй группы, как правило, трудно обнаружить из-за их специфичности.

Наиболее распространенная неисправность в установках постоянного тока при сварке на малой силе тока — это нестабильность глубины проплавления, вызванная пространственной нестабильностью положения дуги. К ней приводит, как правило, либо плохое качество вольфрамовых электродов, либо неправильный выбор материала или геометрии электрода. Необходимо подчеркнуть, что слишком острая заточка электрода приводит к быстрому обеднению конца электрода легкоионизируемыми примесями и переходу катодного пятна на боковую поверхность. При этом на электроде появляются «усы», образующие венчик на расстоянии нескольких миллиметров от конца электрода. Причинами нестабильности глубины проплавления могут быть также окисление вольфрама из-за дефектов в газовой защите или загрязнение электрода материалом изделия. Признаком окисления является синий налет на поверхности электрода, а признаком загрязнения — черный ноздреватый налет и быстрое разрушение (большой расход) вольфрама. Загрязнение электрода возможно из-за неправильного выбора силы тока поджига, неумелого действия сварщика при поджиге коротким замыканием, из-за недостаточной газовой защиты ванны или неправильного выбора режима сварки.

Поиск причины неисправности этого типа следует начинать с перезаточки электрода и проверки газовой цепи. При поджиге коротким замыканием следует проверить силу тока короткого замыкания. Она должна быть не более 20–25 А (при работе на силе тока 100–200 А). Если в оборудовании предусмотрено увеличение силы тока до рабочей только после поджига дуги, необходимо проверить выполнение этого требования, замерив силу тока короткого замыкания.

Другой причиной нестабильности глубины проплавления может быть неправильная работа устройства стабилизации длины

дуги либо из-за неисправностей в механической части (заедание, люфты), либо вследствие нарушения в системе АРНД. К такому же эффекту приводят и нестабильность скорости перемещения горелки (изделия), вибрации горелки и т. п.

При сварке с автоматической подачей присадочной проволоки возможны два дефекта: нестабильность скорости подачи проволоки и неправильный ввод присадки в сварочную ванну. Если в первом случае это скажется на величине усиления, то во втором может быть нарушен весь ход сварки. В этом случае надлежит проверить правильность положения мундштука и жесткость его крепления, а также качество намотки проволоки в кассете и ее правки.

При плохом поджиге дуги через зазор следует прежде всего проверить исправность газовой системы и правильность выбора и подготовки вольфрамового электрода. Причиной плохого поджига может быть также и неисправность горелки — плохая изоляция электрода от сопла, высокая проводимость воды в системе охлаждения.

В установках переменного тока, кроме перечисленных выше неисправностей, имеется и ряд специфических.

Для поджига дуги переменного тока поджигающий импульс должен быть правильно сфазирован с напряжением на электроде. При неправильной фазировке искра не переходит в дугу.

Плохо поджигается дуга также и при неправильной работе устройства для подавления постоянной составляющей тока дуги.

Дуга может плохо поджигаться при неправильном выборе диаметра электрода или изменении расхода газа (на малой силе тока), плохой работе стабилизатора или устройства переключения с осцилляторного на стабилизаторный режим.

Нестабильность горения дуги может быть вызвана неправильным выбором режима сварки. В частности, угол сдвига между напряжением холостого хода и силой тока дуги должен быть близок к  $90^\circ$ . Мгновенное значение напряжения холостого хода в момент смены направления тока должно быть не ниже 70 В.

Другое явление — «задыхание» дуги возникает при автоматической сварке на большой силе тока с низкой скоростью. Причина его — «чрезмерная» очистка ванны и отсутствие окислов в зоне дуги, что мешает зажиганию тлеющего разряда при повторном возбуждении полуволн тока обратной полярности. Порог возникновения этого явления может быть повышен увеличением диаметра электрода.

## 2.3. Электродуговая наплавка

Наплавка — это нанесение слоя металла на металлическую поверхность путем плавления присадочного материала соответствующим источником нагрева.

Наплавка предназначена для восстановления изношенных деталей и создания на поверхности изделия слоя, обладающего повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и другими свойствами [19]. Наплавку применяют при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей. При изготовлении новых деталей техникий и экономический эффект достигается в результате получения биметаллических изделий с оптимальным сочетанием свойств металлов наплавленного и основного. При восстановлении изношенных деталей эффективность применения наплавки обеспечивается за счет того, что отремонтированная деталь в несколько раз дешевле новой детали и при правильно выбранной технологии восстановления не уступает ей по работоспособности.

В зависимости от используемого источника нагрева основные способы наплавки и наварки делят на три группы [165]:

- **термические** (электродуговая, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, лазерная (световая), индукционная, газовая, печная);
- **термомеханические** (электроконтактная, прокаткой, экструдированием);
- **механические** (взрывом, трением).

Электродуговая наплавка является одной из наиболее распространенных технологий восстановления деталей с износом более 0,6 мм. Существующие технологии электродуговой наплавки позволяют решать широкий круг задач. Сравнительные характеристики основных способов механизированной дуговой наплавки приведены в *табл. 91* [165].

К достоинствам электродуговой наплавки обычно относят [19, 165, 166]:

- возможность нанесения металлических покрытий большой толщины;
- высокую производительность;
- универсальность способа, относительную простоту конструкции и транспортабельность оборудования;
- отсутствие ограничений по максимальным размерам наплавленных поверхностей;

**Таблица 91. Сравнительные характеристики основных способов механизированной дуговой наплавки**

<i>Способ наплавки</i>	<i>Производительность, кг/ч</i>	<i>Доля основного металла в наплавленном, %</i>	<i>Толщина наплавленного слоя, мм (один проход)</i>
Автоматическая под флюсом:			
одной электродной проволокой	2–15	30–60	3,0–5,0
многоэлектродной проволокой	5–30	15–30	5,0–8,0
электродной лентой	5–30	10–20	2,5–5,0
Автоматическая и полуавтоматическая в защитном газе	2–8	30–60	3,0–5,0
Полуавтоматическая самозащитной порошковой проволокой	2–9	25–50	2,5–5,0
Автоматическая самозащитной порошковой проволокой:			
одним электродом	2–9	25–50	2,5–5,0
двумя электродами	5–20	25–60	6,5–7,0
Автоматическая самозащитной порошковой лентой:			
одним электродом	10–20	15–40	2,5–5,0
двумя электродами	20–40	10–60	6,0–8,0

- простота выполнения, не требующая высокой квалификации сварщика;
- возможность повышения эффективности наплавки путем ее сочетания с другими способами поверхностной обработки (закалка, азотирование);
- возможность получения металла практически любой системы легирования.

К недостаткам электродуговой наплавки следует отнести:

- относительно большое проплавление основного металла и высокую долю основного металла в наплавленном;
- повышенную деформацию изделия;
- более ограниченный, чем, например, при напылении, выбор сочетаний основного и наплавленного металла;
- трудность наплавки мелких изделий сложной формы.

При выборе способа наплавки следует учитывать технико-экономические показатели как различных способов наплавки, так и альтернативных способов нанесения покрытий при восстановлении различных типов деталей машин (табл. 92, 93) [167].

Коэффициент производительности ( $K_{п}$ ) (табл. 92) рассчитан как отношение времени, затраченного на восстановление детали

**Таблица 92. Техничко-экономические показатели**

Способы нанесения покрытий	Производительность способа		Толщина наносимого покрытия, мм	Припуск на механическую обработку, мм	Доля основного металла в наплавленном, %
	кг/ч	см <sup>2</sup> /мин			
<b>Наплавка:</b>					
под слоем флюса	2–15	16–24	0,8–10	0,8–1,5	27–60
вибродуговая	0,5–4	8–22	0,3–3	0,7–1,3	8–20
в среде CO <sub>2</sub>	1,5–4,5	18–36	0,5–3,5	0,7–1,3	12–45
электро-контактная	1–2,8	50–90	0,2–1,5	0,2–0,5	Отсутствует
порошковой проволокой	2–9	16–36	1–8	0,6–1,2	12–35
ручная газовая	0,15–2	1–3	0,4–3,5	0,4–0,8	5–30
плазменная	1–12	45–72	0,2–5	0,4–0,9	5–30
ручная дуговая	0,4–4	8–14	0,5–4	1,1–1,7	20–40
аргонодуговая	0,3–3,6	12–26	0,2–2,5	0,4–0,9	6–25
<b>Напыление:</b>					
газопламенное	0,4–4	35–80	0,2–2	0,3–0,7	Отсутствует
плазменное	0,8–12	40–90	0,2–3	0,03–0,06	
<b>Гальванические покрытия:</b>					
хромирование	0,007–0,085	40–60	0,01–0,3	0,3–0,06	Отсутствует
железнение	0,011–0,9	100–150	0,1–3	0,15–0,2	

ручным способом ( $t_{\text{рн}}$ ), к основному времени восстановления условной детали сравняваемым способом  $t_i$ :

$$K_{\text{п}} = t_{\text{рн}} / t_i$$

За основное время восстановления условной детали приняты затраты времени, включающие предварительную механическую обработку, нанесение покрытия и последующую механическую обработку.

<b>способов нанесений покрытий</b>					
<i>Прочность сцепления, МПа</i>	<i>Деформация детали после наращивания</i>	<i>Минимальный диаметр детали, мм</i>	<i>Снижение сопротивления усталости, %</i>	<i>Коэффициент производительности <math>K_{\text{п}}</math></i>	<i>Коэффициент технико-экономической эффективности <math>K_3</math></i>
650	Значительная	45	15	1,62–1,45	0,436
500	Незначительная	10	35	0,85–0,72	0,25
550	Значительная	15	15	1,82–1,77	0,403
300	Незначительная	15	25	2,3–2,1	0,66
600	Значительная	20	15	1,75–1,54	0,4
480			25	0,73–0,58	0,138
490	Незначительная	12	12	2,2–1,9	0,56
500	Значительная		30	1	0,314
450	Незначительная	12	25	2,1–1,7	0,171
25	Отсутствует		30	1,68–1,47	0,39
45		10	25	1,76–1,68	0,4
450	Отсутствует	5	20	0,32–0,22	0,087
400		12	25	1,93–1,77	0,637

**Таблица 93. Применимость различных способов восстановления для типовых соединений деталей машин**

Способ восстановления	Типы соединений деталей						
	Вал — подшипник скольжения	Вал — подшипник качения	Вал — уплотнение	Шлицевое соединение	Цанфа — втулка	Шкив — торцовая колодка (лента)	Каток — звено гусеницы
Наплавка:							
под флюсом	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+
в защитных газах	+	+	+	+	+	+	(+)
порошковой проволокой	+	+	+	(+)	+	+	+
вибрирующим электродом в жидкости	-	+	+	-	(+)	-	-
плазменная	(+)	+	+	-	+	-	-
электроконтактная	-	(+)	(+)	-	(+)	-	-
электродными лентами	(+)	-	-	-	-	(+)	+
электрошлаковая	-	-	-	-	-	(+)	+
Хромирование	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	-
Железнение	(+)	(+)	(+)	-	(+)	-	-
Металлизация напылением	(+)	+	+	-	(+)	-	-
Электроискровое наращивание	(+)	(+)	(+)	-	-	-	-
Электромеханическая обработка	-	+	-	-	-	-	-
Заливка жидким металлом	-	-	-	-	-	(+)	+
Применение дополнительных ремонтных деталей	-	(+)	-	-	-	-	-
Применение полимеров	-	(+)	-	-	-	-	-

*Примечание. Знак «+» означает широкое применение способа, знак «(+)-» — ограниченное применение, знак «-» — применение способа не рекомендуется.*

Коэффициент технико-экономической эффективности ( $K_3$ ) оценивали с учетом производительности и экономичности способа восстановления условной детали по следующей формуле

$$K_3 = K_n \cdot \mathcal{E}_a / 100,$$

где  $\mathcal{E}_a$  — экономия при восстановлении условной детали, %.

В отличие от способов газотермического напыления, при наплавке необходимы большие припуски на механическую обработку (0,4–1,5 мм на сторону), что влечет за собой неизбежность существенных потерь металла наплавки и избыточных затрат (см. табл. 90).

Большинство способов наплавки оказывают существенное термическое влияние на изделие, что приводит к повышенным деформациям. Практически все способы нанесения покрытий снижают сопротивление усталости, поэтому с целью его повышения, особенно для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, следует предусматривать различные операции послесварочной обработки (термообработку, ультразвуковую обработку и др.).

Следует подчеркнуть, что перед выбором оптимального способа восстановления конкретной номенклатуры деталей необходимо решить целый комплекс вопросов, отражающих реальные условия производственной деятельности предприятия, его тип, форму организации, учитывающей объем и особенности обрабатываемых деталей, транспортные затраты. При восстановлении деталей должно быть обеспечено основное техническое требование долговечности — минимальный ресурс восстановленных деталей должен быть не ниже межремонтного ресурса работы машины.

**Наплавленный металл и наплавочные материалы.** Состав наплавленного металла выбирают в зависимости от условий эксплуатации восстанавливаемых (изготавливаемых) деталей и вида их изнашивания [19, 165, 166]. Общая классификация наплавленного металла по химическому составу, предложенная Международным институтом сварки (МИС), приведена в табл. 94.

Разработана математическая модель прогнозирования фазового состава, структуры и удельной работы разрушения (износостойкость) сложнелегированных наплавочных сплавов, а также создана компьютерная программа для расчета типа и количества упрочняющих фаз, структуры матрицы сплава и энергоемкости его разрушения [168]. Программа позволяет с минимальными затратами времени и средств осуществлять выбор оптимального состава наплавленного металла из ряда имеющихся либо разрабатывать но-



Таблица 94. Тип наплавленного металла, его химический состав и твердость

Тип наплавленного металла	Массовая доля элементов, %										Твердость HRC <sub>3</sub>
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	Co	Прочие	
Нелегированные и низколегированные стали, содержащие ≤0,4% C	≤0,4	0,5–3,0	≤1,0	≤3,0	≤3,0	–	–	≤1,0	–	–	20–45
Нелегированные и низколегированные стали, содержащие ≥0,4% C	≥0,4	0,5–3,0	≤1,0	≤5,0	≤3,0	–	–	≤1,0	–	–	52–60
Хромовольфрамовые, хромомолибденовые и др. инструментальные стали	0,2–0,5	≤2,0	≤1,0	1,0–5,0	≤5,0	1,0–10,0	0,2–1,5	≤4,0	–	–	52–60
Быстрорежущие стали	0,6–1,5	≤0,5	≤0,4	4,0–6,0	–	1,5–18,0	≤3,0	≤10	≤15	–	52–60
Низкоуглеродистые хромистые стали	≤0,2	≤0,8	≤2,0	12–30	≤5,0	–	–	≤2,0	–	–	35–50
Хромистые стали с повышенным содержанием углерода	0,2–2,0	0,3–1,5	≤3,0	5,0–18,8	≤5,0	≤1,5	–	≤2,0	–	–	50–60
Высокомарганцевые аустенитные стали	0,5–1,2	11–18	≤4,0	≤5,0	≤4,0	–	–	≤1,0	–	–	25–35
Хромоникелевые, хромоникельмарганцевые аустенитные стали	≤0,3	1,0–8,0	≤5,0	12–20	8,0–25,0	–	–	≤5,0	–	Nb≤1,5, Ti≤1,0	18–25
Высокохромистые специальные чугуны	2,0–5,0	0,5–0,8	≤5,0	18–35	≤4,0	≤5,0	≤10	≤8,0	≤5,0	Nb≤8,0, Ti≤4,0, B≤3,0	55–65

Никелевые сплавы, легированные молибденом и хромом	≤0,12	-	-	0-18	Основа	≤6,0	0,2-0,6	8-35	≤2,5	4-7Fe, Ti≤5,0, Al≤3,0	200- 250HB
Никелевые сплавы, легированные хромом, бором и кремнием	≤1,0	-	2-5	8-28	Основа	0-20	0,2-0,6	-	1,0- 1,5	2-5B	40-60
Кобальтовые сплавы, легированные хромом и кремнием	0,7-3,0	≤0,4	≤3	25-33	≤3	3-25	-	≤3	30-70	≤6Fe	38-58
Карбидные сплавы (композиции)	0,7-3,0	≤0,4	≤3	25-33	≤3	3-25	-	≤3	30-70	≤6Fe	38-58

вый состав, отвечающий условиям нагружения детали.

Практически всегда существует возможность получения конкретного типа наплавленного металла путем использования нескольких сочетаний наплавочных материалов: электродов, проволоки сплошного сечения и порошковой проволоки, холоднокатанных, порошковых или спеченных лент, прутков, порошков, дробы и других некомпактных материалов.

Обстоятельные рекомендации по выбору наплавочных материалов для механизированной наплавки приведены в [19, 165, 166, 169].

Для электродуговой наплавки достаточно широко применяют стальную наплавочную проволоку сплошного сечения диаметром 0,3-6,0 мм (преимущественно 2,0-4,0 мм), а также катанку диаметром 6,5-8,0 мм. В табл. 95 приведена твердость наплавленного металла и назначение наплавочной проволоки сплошного сечения, применяемой для восстановления и упрочнения деталей различного назначения [19]. В ряде случаев для восстановительной наплавки и наплавки промежуточных слоев (подслоев) также используют стальную сварочную проволоку (Св) сплошного сечения.

В последние десятилетия широкое применение получила порошковая проволока диаметром 3,6 мм (для наплавки под флюсом) и 1,6-3,0 мм (для наплавки открытой дугой). Для наплавки под флюсом крупногабаритных деталей применяют порошковую проволоку диаметром 5,0-6,0 мм.

**Таблица 95. Краткая характеристика наплавочной проволоки**

Марка проволоки	Наплавленный металл		Типичные объекты наплавки
	тип	твердость	
Нп-30	А	НВ 160–220	Оси, шпиндели, валы
Нп-40		170–230	Оси, шпиндели, валы
Нп-50		180–240	Натяжные колеса, скаты тележек, опорные ролики
Нп-65		220–300	Опорные ролики, оси
Нп-80		260–340	Коленчатые валы, крестовины карданов
Нп-40Г		180–240	Оси, шпиндели, ролики, валы
Нп-50Г		200–270	Натяжные колеса, опорные ролики гусеничных машин
Нп-65Г		230–310	Крановые колеса, оси опорных роликов
Нп-10ГЗ		250–330	Железнодорожные бандажки, крановые колеса
Нп-30ХГСА		220–300	Обжимные прокатные валки, крановые колеса
Нп-30ХЗВА		HRC 33–40	Трефы прокатных валков, детали автосцепки, шлицевые валы
Нп-30Х5		37–42	Прокатные валки сортопрокатных станов
Нп-40ХЗГ2ВФ		38–44	Тяжелогруженные крановые колеса, ролики рольганов
Нп-35Х2Г2В		37–42	Детали с дефектами от ударов и с абразивным износом
Нп-5ХНМ	Н	40–50	Ковочные и вырубные штампы для горячей штамповки, валки ковочных машин
Нп-5ХНТ		40–50	
Нп-5ХНВ		40–50	
Нп-50ХФА	В	43–50	Шлицевые валы, коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания
Нп-105Х		32–38	Обрезные штампы для холодной штамповки, валы смесителей
Нп-2Х14	Е	32–38	Уплотнительные поверхности задвижек в трубопроводах для пара и воды
Нп-3Х13		38–45	Плунжеры гидропрессов, шейки коленчатых валов, штампы
Нп-4Х13		45–52	Опорные ролики тракторов и экскаваторов, детали транспортеров

Марка проволоки	Наплавленный металл		Типичные объекты наплавки
	тип	твердость	
Нп-45Х4ВЗФ	Н	38–45	Валки листопрокатных и сортопрокатных станов, штампы для горячей штамповки
Нп-45Х2В8Т		40–46	Ножи для резки горячего металла, прессовый инструмент
Нп-60Х3В10Ф		42–50	Валки трубопрокатных и сортопрокатных станов, штампы для горячей штамповки

В табл. 96 приведены состав и назначение наиболее распространенной порошковой проволоки, которая была разработана в ИЭС им. Е. О. Патона. Проволоку применяют в различных отраслях [165].

В ряде случаев для наплавки крупногабаритных деталей используют холоднокатаные, порошковые и спеченные ленты. Наплавка лентой обеспечивает высокую производительность, большую ширину шва и малую глубину проплавления.

Холоднокатаную стальную ленту, которую используют для наплавки под флюсом, изготавливают из стандартных сталей – конструкционных, инструментальных и пружинных (табл. 97) [165].

Как правило, толщина ленты для наплавки составляет 0,4–1,0 мм, ширина – 20–100 мм.

Для наплавки широко применяют порошковые и спеченные ленты.

Порошковые ленты толщиной 3–4 мм и шириной 14–30 мм применяют для наплавки под флюсом и открытой дугой. С помощью этих лент можно получить наплавленный металл с более высокой степенью легирования, чем при наплавке порошковой проволокой. Химический состав и назначение порошковых лент, применяемых для восстановления и упрочнения различных деталей и узлов, приведены в табл. 98 [165].

Спеченные электродные ленты на железной основе получают способом порошковой металлургии путем холодной прокатки и последующего спекания в защитной атмосфере при температуре 1200–1300°С смеси металлических порошков, ферросплавов, графита и других материалов с размерами частиц 70–200 мкм. Спеченную ленту выпускают толщиной 1,0 мм и шириной 30–100 мм.

Таблица 96. Порошковая проволока для наплавки

Марка проволоки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твердость	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	Прочие		
ПП-Нп-14ГСТ	0,14	0,5	0,6	–	–	0,4	–	–	240–260 НВ	Оси, валы
ПП-АН198	0,15	0,5	0,5	0,4	–	0,3	–	0,3 Al	220–310 НВ	Оси, валы, крановые колеса
ПП-Нп18Х1Г1М	0,18	1,4	0,8	1,4	0,4	–	–	–	320–380 НВ	
ПП-Нп-30Х2Н2Г	0,30	1,5	0,6	1,8	–	–	–	1,4 Ni	42–48 HRC <sub>3</sub>	Оси, валы, коленвалы
ПП-Нп-15Х4ГСМФ	0,15	1,1	0,9	3,7	1,1	–	0,4	–		
ПП-Нп-15Х13	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	–	38–48 HRC <sub>3</sub>	Оси, валы, ролики МНЛЗ
ПП-АН159	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	–		Ролики рольганов, ролики МНЛЗ
ПП-АН174	0,12	0,8	0,6	13,0	0,8	–	0,2	1,6 Ni		
ПП-Нп-25Х5ФМС	0,25	0,6	1,0	5,0	1,1	–	0,4	–	48–52 HRC <sub>3</sub>	Прокатные валки, ролики рольганов, штампы
ПП-Нп-35В9Х3СФ	0,35	0,9	0,8	3,0	–	–	0,3	9,0 W		Прокатные валки, ролики рольганов
ПП-АН105	0,8	13,0	0,4	–	–	–	–	3,0 Ni	160–240 НВ	Железнодорожные крестовины, литье Г13Л
ПП-АН192	1,5	0,4	0,4	5,0	–	3,5	–	–	50–56 HRC <sub>3</sub>	Рабочие органы, органы сельхозмашин и т. п.

**Таблица 97. Стальная холоднокатанная лента для дуговой наплавки под флюсом**

Марка ленты	Массовая доля элементов, %						Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Прочие	
50Г	0,45–0,56	0,7–1,0	0,17– 0,37	0,3	0,3	–	Ролики, оси, валы
65Г	0,6–0,7	0,9–1,2		0,3	0,3	–	Крановые колеса, ролики
50ХФА	0,46–0,54	0,8–1,0		0,95–1,20	0,4	0,15–0,25 V	Штампы для холодной штамповки
25Х5ФМС	0,2–0,3	0,5–1,0	0,6–1,2	4,8–5,7	–	0,2–0,6 V	Прокатные валки, ролики рольганов
Св-2Х13	0,16–0,25	0,8	0,8	12,0–14,0	–	–	Плунжеры гидропрессов
Св-04Х19Н11М3	0,06	1,0–2,8	0,06	18,0–20,0	10,0–12,0	2,0–3,0 Мо	Корпусные детали реакторов, нефтехимического оборудования
Св-03Х22Н11Б	0,03	1,5–2,0	0,2–0,4	21,7–23,5	10,3–11,3	0,95–1,2 Nb	
Св-07Х25Н13	0,09	1,0–2,0	0,5–1,0	23,0–26,0	12,0–14,0	–	

**Таблица 98. Порошковые ленты для наплавки**

Марка ленты	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твердость после наплавки	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ti	Прочие		
ПЛ-Нп-10Г2СТ	0,1	2,0	1,0	–	0,2	–	20–26	Оси, валы
ПЛ-Нп-20Х2Г2СТ	0,2	2,0	1,0	2,0	0,7	0,4 Мо	38–45	Оси, валы, ролики
ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2	3,0	2,0	3,0	25,0	–	2,0 Ni	50–56	Била, зубья ковшей экскаваторов
ПЛ-Нп-400Х38ГЗРСТЮ	3,0	3,0	1,0	38,0	0,3	0,2 Al, 0,9 В	50–54	
ПЛ-Нп-120Х22РЗГ2С	1,2	2,0	1,0	22,0	1,0	3,0 В	54–60	
ПЛ-Нп-450Х20Б7М6В2	4,5	–	2,0	20,0	–	2,0 W, 7,0 Nb, 6,0 Мо	55–62	Конусы и чаши доменных печей
ПЛ-Нп-500Х40Н40С2Р	5,0	1,0	2,0	40,0	–	40 Ni, 0,2 В	50–56	
ПЛ-Нп-550Х44Н34ГСР	5,5	0,8	0,8	44,0	–	34 Ni, 0,3 В	54–62	
ПЛ-Нп-12Х16Н8М6С5Г4Б	0,12	4,0	5,0	16,0	–	8,0 Ni, 6,0 Мо, 1,0 Nb	38–50	Энергетическая, нефте-химическая арматура
ПЛ-Нп-12Х18Н9С5Г2Т	0,12	2,0	5,0	18,0	0,2	9,0 Ni	27–34	

Спеченная лента отличается равномерным распределением составляющих частиц шихты по сечению и способствует получению более однородного по химическому составу наплавленного металла, чем при использовании порошковой ленты. Для изготовления спеченных лент можно использовать порошки высокой чистоты.

В *табл. 99* приведены характеристики спеченных лент, применяемых для наплавки различных деталей [165].

При наплавке используют плавные и керамические флюсы. Химический состав наиболее часто применяемых для наплавки плавных флюсов приведен в *табл. 100* [165].

Высокоактивные флюсы АН-348А и АН-60 широко используют для наплавки малоуглеродистых и низколегированных сталей.

Активный безмарганцевый флюс АН-26 обеспечивает высокую стойкость наплавленного металла против образования пор; его используют для наплавки легированных и высоколегированных сталей, в частности, аустенитных хромоникелевых сталей.

При наплавке низко- и среднелегированных сталей достаточно широко используют низкокремнистый флюс АН-20. Этот флюс обеспечивает легкую отделимость шлаковой корки с поверхности как остывшего, так и нагретого до 300–400°С металла.

С более коротким и тугоплавким, чем АН-20, флюсом АН-70 возможна наплавка цилиндрических поверхностей относительно малых диаметров.

**Таблица 99. Спеченные электродные ленты**

Марка ленты	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твердость после наплавки	Типичные объекты наплавки HRC <sub>3</sub>
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Прочие		
ЛС-18ХГСА	0,3	0,7	0,9	1,4	–	–	24–32	Оси, валы
ЛС-70ХЗМН	1,0	0,4	0,7	4,5	0,9	1,0 Ni	54–60	Детали ходовой части автомобилей
ЛС-25Х5ФМС	0,4	0,4	0,7	6,2	1,5	0,8 V	38–44	Прокатные валки
ЛС-50Х4ВЗФС	0,7	0,4	0,5	5,0	1,5	0,7 V, 4,0 W	42–46	
ЛС-15Х13	0,2	0,5	0,5	16,5	–	–	38–42	Ролики МНЛЗ
ЛС-12Х14НЗ	0,2	1,1	0,5	16,0	–	3,5 Ni	38–42	
ЛС-02Х20Н11Г	0,02	2,0	0,4	20,0	–	11 Ni	–	Нефтехимическое оборудование

<b>Таблица 100. Химический состав плавяных флюсов для наплавки</b>									
Марка флюса	Массовая доля компонентов, %								
	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	Прочие
АН-348А	42,0	36,0	≤ 6,5	6,0	≤ 4,5	4,5	≤ 2,0	–	–
АН-60	42,0	38,0	6,0	2,0	≤ 5,0	6,0	≤ 1,5	–	–
АН-26	30,0	3,0	6,0	17,0	21,0	22,0	≤ 1,5	–	–
АН20	20,0	≤ 0,5	7,0	11,0	30,0	29,0	≤ 1,0	2,5	–
АН15М	8,0	≤ 2,0	30,0	≤ 1,0	35,0	18,0	≤ 1,0	–	4,0 NaF
АН-28	8,0	≤ 1,0	38,0	≤ 2,0	38,0	10,0	≤ 2,0	1,5	–
АН-70	7,0	–	30,0	–	30,0	30,0	1,0	2,0	–
АН-72	8,0	1,0	30,0	–	20,0	30,0	≤ 2,0	–	10,0 ZrO <sub>2</sub>
ОФ-6	≤ 4,0	≤ 0,3	20,0	3,0	25,0	52,0	1,5	–	–
ОФ-10	11,0	–	≤ 8,0	12,0	30,0	40,0	≤ 1,0	–	–

Нейтральные безмарганцевые флюсы марок АН-15М, АН-28, ОФ-10 имеют пемзовидное строение частиц, их применяют для наплавки средне- и высоколегированных сталей и сплавов.

Фторидные флюсы АН-72 и АН-90 применяют для электродуговой наплавки лентами легированных и высоколегированных сталей и сплавов.

Практически любую твердость наплавленного металла можно получить при наплавке под керамическими флюсами (табл. 101)

<b>Таблица 101. Химический состав и твердость металла, наплавленного проволокой Св-08 под различными керамическими флюсами</b>								
Марка флюса	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твердость наплавленного металла НRC <sub>3</sub>
	С	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	
ЖСН-1	0,5	0,6	2,0	5,4	–	–	–	45–50
ЖСН-2	0,3	0,3	1,2	2,8	–	–	–	33–38
ЖСН-4	1,1	0,6	0,6	5,0	–	–	–	40–43
ЖСН-5	0,2	0,3	0,3	6,2	0,7	0,3	–	35–38
ЖСН-6	0,3	0,6	3,8	5,5	0,7	0,6	1,5	40–43
АНК-18	0,3	0,2	1,4	3,5	–	–	–	35–40
АНК-19	0,6	0,3	0,8	4,5	–	–	–	50–55
АНК-40	0,2	0,8	1,2	1,2	–	–	–	25–30



[165]. В основном этого достигают легированием его хромом и углеродом через флюс. Серьезным достоинством керамических флюсов является возможность использования в качестве электрода малоуглеродистой проволоки или ленты.

При наплавке в защитном газе применяют инертные газы (аргон, гелий, их смеси) и активные газы (углекислый газ и газовые смеси  $Ar + CO_2$ ,  $Ar + O_2$ ,  $Ar + CO_2 + O_2$ ).

**Технологии электродуговой наплавки.** Технология выполнения наплавочных работ включает следующие операции: подготовку поверхности и наплавочных материалов, собственно наплавку, последующую обработку изделий и контроль качества наплавки.

Для получения качественного наплавленного слоя с поверхности детали перед наплавкой удаляют различные загрязнения (влагу, масла, пыль, ржавчину), а также возможные дефекты в виде трещин, следов износа, упрочненных слоев и др.

Подготовка наплавочных материалов обычно включает прокалку электродов, флюсов и других шлакообразующих материалов в течение 1 ч при соответствующей температуре [169]. Если после прокалики наплавочные материалы длительное время не применяют, то непосредственно перед наплавкой эти материалы необходимо повторно прокалить.

Разработка технологии наплавки требует комплексного решения ряда важных вопросов: выбор наплавочного материала, обеспечивающего соответствующие условиям эксплуатации свойства; возможность наплавки этого материала непосредственно на основной металл детали или подбор материала для наплавки подслоя; выбор способа и режима наплавки, формы и способов изготовления наплавочных материалов; выбор термического режима для выполнения наплавки (сопутствующий подогрев для исключения получения хрупких подкаленных зон в металле детали или в хрупком наплавленном слое; интенсификация охлаждения наплавляемой детали, когда для металла нежелательно длительное пребывание при высоких температурах); установление необходимости последующей термической (общей или местной) обработки (для получения необходимых эксплуатационных характеристик, возможности промежуточной или финишной механической обработки).

Что касается выбора состава наплавленного металла и применяемых наплавочных материалов, то об этом речь шла выше, а более подробно эти вопросы освещены в ряде известных публикаций [19, 165, 166, 168, 169, 170, 171].

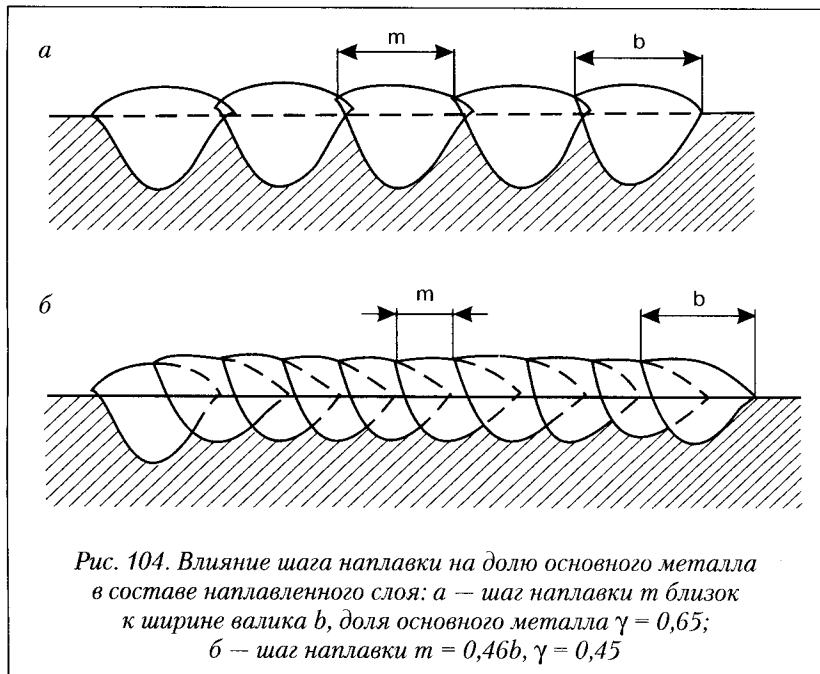


Рис. 104. Влияние шага наплавки на долю основного металла в составе наплавленного слоя: а — шаг наплавки  $m$  близок к ширине валика  $b$ , доля основного металла  $\gamma = 0,65$ ; б — шаг наплавки  $m = 0,46b$ ,  $\gamma = 0,45$

Выбор рационального способа и технологических приемов наплавки определяется необходимостью получения детали с требуемыми размерами и наплавленного слоя с требуемыми свойствами. При этом должна быть обеспечена максимальная производительность и экономичность процесса.

Важную роль при разработке технологии наплавки играет степень разбавления наплавленного металла основным (доля основного металла в металле наплавленного слоя) [19]. При наложении первого слоя наплавки (рис. 104, а) без перекрытия ( $m/b \rightarrow 1$ ) доля основного металла  $\gamma_0$  составляет  $\sim 0,65$ , а при перекрытии по ширине  $m/b = 0,46$  эта доля уменьшается до  $\sim 0,45$  (рис. 104, б).

При ручной наплавке  $m/b \approx 0,35$ , при автоматической под флюсом проволокой кругового сплошного сечения  $m/b = 0,4-0,5$ . Увеличение  $m/b$  может привести к неблагоприятной форме усиления валика и непроплавлению места перехода от предыдущего валика к последующему. Заметно может быть уменьшена величина  $m/b$  при наплавке ленточными электродами, с колебаниями электрода или несколькими электродами.

**Таблица 102. Характеристики наплавочных установок**

<i>Изготовитель</i>	<i>Число головок в одной установке, шт.</i>	<i>Число электродных проволок в одной головке, шт.</i>	<i>Число источников питания, шт.</i>	<i>Производительность наплавки, кг/ч</i>	<i>Толщина наплавленного слоя за один проход, мм</i>
ESAB	1	1	1	8–10	
	2	2	2	40	
Welding Alloys Limited:					
System 1	1	1	1	8	3–5
System 2	2	1	2	16	5–7
System 3	2	2	4	32	5–7
ИЭС им. Е. О. Патона	1	1	1	12	3–5
	1	2–3	1	40	5–8
Институт сварки России	1	2	1	20	5–8
	1	4	1	60–80	8–14
	1	До 6	1	100–140	До 25

При наплавке ленточным электродом, располагаемым поперек наплавляемого валика, доля основного металла в наплавленном металле при ширине ленты более 40 мм уменьшается до 10%. В то же время при наплавке лентой шириной более 50 мм устойчивость процесса нарушается и требуются дополнительные меры для обеспечения стабильного формирования валика.

Колебания электрода выполняют по прямолинейной или криволинейной траекториям. При наплавке поверхностей, ограниченных ребрами или другими элементами (шейки коленчатых валов, катки), более простой является криволинейная траектория, так как она упрощает наплавку галтельного участка.

Для повышения эффективности наплавки широко используют многоэлектродную наплавку. В *табл. 102* приведены характеристики многоэлектродных головок, выпускаемых различными изготовителями, и их производительность [172].

Отличительной особенностью оборудования для многоэлектродной широкослойной наплавки, предложенного Институтом сварки России, является то, что подача проволоки осуществляется единым подающим устройством от одного двигателя, а токоподвод всех электродных проволок подключен к одному из полюсов источ-

ника тока. Наплавку можно выполнять как с колебаниями электрода, так и без них. При двухэлектродной наплавке с колебаниями электрода можно получить толщину наплавленного слоя до 12–15 мм шириной до 120 мм с глубиной проплавления 1,5–2,0 мм за один проход (доля основного металла в наплавленном слое не превышает 8–14%).

При использовании четырех электродных проволок сила общего сварочного тока 950–1200 А, напряжение дуги — 28–32 В, производительность — 60–80 кг/ч [172]. В Институте сварки России проведены лабораторные испытания макетной наплавочной шестиэлектродной головки, обеспечивающей производительность наплавки до 120–140 кг/ч.

Особенностью технологии наплавки, предложенной в [172], является дозированная подача легирующих порошков в зону плавления при использовании обычной низколегированной проволоки и обычных флюсов. При этом стоимость сварочных материалов в 2–5 раз ниже, чем при применении порошковой проволоки и керамических флюсов.

В общем объеме восстанавливаемых деталей наибольший удельный вес занимают тела вращения. При механизированных способах наплавки тел вращения лучше всего наплавливать по винтовой линии или кольцевыми валиками (рис. 105) [19].

Наплавку по винтовой линии (рис. 105, а) обычно рекомендуют для наплавки деталей диаметром менее 100 мм. Детали большого диаметра наплавливают кольцевыми валиками (рис. 105, б). С целью повышения производительности процесса применяют наплавку широкими валиками (рис. 105, в). При средних величинах диаметра

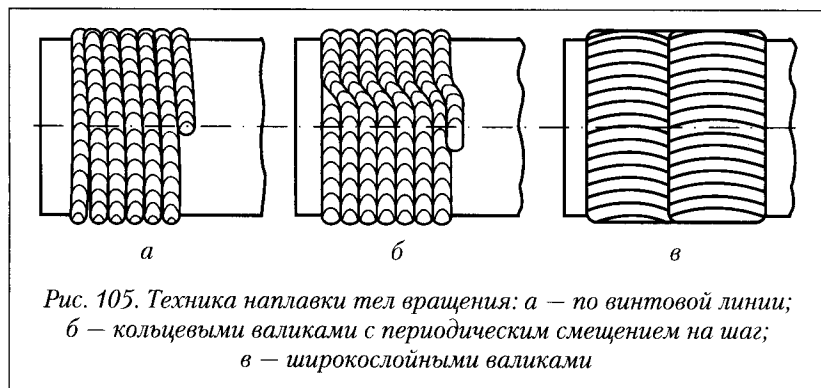
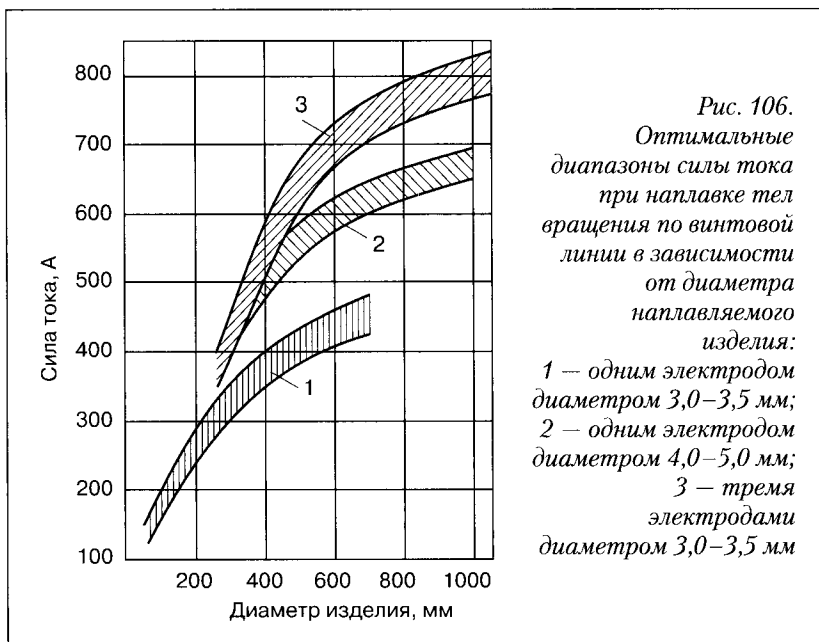


Рис. 105. Техника наплавки тел вращения: а — по винтовой линии; б — кольцевыми валиками с периодическим смещением на шаг; в — широкослойными валиками



деталей (100–400 мм) целесообразны поперечные колебания электрода, а при больших — наплавка электродной лентой.

Во избежание стекания металла при наплавке тел вращения электрод смещают относительно оси изделия против направления вращения детали и выбирают такой режим наплавки, при котором длина сварочной ванны не превышает допустимую (рис. 106) [19].

В некоторых случаях (например, при изготовлении валков заготовочных станков) выполняют наплавку рабочего слоя валиками зигзагообразной, волнистой или других форм (рис. 107) [173]. Это позволяет непосредственно в ходе наплавки сформировать на рабочей поверхности рельеф требуемого профиля без дополнительной механической обработки. Так, если при наплавке тел вращения по винтовой линии зигзагообразными валиками с перекрытием соседних (смежных) валиков в момент выполнения очередного прямолинейного участка увеличить его длину на величину  $L$  (участки с измененной длиной на рис. 107, а условно выделены черным цветом) и далее наплавлять зигзагообразный шов с прежними параметрами колебаний (амплитудой и периодом) торца электрода, т. е. сместить ось колебаний вдоль образующей цилиндрической детали

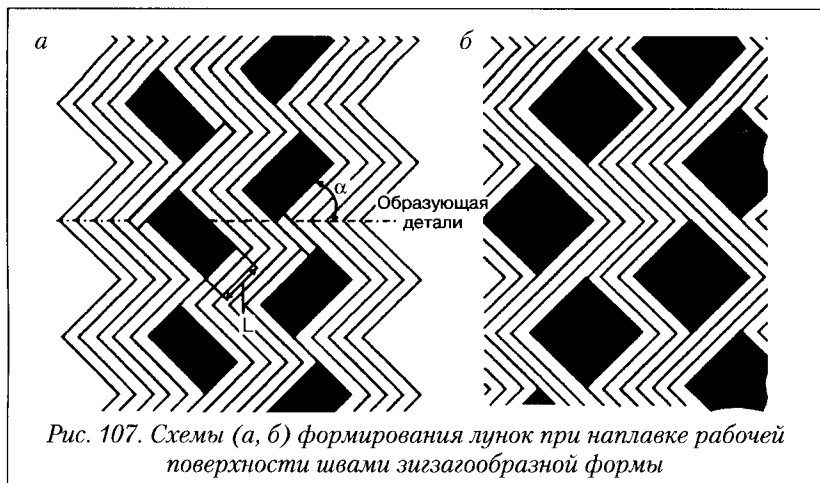


Рис. 107. Схемы (а, б) формирования лунок при наплавке рабочей поверхности швами зигзагообразной формы

на  $0,5L \cdot \cos\alpha$ , то на наплавляемой поверхности сформируется ряд четырехугольных лунок, расположенных под одинаковым углом к образующей детали.

При дальнейшей наплавке, уменьшая после нескольких полных оборотов детали длину прямолинейного участка относительно первоначальных размеров также на величину  $L$ , обеспечивают формирование лунок, наклоненных под углом  $\alpha$  относительно образующей детали, только в противоположную сторону относительно первого ряда лунок.

Количество полных оборотов детали, через которые необходимо смещать ось колебаний электрода, определяет площадь наплавленных участков между рядами лунок, т. е. частоту нанесения лунок в продольном направлении относительно образующей детали. Длина  $L$  изменения протяженности прямолинейного участка зигзагообразного шва определяет ширину лунки.

Аналогичного эффекта можно достичь, если при наплавке тел вращения по винтовой траектории зигзагообразным швом управлять амплитудой и периодом колебаний, периодически изменяя их при сохранении формы колебаний и их фазы (рис. 107, б).

Наплавку рабочего слоя швами сложной формы выполняют в оборудовании с программным управлением. При наплавке больших плоских поверхностей, когда повышение производительности наплавки становится весьма важным, наиболее целесообразно использование многоэлектродных автоматов или ленточных электродов.

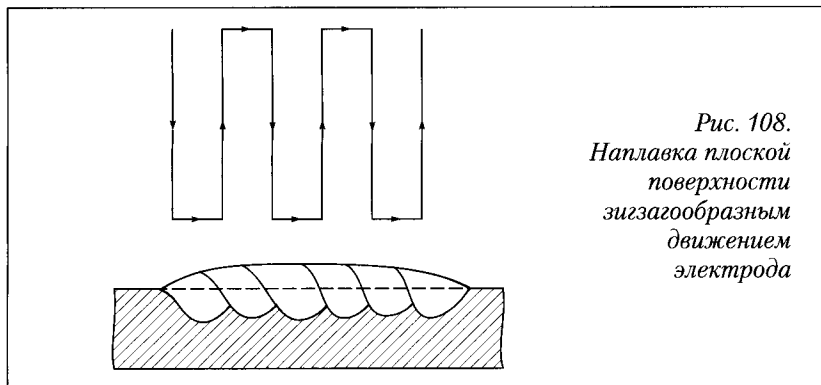


Рис. 108.  
Наплавка плоской  
поверхности  
зигзагообразным  
движением  
электрода

В частности, эти способы благоприятны для уменьшения деформаций наплавляемой детали, особенно при ее небольшой толщине.

При применении одноэлектродной наплавки целесообразно зигзагообразное перемещение электрода (рис. 108). При этом амплитуда поступательно-возвратных движений до 400 мм (в зависимости от режима) позволяет избежать операции удаления шлака перед подходом дуги.

Определенные технические трудности возникают при наплавке вблизи торца детали и в местах перехода от меньшего диаметра к большему. Для удержания расплавленного шлака и металла у торца иногда приходится прикреплять (приваривать) к нему диск-фланец большого диаметра, а в местах перехода к большему диаметру наплавлять валик, захватывающий плавлением стенку этого перехода.

При наплавке плоских поверхностей небольшой ширины (например, торцов ножей ножниц блюмингов) приходится ограничивать стекание шлака и металла при наплавке дополнительными устройствами, хотя иногда этого удается избежать подбором режима (уменьшением  $I_{св}$  и  $U_d$  и увеличением  $V_{св}$ ).

При наплавке деталей малого диаметра используют вибродуговую наплавку (рис. 109). Вибродуговую наплавку выполняют вибрирующим электродом преимущественно диаметром 1,2–2 мм, причем в результате его вибрации механическим путем или при помощи электромагнита с частотой до 30–100 Гц и амплитудой 0,5–1 мм дуга после короткого замыкания снова поджигается. При каждом коротком замыкании часть наплавляемого электрода остается на поверхности. Толщина слоя небольшая. Обычно в зону наплавки подается охлаждающая жидкость или воздушные струи, что

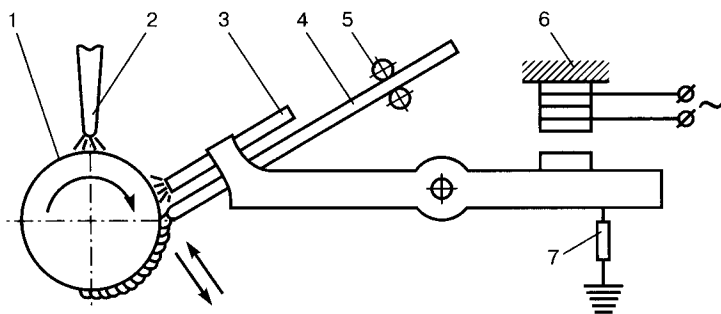


Рис. 109. Вибродуговая наплавка: 1 — наплавляемое изделие; 2 — сопло для подачи охлаждающей изделие жидкости; 3 — то же, для подачи жидкости в зону сварки; 4 — электродная проволока; 5 — электроподающие ролики; 6 — электромагнитный вибратор; 7 — пружина

уменьшает деформации изделия. Разработаны и нашли применение разновидности вибродуговой наплавки под флюсом, в среде  $\text{CO}_2$ , аргона, азота и др.

Достаточно широко применяют наплавку для упрочнения режущих кромок рабочих органов машин, инструмента. Предложена оригинальная технология наплавки таких изделий ленточным электродом 3 (рис. 110) при встречном перемещении двух изделий 1 и 2 вдоль упрочняемых кромок [174].

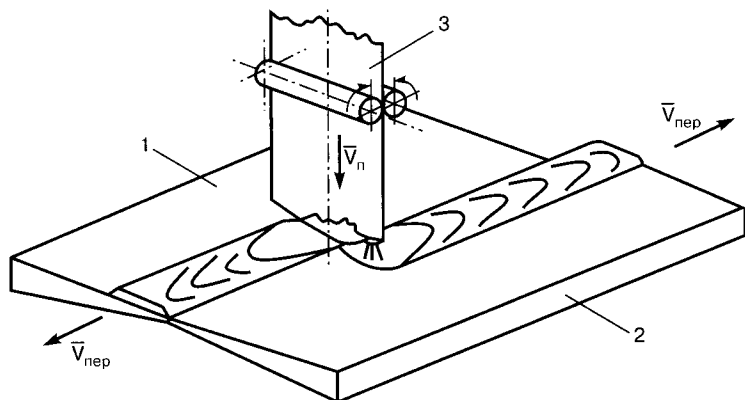


Рис. 110. Схема наплавки кромок пластин с их одновременным разделением: 1, 2 — наплавляемые изделия; 3 — ленточный электрод



При взаимном перемещении наплавляемых изделий сварочная ванна деформируется, образуя две ванны, хвостовые части которых сориентированы в противоположные стороны (в направлении векторов  $\vec{V}_{\text{пер}}$  перемещения пластин).

Разделение наплавленного металла при встречном перемещении наплавляемых пластин происходит в жидкой фазе, и на процесс их разделения энергия практически не расходуется.

Предложенная технология наплавки применима и для упрочнения изделий цилиндрической (рис. 111) и конической формы.

В современных условиях особый интерес представляет использование компьютерных систем проектирования технологий наплавки, в которых саккумулированы накопленные знания, данные и имеющийся опыт высококвалифицированных специалистов в области наплавки [175, 176]. Экспертная система «Наплавка» предназначена для разработки технологий механизированной электродуговой наплавки применительно к 12 способам наплавки тел вращения и деталей с плоской поверхностью, применяемых в различных отраслях промышленности (металлургия, горнодобывающая промышленность, химическое машиностроение, сельское хозяйство и др.). Система включает несколько подсистем: выбор наплавочного материала; разработка технологии наплавки; редактирование баз данных наплавочных материалов; банк технологий наплавки. Подсистема выбора наплавочного материала в авторском варианте содержит информацию о 280 материалах, используемых в странах СНГ.

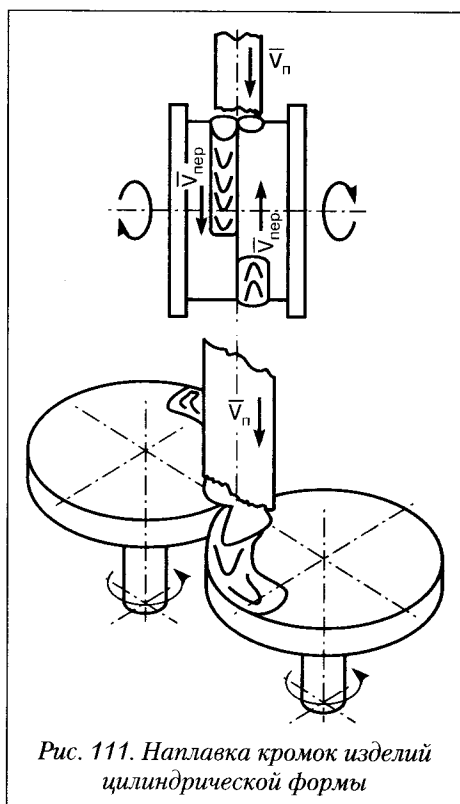


Рис. 111. Наплавка кромок изделий цилиндрической формы

Она включает данные о применении наплавочного материала (условия работы и виды износа детали), сварочно-технологических характеристиках материала, износостойкости наплавленного металла и др. Детали, эксплуатируемые в сходных условиях, сгруппированы в 42 группы, так что пользователю достаточно указать группу, к которой относится наплавляемая деталь, чтобы получить рекомендации о подходящих наплавочных материалах. Для более точного определения оптимального наплавочного материала требуется дополнительно сообщить компьютеру детальную информацию об условиях работы и видах износа деталей.

Подсистема разработки технологии наплавки дает рекомендации о подходящих способах и технике наплавки данной детали, ее габаритах и пространственном положении наплавленного слоя, предлагает пользователю варианты рациональных режимов наплавки проволокой (лентами) различного диаметра. Итогом работы экспертной системы «Наплавка» [175] является выходной документ, в котором отражены результаты совместной работы технолога-сварщика и компьютера.

Важной составляющей комплексной технологии наплавки является подготовка технических решений по обработке наплавленных изделий.

Из практики известно, что инструмент, оснащенный классическим твердым сплавом, не позволяет обрабатывать резанием наплавленную поверхность с твердостью выше 40 HRC<sub>3</sub>. Для обработки резанием наплавленного металла с твердостью 40–60 HRC<sub>3</sub> рекомендуют применять инструмент, оснащенный поликристаллическим сверхтвердым материалом кубического нитрида бора, композита 10 (гексанит-Р), киборита и двухслойные поликристаллы 10 Д [166]. Резцы из этих материалов позволяют обрабатывать поверхностные слои наплавленного металла, характеризующиеся значительной волнистостью, что приводит к большим динамическим нагрузкам на режущее лезвие инструмента.

При обработке шлифованием материалов с невысокой износостойкостью и твердостью до 40 HRC<sub>3</sub> можно эффективно использовать шлифовальные круги из электрокорунда. Круги из карбида кремния пригодны для обработки поверхностей средней и высокой износостойкости с твердостью 40–60 HRC<sub>3</sub>, однако в большинстве случаев при шлифовании поверхностей указанной твердости лучшие результаты обеспечивают алмазные круги [166]. Наплавленный металл с самой высокой износостойкостью, имеющий твер-

дость 60 HRC<sub>3</sub> и выше, необходимо обрабатывать только алмазными кругами.

Контроль качества наплавленного металла осуществляют различными способами. В большинстве случаев качество наплавленного металла характеризуется его твердостью. Контроль твердости наплавленных деталей выполняют как на самих деталях, так и на образцах-свидетелях.

Все наплавленные детали, независимо от других методов контроля, подвергают внешнему осмотру, которым выявляют подрезы, наплывы, неравномерности геометрических размеров наплавленного слоя, а также трещины и поры, выходящие на поверхность наплавленного металла. Трещины и поры, выходящие на поверхность, определяют также капиллярными (цветными, люминесцентным) и магнитным методами. Для выявления внутренних дефектов используют ультразвуковой и радиационный методы контроля.

Перечень наиболее крупных организаций, имеющих большой опыт разработки материалов, технологий и оборудования для наплавки, и направления их деятельности приведены в *табл. 103* [172].

<b>Таблица 103. Направления разработок наиболее крупных организаций в области наплавки</b>		
<i>Организация</i>	<i>Разработка наплавочных материалов</i>	<i>Разработка оборудования и технологий</i>
ИЭС им. Е.О. Патона	Флюсы, наплавочная проволока сплошного сечения и порошковая, специальные электроды, всего свыше 150 наименований для восстановления износа всех видов	Технология, специализированные и универсальные установки для автоматизированной наплавки под флюсом для горнодобывающей техники, металлургического оборудования, сельскохозяйственной техники и др.
Уральский комплекс ООО «Манэпрем» (Екатеринбург), ЗАО «Завод сварочных материалов» (г. Березовский Свердловской обл.), ООО «Композит»	Порошковая проволока для наплавки открытой дугой и под флюсом твердосплавными износостойкими материалами с твердостью до 59–62 HRC	Технология наплавки горнодобывающей техники и металлургического оборудования

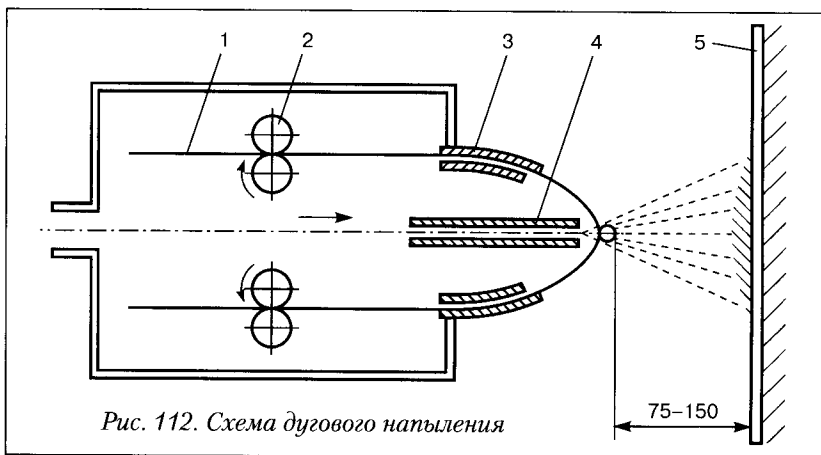
Организация	Разработка наплавочных материалов	Разработка оборудования и технологий
ВНИИ-ТУВИД «Ремдеталь»	Технологии восстановления деталей машин, в том числе нанесение композиционных материалов, детонационное напыление, плазменная наплавка и напыление, электродуговая металлизация, газопорошковая наплавка, электроконтактная приварка	Универсальное и специализированное оборудование для ремонта автотракторной и сельскохозяйственной техники, нефтехимического производства, дорожно-строительной техники и др.
Институт сварки России	Технология высокопроизводительной широкослойной электродуговой наплавки под флюсом	Специализированные наплавочные установки для восстановительной наплавки деталей и узлов железнодорожной техники
Концерн ESAB (Швеция)	Около 50 наименований специальных наплавочных материалов для износа практически всех видов (электроды, проволока сплошного сечения и порошковая, флюсы) с использованием дуговой и плазменной наплавки всех видов	Специализированные наплавочные установки и комплексы (для предварительной обработки, подогрева, наплавки, термостаты для замедленного охлаждения и др.) для горнодобывающей техники, металлургического производства, автотранспортной техники, почвообрабатывающих и других машин
Welding Alloys Limited (Англия)	Свыше 60 типов специальной порошковой проволоки для износа практически всех видов	Специализированное и универсальное оборудование и устройства (аналогично п. ESAB)
Kobe Steel, LTD Welding Division (Япония)	Около 40 видов наплавочных материалов (электроды, проволока сплошная и порошковая, ленты)	Технология дуговой наплавки различных видов деталей
Castolin Eutectic (Польша)	—	Оборудование и технология для газоплазменного напыления, дуговой наплавки
Bohler-schweiss-technik (Австрия)	Электроды, проволока сплошная и порошковая для восстановления износа всех видов	Универсальное и специализированное оборудование для изготовительной и восстановительной наплавки деталей горнодобывающей и металлургической техники и др.

Несмотря на наличие многих альтернативных способов восстановления и упрочнения поверхностей деталей (плазменная и лазерная наплавка, плазменное и дуговое напыление и др.), дуговая наплавка остается одним из самых востребованных способов.

## 2.4. Электродуговое напыление

Электрическую дугу как источник энергии используют при напылении покрытий [177, 178]. Сущность электродугового напыления (ЭДН) (устаревшее название — электродуговая металлизация) состоит в том, что подающим механизмом 2 (рис. 112) через наконечник 3 непрерывно подаются под углом две изолированные, находящиеся под напряжением проволоки 1, при соприкосновении которых возникает электрическая дуга. Расплавленный в ней электродный металл расплывается струей сжатого воздуха или другого газа, подводимого под давлением 0,4–0,6 МПа через сопло 4 в зону дуги, ускоряется и направляется на поверхность детали 5, образуя напыленный слой.

Дуга питается постоянным или переменным током. В первом случае стабильность горения дуги более высокая, поэтому переменный ток в настоящее время практически не используют. Известны попытки использования для дугового напыления трех электродных проволок. По причине недостаточной стабильности процесса этот способ не получил широкого распространения.



Свойства газотермических покрытий во многом определяются скоростью, температурой и диаметром напыляемых частиц [177]. При этом конструктивные особенности сопловой системы, режим истечения распыляющего газа, дистанция напыления и напряжение горения дуги являются основными факторами, позволяющими управлять упомянутыми выше параметрами, а следовательно, и эксплуатационными свойствами покрытий после электродугового напыления [178]. Производительность электродугового напыления 3–20 кг/ч.

**Особенности процесса ЭДН.** Основные стадии [179]:

- подача в зону горения дуги и плавление электродных материалов;
- диспергирование частиц расплава металла в зоне дуги газовым потоком;
- полет частиц и взаимодействие их с атмосферой;
- соударение частиц с подложкой, их кристаллизация и формирование структуры покрытия.

Состояние металла и процессы, происходящие в напыляемом материале на различных стадиях напыления, представлены в табл. 104 [180].

Согласно [178], плавление электродов идет в основном за счет энергии, которая выделяется в зоне активных пятен дуги. Среднемассовая температура жидкого металла  $T$  находится в диапазоне  $T_{\text{пл}} \leq T \leq T_{\text{кип}}$ , где  $T_{\text{пл}}$ ,  $T_{\text{кип}}$  — соответственно температура плавления и температура кипения металла электродов.

Фронт плавления близок по форме к плоскости, нормаль к которой пересекается с осью электрода под некоторым углом  $\varphi$  (рис. 113). Этот угол может изменяться с  $0^\circ$  до  $\varphi_{\text{max}} = 90 - \omega/2$ , где  $\omega$  — угол пересечения осей электродов. Изменение режима распыления проволоки ведет к изменению угла наклона фронта плавления при постоянной скорости подачи электродов. Увеличение

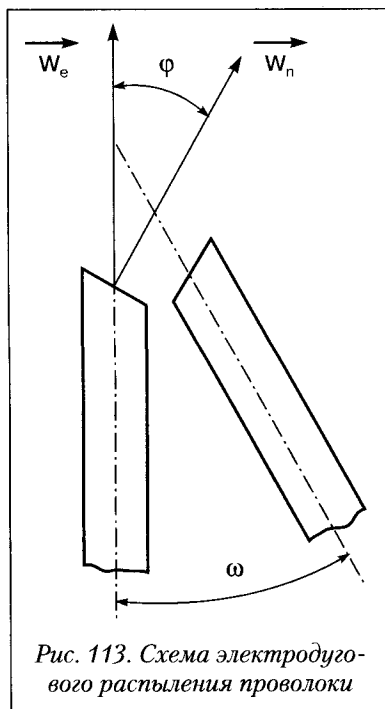


Рис. 113. Схема электродугового распыления проволоки

**Таблица 104. Основные процессы, происходящие  
в напыляемом металле**

<i>Стадия напыления</i>	<i>Агрегатное состояние материала</i>	<i>Температура, °С</i>	<i>Основные процессы, происходящие в металле</i>
Подача проволоки	Твердое	20	—
Плавление	Жидкое	2700–2800	Образование капли расплавленного металла на торце проволоки, образование оксидов за счет окисления металла кислородом воздуха, испарение и перегрев металла, диффузионные процессы
Диспергирование	Жидкое	2800–2900	Отрыв капли от торца, дробление капли на более мелкие фракции, окисление и испарение металла и легких элементов, насыщение металла кислородом, образование шлаков, металлургическое взаимодействие компонентов проволоки между собой
Полет частиц	Жидкое (90%), твердое (10%)	1600–1800	Окисление металла, выделение кислорода вследствие падения растворимости, образование шлаков, взаимодействие компонентов проволоки между собой, охлаждение частиц
Соударение, кристаллизация		1600 > 50–150	Дробление капли, взаимодействие с оксидами на поверхности, кристаллизация, закалка, образование пересыщенных твердых растворов

напряжения дуги ведет к уменьшению угла  $\phi$ , при увеличении скорости подачи электродов угол  $\phi$  увеличивается.

Если между средней скоростью перемещения фронта плавления и скоростью подачи электродов существует динамическое равновесие, то наблюдается стабильное горение дуги без коротких замыканий и срывов. При таком режиме газовый поток обеспечивает эвакуацию и распыление порций жидкого металла с электродов до их столкновения и короткого замыкания. Далее расплавленный металл снова накапливается на торцах электродов, столб дуги сокращается и цикл повторяется.

Наряду с периодическим выбрасыванием порций металла из межэлектродного пространства имеет место также непрерывное струйное стекание перегретого металла с поверхности электродов.

Это является результатом уменьшения сил поверхностного натяжения при сильном перегреве расплавленного металла и, как следствие, невозможности удержания оплавленного слоя на поверхности электродов. Под действием потока газа этот оплавленный слой смывается с поверхности электродов и распыляется. Масса и размеры капли значительно меньше, чем масса порций металла, который отрывается от электродов за один цикл горения дуги.

Средняя скорость плавления электродов (проволоки)  $W_n$  связана со скоростью их подачи  $W_c$  зависимостью  $W_c = W_n / \cos\varphi$ , а производительность процесса  $G$ :

$$G = 2\pi r^2 \cdot \rho \cdot W_n / \cos\varphi, \quad (21)$$

где  $\rho$  — плотность материала электродов,  $\text{кг/м}^3$ ;  $r$  — радиус электродов, м.

Согласно этому выражению производительность электродугового напыления можно поднимать либо за счет увеличения диаметра электродов (если позволяет мощность источника питания), либо при условии, чтобы средняя скорость плавления электродов и угол  $\varphi$  были максимальными. Увеличение диаметра электродов больше 2–3 мм во многих случаях нежелательно, так как требует значительного увеличения мощности привода и, соответственно, массы аппарата. Кроме того, значительно увеличивается диаметр воздушного сопла, а следовательно, расход распыливающего газа. Таким образом, перспективным путем повышения производительности электродугового напыления можно считать увеличение  $W_n$  и  $\varphi$ .

Угол  $\varphi$  увеличивается с уменьшением напряжения дуги. Поэтому для повышения производительности электродугового напыления следует выполнять дугой минимальной длины, напряжение которой незначительно превышает сумму приэлектродных падений напряжения. С уменьшением напряжения повышается не только производительность, но и эффективность электродугового напыления.

Установлено [181], что коэффициент использования металла  $\eta_M$  не зависит от диаметра проволоки и плотности тока и уменьшается только с ростом падения напряжения дуги. При работе на переменном токе значение  $\eta_M$  на 3–5% ниже, чем при постоянном токе.

В [181] максимальное значение  $\eta_M$  получали при работе на режимах с напряжением дуги, близким к нижнему пределу устойчивости ее горения. При напылении цинка (напряжение 19 В) и алюминия (напряжение 20 В) с использованием проволоки диаметром 2 мм значение  $\eta_M$  равно соответственно 0,65 и 0,72.



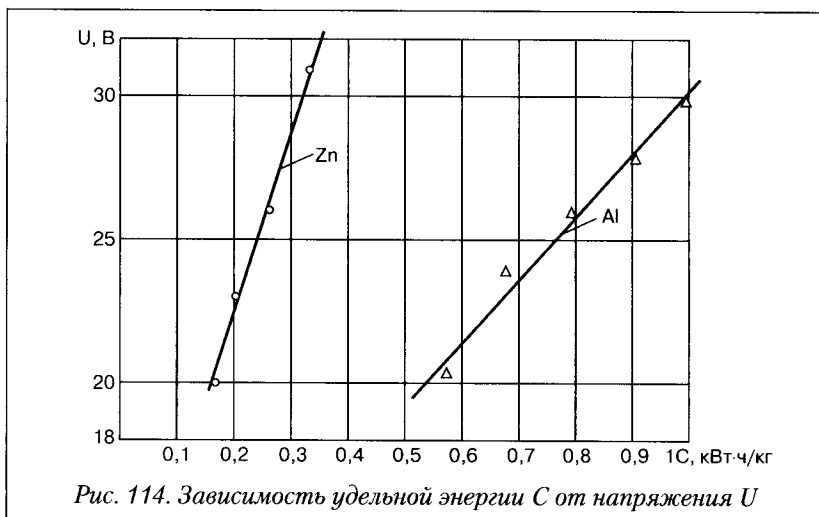


Рис. 114. Зависимость удельной энергии  $C$  от напряжения  $U$

Удельный расход энергии (на килограмм расплавленного металла) не зависит от диаметра проволоки и плотности тока, а изменяется только при изменении напряжения дуги (рис. 114) [181].

Эффективный КПД нагрева и расплавления проволоки также зависит только от напряжения дуги.

Сдувание жидкого металла с электродов и его дробление происходит под действием газодинамических и электромагнитных сил [178, 182]. При этом с торцов электродов срываются капли, по массе (для стали) соответствующие каплям диаметром 500–800 мкм, с периодом срыва  $(5-8) \cdot 10^{-4}$  с. На рабочей дистанции их диаметр составляет 10–300 мкм, а массовая доля капель диаметром менее 140 мкм равняется 60–80%. Согласно [182] силы, имеющие электромагнитную природу, играют существенную роль в образовании более мелких капель.

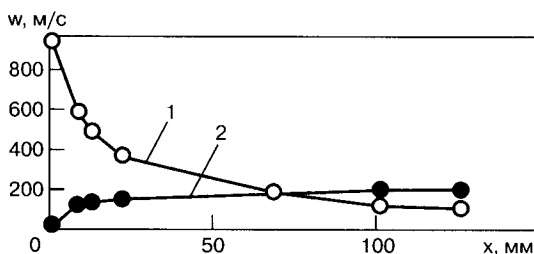
При истечении газа из сопла скорость струи может быть как сверхзвуковой, так и дозвуковой. Отмечают [183], что и в том, и в другом случае взаимодействие газового потока с электродами сопровождается образованием за ними застойных зон, в которых осевая составляющая скорости потока незначительна и параметры потока близки к параметрам торможения. В результате эвакуация расплавленного металла из застойных зон затруднена, что приводит к скапливанию жидкого металла в этих областях. Поэтому считают, что эвакуация и первоначальное дробление частиц расплав-

ленного металла при электродуговом напылении осуществляется только дозвуковым газовым потоком, что накладывает определенные ограничения на размер напыляемых частиц и на возможность уменьшения толщины жидкой прослойки и понижения энергозатрат на плавление металла.

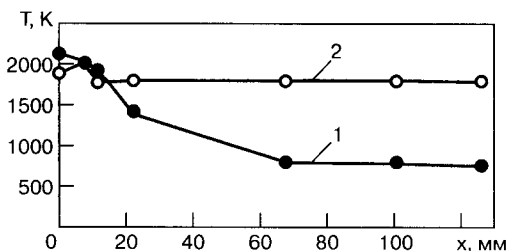
В то же время в последние десятилетия получены новые сведения о результатах изучения сверхзвукового электродугового напыления с использованием в качестве газовой струи продуктов сгорания метана [184] или пропана [185]. В последнем случае процесс назван «активированной дуговой металлизацией (АДМ)». Показано [184], что при использовании в качестве распыляющего газа продуктов сгорания метана средний диаметр стальных частиц уменьшается до 0,12–0,18 мм, при применении в качестве распыляющего газа воздуха размер частиц 0,33–0,42 мм, а ускорение частиц возрастает более чем в 4 раза.

В [185] исследовали движение, нагрев и окисление частиц при АДМ, когда в качестве распыляющего газа используются продукты сгорания пропановоздушной смеси, получаемой в камере сгорания и подаваемой через профилированное сопло Лавала и обжимающее сопло в точке плавления электродной проволоки. На *рис. 115* и *116*

*Рис. 115.*  
Зависимость  
скоростей  
газа (1)  
и частиц (2)  
от дистанции  
напыления  
по оси струи



*Рис. 116.*  
Зависимость  
температур  
газа (1)  
и частиц (2)  
от дистанции  
напыления  
по оси струи



показаны кривые изменения скоростей и температур по оси струи в зависимости от дистанции напыления  $X$ . Видно, что у частиц после окончания начального участка газовой струи эти параметры изменяются незначительно. По мнению авторов, незначительное изменение скорости связано с относительно большой массой частиц, а на изменение температуры влияет энтальпия плавления.

Одним из недостатков покрытий, получаемых электродуговым напылением с использованием в качестве распыляемого газа воздуха, является высокая степень их окисления. Также покрытия, формируемые окисленными частицами, характеризуются высокой пористостью и низкой прочностью сцепления с основой. При этом главной причиной окисления материала электродов является его взаимодействие с кислородом в зоне горения дуги.

Реальными путями снижения окисления напыляемых частиц являются:

- использование инертного (аргона, гелия) и нейтрального (азота) распыляющих газов;
- связывание кислорода углеводородными газами (метаном, пропаном);
- введение различных раскислителей в распыляемую проволоку.

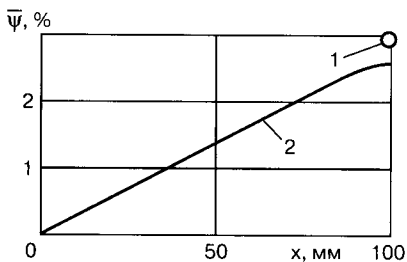
Применение инертных и нейтральных газов не получило широкого распространения как по причине высокой стоимости, так и вследствие необходимости вести процесс при повышенном напряжении дуги, что снижает его эффективность.

Как показала практика, с точки зрения технической и экономической целесообразности приемлемым является напыление продуктами сгорания газозвушной смеси, в которой содержится 10–15% природного газа [184]. При этом окисление частиц снижается на 35–40% по сравнению с окислением частиц при традиционном распылении струей сжатого воздуха. Снижению окисления напыляемого материала в сверхзвуковом потоке способствует уменьшение времени контакта расплавленных частиц за счет более высокой их скорости на дистанции напыления. С увеличением самой дистанции при сверхзвуковом напылении в продуктах сгорания пропановоздушной смеси степень окисления увеличивается (рис. 117) [185]. Также увеличивается окисление и при уменьшении диаметра распыляемых частиц.

В металлургии для раскисления стали наиболее часто используют углерод, бор, алюминий, кремний, марганец, титан, а также их соединения. Практически эти же элементы вводят в сплошную или

Рис. 117. Зависимость степени окисления частиц  $\psi$  от дистанции напыления:

1 — опытные данные;  
2 — средневзвешенная расчетная степень окисления



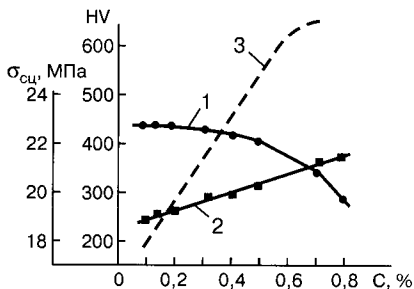
порошковую проволоку, используемую для электродугового напыления. Однако кроме раскисляющего действия вводимые в распыляемую проволоку элементы должны выполнять и другие функции, в частности: формировать защитные покрытия на вновь образующихся раздробленных частицах, повышать нагрев и теплосодержание частиц и др. [180]. Легирование сплава в целом должно обеспечивать высокий комплекс механических и эксплуатационных свойств покрытий при ЭДН.

В [180] исследовали влияние углерода, бора, алюминия, хрома, никеля, кремния и марганца на свойства покрытий, полученных ЭДН с распылением материала воздушной струей. При этом использовали различную проволоку диаметром 1,6 и 2,0 мм: Св-08А, Св-08ГС, Св-08Г2С из сталей 10, Нп 40, 70, У8, 40Х, 20Х13, 40Х13, 30ХГСА, а также из сталей 10, 40 и 70, диффузионно-легированных бором и алюминием.

На рис. 118 показаны кривые зависимости механических характеристик покрытий от содержания углерода в проволоке различных марок. Установлено, что прочность сцепления покрытий при увеличении содержания **углерода** в проволоке незначительно сни-

Рис. 118. Зависимость механических характеристик покрытий от содержания углерода в исходной проволоке:

1 — прочность сцепления;  
2 — твердость;  
3 — твердость закаленной стали



жается, что связывают с уменьшением пластичности структур (продукты распада мартенсита — троостит, сорбит), образующихся при напылении, и повышением внутренних напряжений в покрытии. Содержание углерода в покрытии снижается в 2–3 раза по сравнению с содержанием в проволоке. Упрочняющее действие углерода проявляется в меньшей степени, чем при закалке стали. Углерод практически не защищает металл от окисления при ЭДН ввиду малых концентраций.

**Бор** при введении его в металлы образует бориды. Борсодержащие покрытия обладают высокой износостойкостью. В то же время бор отрицательно влияет на пластические свойства материала покрытия, понижая его сопротивление ударным нагрузкам.

Благодаря наличию легкоплавкой железо-бористой эвтектики повышается жидкотекучесть расплавленного металла, что способствует мелкокапельному переносу при напылении.

С увеличением количества бора в проволоке количество оксидов в покрытии снижается.

Введение бора в стальную проволоку диффузионным путем способствует значительному повышению твердости покрытий при последующем напылении (рис. 119, а), что обусловлено образованием гетерогенных структур с высокой твердостью [180].

Повышение содержания углерода в проволоке приводит к увеличению твердости покрытия при том же содержании бора. Влияние бора на прочность сцепления носит нелинейный характер (рис. 119, б) [180]. Первоначально наблюдается незначительное по-

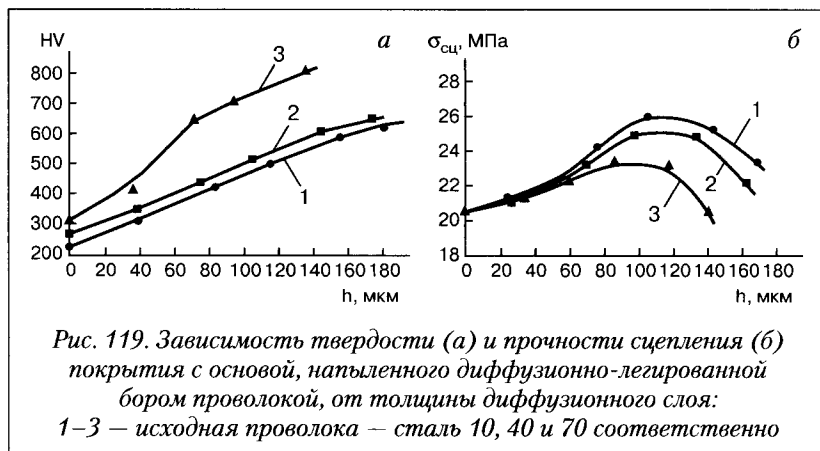
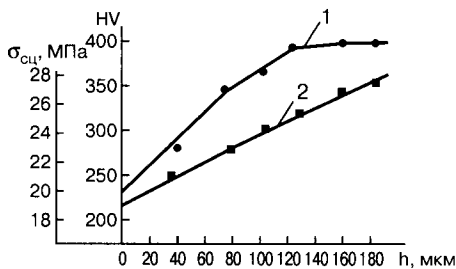


Рис. 119. Зависимость твердости (а) и прочности сцепления (б) покрытия с основой, напыленного диффузионно-легированной бором проволокой, от толщины диффузионного слоя: 1–3 — исходная проволока — сталь 10, 40 и 70 соответственно

Рис. 120. Зависимость прочности сцепления (1) и твердости (2) покрытия, напыленного диффузионно-легированной алюминием проволокой из стали 10, от толщины диффузионного слоя



вышение прочности сцепления при увеличении содержания бора в проволоке, при определенном содержании бора она достигает максимума, а затем при дальнейшем увеличении содержания бора снижается. Такое поведение бора связывают с образованием в покрытии высокотвердых и хрупких структур, доля которых с ростом содержания бора растет.

**Алюминий** практически не влияет на упрочнение сплавов на железной основе. В состав порошковой проволоки, применяемой при ЭДН, алюминий вводят преимущественно совместно с никелем и хромом для повышения прочности сцепления покрытий за счет раскисления алюминием оксидов железа, а также повышения температуры частиц при прохождении экзотермических реакций между компонентами порошковой шихты [186].

В [180] влияние алюминия на свойства покрытий исследовали при напылении диффузионно-легированной алюминием сплошной углеродистой проволокой. Установлено, что алюминий при введении его в проволоку незначительно повышает твердость напыленных покрытий (рис. 120) за счет образования интерметаллидов и оксидов. Повышение прочности сцепления напыленного покрытия с подложкой относят за счет протекания при напылении в расплаве капель экзотермических реакций.

Максимальное содержание алюминия в проволоке, получаемой диффузионным легированием, составляет 8,1–8,5%. Этим значением соответствует прочность покрытия 28–30 МПа.

**Хром** находит весьма широкое применение для легирования. Хром способствует повышению прокаливаемости стали при быстром охлаждении, поэтому структура покрытий из хромистых сталей состоит в основном из мартенсита и продуктов его отпуска. При значительном содержании хрома в исходной проволоке в по-

крытии образуются карбиды  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , а также небольшое количество аустенита [180]. Хром в значительной степени повышает коррозионную стойкость покрытий, а также адгезию покрытия к смазке. На прочность сцепления покрытий хром в чистом виде не влияет. При ЭДН хром практически не выгорает.

**Никель** неограниченно растворим в железе и является сильным аустенизирующим элементом. Его влияние заключается в существенном повышении стойкости покрытий против ударных нагрузок. С увеличением содержания никеля повышается вязкость сплава практически без ущерба для износостойкости. Из-за высокой стоимости содержание никеля в износостойких сплавах на основе железа ограничивают, исключение составляют сплавы для коррозионно-стойких покрытий.

Никель в присутствии алюминия способствует повышению твердости покрытий, прочности сцепления и пластичности. В процессе напыления выгорает незначительно.

**Кремний** в малых количествах (до 1,0%) слабо влияет на структуру и механические свойства. Кремний повышает коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов. Однако механические и триботехнические свойства стали при легировании только кремнием низки. Как правило, содержание его в проволоке не превышает 1–2%. При напылении из-за малого времени существования жидкого расплава металла кремний как раскислитель малоэффективен.

Стали, легированные **марганцем**, имеют в структуре значительное количество остаточного аустенита. Образованная при этом структура (остаточный аустенит, мартенсит, карбиды) обладает высокими эксплуатационными свойствами, особенно в условиях ударных нагрузок. Для сплавов системы Fe-Cr-Mn-C оптимальное содержание марганца — 2–4%.

Эффективно легирование марганцем бористых сплавов. Однако для аустенитизации сплава и повышения его ударостойкости необходимо дополнительное легирование никелем.

Обобщенные данные о влиянии различных легирующих элементов на характеристики покрытий при электродуговом напылении приведены в *табл. 105* [180].

На основании приведенных выше данных авторы [180] делают вывод о том, что формирование структур при электродуговом напылении с повышенной и высокой твердостью возможно при использовании сплавов систем Fe-C-B, Fe-B, Fe-Cr-B, Fe-C-Cr, Fe-Al-B, а с повышенной прочностью сцепления — систем Fe-Al, Fe-B, Ni-Al.

**Таблица 105. Влияние легирующих элементов на характеристики покрытий при электродуговом напылении**

Показатель	Углерод	Бор	Алюминий	Никель	Хром	Марганец	Кремний
Твердость	Повышает		Повышает	Не влияет	Повышает	Не влияет	
Пластичность	Снижает			Повышает	Не влияет	Снижает	
Износостойкость	Повышает			Не влияет	Повышает	Не влияет	
Прочность сцепления	Снижает	Повышает		Повышает	Не влияет	Снижает	Не влияет
Степень окисления	Не влияет	Снижает		Не влияет		Снижает	
Температура частиц		Повышает				Не влияет	

По их мнению, введение бора и алюминия экономически целесообразно благодаря диффузионному легированию стальной сплошной проволоки, так как такая сплошная проволока будет дешевле порошковой.

**Оборудование для электродугового напыления.** Основными составляющими аппаратов для электродугового напыления являются распылительная головка, привод для подачи проволоки, система управления, источник питания.

Лучшие результаты напыления обеспечивают источники постоянного электрического тока со стабилизатором напряжения или источники со слегка возрастающей характеристикой.

Распылительные головки применяют двух типов — открытые и закрытые (рис. 121) [183].

Открытые сопловые системы (рис. 121, а), как правило, представляют собой одно или несколько газовых сопел, расположенных между проволоками. Канал сопла может быть профилированным или цилиндрическим.

Для уменьшения размера застойных зон, являющихся причиной образования крупной фракции напыляемых частиц, используют спутные газовые потоки, которые формируются кольцевым соплом [183]. Наряду с уменьшением размера застойных зон спутные потоки позволяют повысить дальнобойность центральной струи и скорость напыляемых частиц. Используют также распылительные



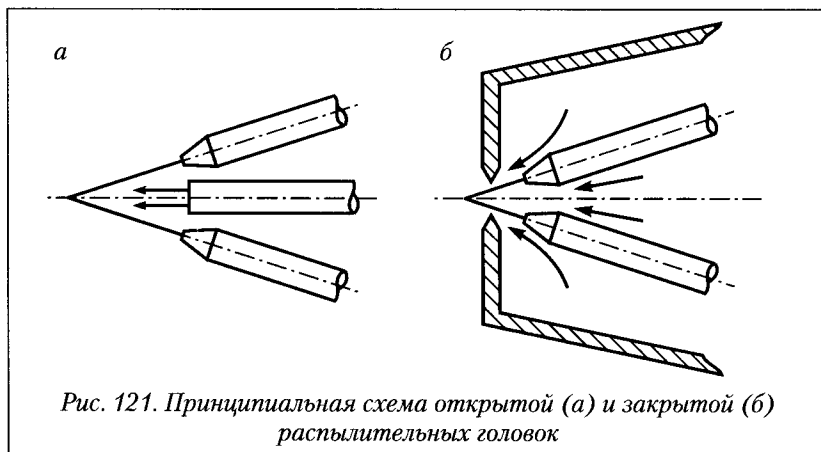


Рис. 121. Принципиальная схема открытой (а) и закрытой (б) распылительных головок

головки с раздвоенным воздушным соплом (рис. 122) [187]. Раздвоение воздушного потока способствует дополнительному обжатию дуги. В результате поток расплавленных частиц металла, напыляемых на подложку, становится более концентрированным, размер частиц уменьшается, а скорость их увеличивается на 15–20% по сравнению с обычной формой струи, получаемой при использовании стандартной головки металлатора. При этом обеспечивается более высокая прочность сцепления покрытия с основным металлом.

В случае закрытых распылительных головок электроды расположены внутри сопла, а распыляющий газ подается в сопло из замкнутой полости, в которой также размещены и токоподводящие элементы (рис. 121, б).

Конструктивные особенности закрытых распылительных головок, как правило, позволяют применять в качестве сопла только диафрагму с острой кромкой, а не профилированные сопла. Применение же диафрагмы в рассматриваемом случае приводит к первоначальному незначительному сужению струи (на расстоянии порядка калибра отверстия диафрагмы) с последующим расширением фронта струи. Согласно [183] с целью уменьшения размера напыляемых частиц и пористости получаемых покрытий при необходимости нанесения покрытий на сравнительно большие изделия целесообразно применение закрытых сопловых систем.

Открытые сопловые системы имеют преимущество перед закрытыми в тех случаях, когда требования к плотности менее жест-

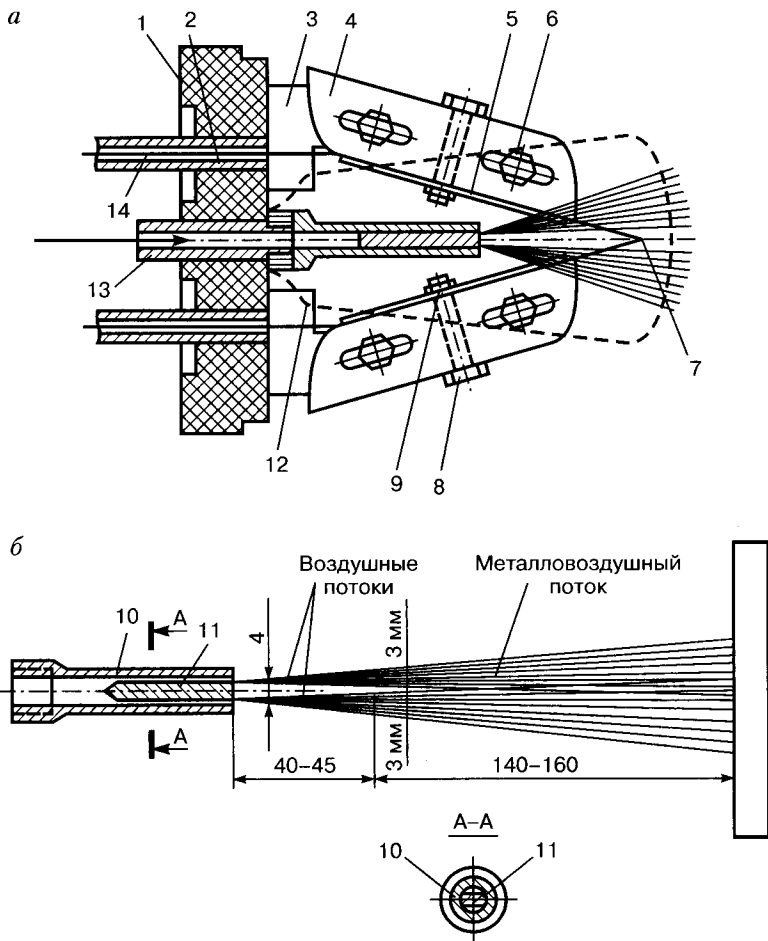


Рис. 122. Схема распыляющей головки с раздвоенным воздушным соплом к металлизационному аппарату:  
 а — конструктивная схема, б — схема распыления покрытия  
 (1 — панель; 2 — трубка направляющая; 3 — шина;  
 4 — направляющая планка; 5 — пружина прижимная; 6 — болт;  
 7 — прижимной болт; 8 — гайка; 9 — воздушное сопло; 10 —  
 перегородка воздушного сопла; 11 — защитный экран; 12 — воздухо-  
 провод; 13 — проволока для напыления; 14 — электрическая дуга)

ки, а незначительные размеры напыляемых деталей требуют применения концентрированной металловоздушной струи.

В металлизаторе производства ГМП «Газотермик» при Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины используется распылительная головка, в которой воздух проходит теми же каналами, что и электродная проволока [186]. При этом используют кольцевидное профилированное сопло, которое повышает скорость воздушного потока и создает сильное динамическое давление в зоне горения дуги, что обеспечивает интенсивное диспергирование расплавленного металла. Вследствие этого возрастают адгезионные и когезионные характеристики покрытия. При использовании указанной головки для распыления порошковой проволоки наибольший размер частиц расплавленного металла составляет 150 мкм. Металлизатор с такой головкой обеспечивает формирование качественных восстановительных и износостойких покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкой шихтой.

Согласно [186] закрытая распылительная головка способствует получению более мелких частиц (<50 мкм), отличающихся высокой скоростью полета. Такую головку рекомендуют использовать при формировании мелкодисперсного покрытия небольшой толщины (50–200 мкм), получаемого с использованием порошковой проволоки, содержащей шихту с тугоплавкими компонентами. Для реализации АДМ используют металлзаторы, имеющие камеру сгорания пропано-воздушной смеси. Образовавшиеся продукты сгорания подаются через профилированное сопло Лаваля и специальное обжимающее сопло в точку плавления электродных проволок [185]. Указанные металлзаторы отличаются улучшенными выходными характеристиками по сравнению с аппаратами, реализующими традиционный процесс ЭДН: угол распыления уменьшен в 2–3 раза, коэффициент использования материала достигает 85% (у других аппаратов 50–70%), а степень окисления стального покрытия снижена с 4,7 до 2,9%.

В [184] для распыления проволоки используют сверхзвуковой металлзатор (*рис. 123*), формирующий не полностью расширенную сверхзвуковую струю горячих продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, вытекающую из сопла. Авторы [184] утверждают, что с точки зрения технической и экономической целесообразности приемлемо напыление продуктами сгорания газовойоздушной смеси, в которой содержится 10–15% природного газа. Такой процесс обеспечивает снижение окисленности частиц на 35–40%.

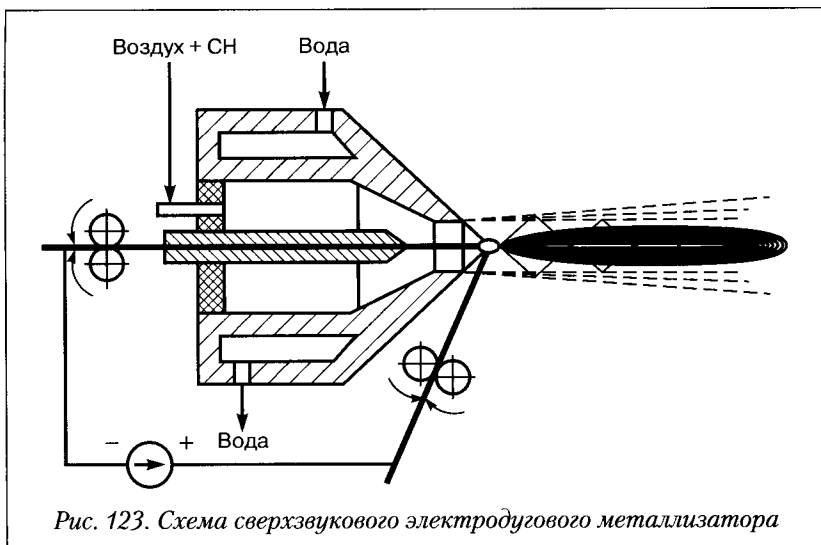


Рис. 123. Схема сверхзвукового электродугового металлатора

НПП «ТОПАС» создана аппаратура для сверхзвуковой ЭДН.

*Технические характеристики металлатора мод. УСМ-4:*

*Рабочее напряжение на дуге, В . . . . . 36–38*

*Сила тока дуги, А . . . . . 15–250*

*Производительность напыления, кг/ч . . . . . 8–15*

*Диаметр распыляемой проволоки, мм . . . . . 1,2–2,2*

*Расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 30–40*

*Расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 4–5*

*Давление газов, МПа . . . . . 0,5–0,6*

Базируясь на технологических исследованиях НПП «ТОПАС» и опыте применения сверхзвуковой ЭДН, в ОАО «Украинский институт сварочного производства» спроектирована и изготовлена полуавтоматическая линия напыления коленчатых валов в составе полуавтомата абразивно-струйной обработки (рис. 124) и полуавтомата ЭДН [188].

Полуавтомат ЭДН включает камеру, в которой размещены манипулятор, металлатор, передняя и задняя бабка, шкаф управления, электрооборудование, аспирационное устройство (рис. 125).

Полуавтоматическая линия, состоящая из двух полуавтоматов, предназначена для упрочнения как новых, так и изношенных коленчатых валов с целью повышения их эксплуатационной надеж-

ности и продления срока службы. На базе указанной полуавтоматической линии организован участок по восстановлению коленчатых валов в локомотивном депо «Укрзалізниці» (г. Иловайск).

*Технические характеристики полуавтомата ЭДН:*

*Максимальные габаритные размеры обрабатываемых коленчатых валов, мм:*

<i>длина</i> .....	<i>1904</i>
<i>диаметр шеек</i> .....	<i>140</i>
<i>диаметр при вращении относительно оси шатунной шейки</i> .....	<i>580</i>
<i>ширина шейки</i> .....	<i>100</i>

*Расстояние между осями коренных и шатунных шеек*

*(радиус кривошипа), мм* .....

*Максимальная масса коленчатого вала, кг* .....

*Частота вращения коленчатого вала, об/мин* .....

*Скорость продольного рабочего возвратно-поступательного перемещения металлизатора, мм/с* .....

*Скорость продольного маршевого перемещения металлизатора, мм/с* .....

*Дистанция напыления, мм* .....

*Длина рабочего перемещения металлизатора, мм* .....

*Количество точек позиционирования (не менее)* .....

*Давление сжатого воздуха на входе, МПА* .....

*Расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/ч* .....

*Потребляемая мощность, кВА, не более* .....



*Рис. 124. Полуавтомат абразивно-струйной обработки коленчатого вала (а) и размещение коленчатого вала в камере абразивно-струйной обработки (б)*

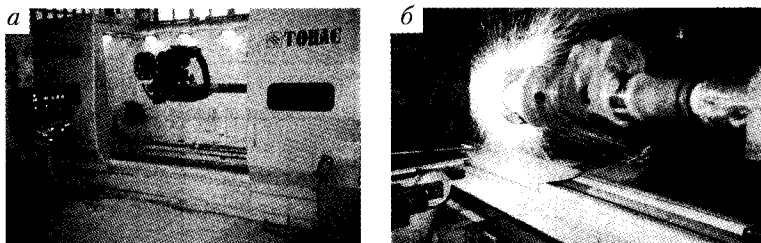


Рис. 125. Полуавтомат ЭДН (а) и процесс напыления коленчатого вала (б)

*Габаритные размеры полуавтомата, мм, не более:*

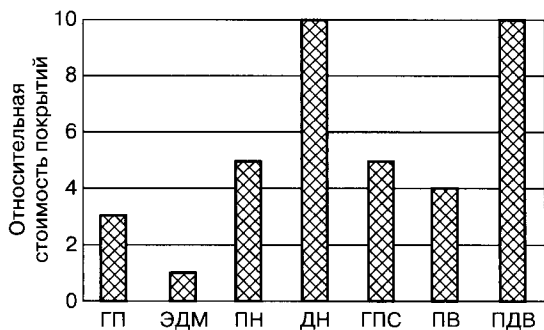
<i>длина</i> .....	4580
<i>ширина</i> .....	5360
<i>высота</i> .....	2600
<i>Масса полуавтомата, кг</i> .....	6670

**Технологии электродугового напыления.** Нанесение покрытий с помощью ЭДН требует проведения предварительных технологических операций, включающих очистку от грязи, влаги и жиров, абразиво-струйную, механическую или другую обработку с целью активации поверхности (создания шероховатости) [189].

Более пятидесяти лет ЭДН используют с целью:

- восстановления изношенных поверхностей деталей, когда деталь еще не потеряла допустимой прочности вследствие определенного дефекта. В таких деталях можно исправлять: наружные и внутренние поверхности, служащие для прессовой и скользящей посадки; наружные и внутренние поверхности, работающие на трение; поверхности с плоскостями разъема; поверхности, работающие на сжатие, кроме тех случаев, когда напыленный слой подвергается резким ударам или сильному нагружению на гранях;
- нанесения износостойких покрытий;
- нанесения антифрикционных покрытий;
- нанесения антикоррозийных покрытий;
- исправления дефектов литья и др.

После ЭДН покрытия могут подвергаться последующей термической обработке, токарной обработке, шлифовке, пропитке лаками [189]. Согласно технико-экономической оценке [190], относительная стоимость покрытий, получаемых ЭДН, в 3–10 раз ниже



*Рис. 126. Относительная стоимость покрытий, получаемых различными способами ГТН (ГП — газопламенное, ПН — плазменное, ДН — детонационное, ГПС — газопламенное сверхзвуковое, ПВ — плазменное высокоскоростное, ПДВ — плазменное в динамическом вакууме, ЭДМ — электродуговая металлизация)*

получаемых другими способами при обеспечении их высокой прочности (рис. 126).

По тепловой эффективности, стоимости большинства напыляемых материалов, производительности и простоте обслуживания электродуговая металлизация предпочтительнее других способов нанесения газотермических покрытий. Эффективный КПД нагрева, т. е. доля тепловой энергии, идущей непосредственно на нагрев и плавление распыляемого материала, при этом составляет в среднем 60%. Низкие тепловые потери обусловлены физическими особенностями процесса. Нагрев и плавление распыляемого материала происходят за счет теплоты электрической дуги, горящей между электродами, из которых образуется распыляемый материал. В других ГТН-процессах генерация теплоты и ее расход на плавление распыляемого материала разделены во времени и пространстве, что обуславливает высокие тепловые потери. В наиболее распространенном процессе плазменного напыления (ПН) эффективный КПД нагрева в несколько раз ниже и составляет 2–27% в зависимости от вида распыляемого материала (проволоки и порошка) и конструкции соплового узла.

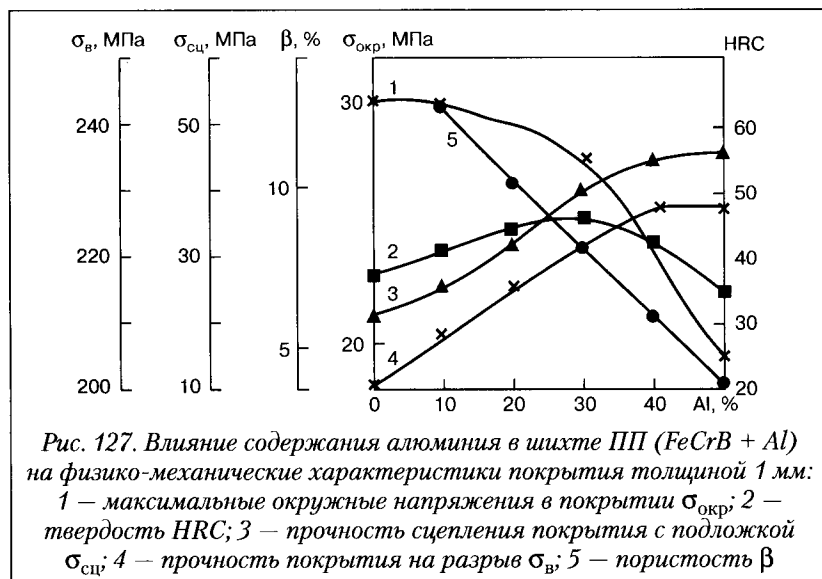
Существующие промышленные технологии ЭДН можно разделить на две группы, в одной из которых в качестве распыляющего газа используют воздух, а в другой — продукты сгорания углеводородов с воздухом. В последнем случае диспергирование расплавленных частиц осуществляют сверхзвуковым газовым потоком.

В качестве напыляющих материалов применяют электродную сварочную и износостойкую наплавочную проволоку (Св-08Г2С, Нп-40, Нп-40Х13, Нп-30ХГСА и др.), а также проволоку из цветных металлов (никеля, цинка, меди и др.) Толщина покрытия составляет от 0,1 мм до нескольких миллиметров. Покрытия могут быть нанесены на детали любой формы (типа тел вращения, плоские) из различных материалов (стали, чугуна, цветных металлов).

К недостаткам процесса ЭДН с использованием воздуха в качестве распыляющего газа относятся повышенное окисление металла и выгорание легирующих элементов, вследствие чего химический состав покрытия значительно отличается от исходного состава. Применение для напыления проволоки с избытком легирующих элементов в определенной мере компенсирует их потери при выгорании.

При нанесении износостойких покрытий широко используют порошковые проволоки различного химического состава. При этом основным критерием пригодности той или иной порошковой проволоки для ЭДН является обеспечение высоких физико-механических характеристик покрытия.

Порошковые проволоки системы FeCrB + Al обеспечивают оптимальный комплекс механических характеристик покрытий за счет введения в шихту алюминия (рис. 127) [186]. Порошок алюми-





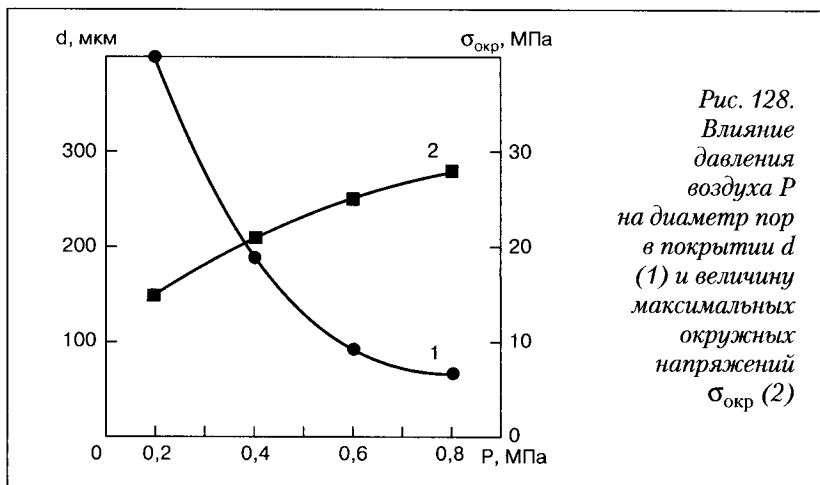


Рис. 128.  
Влияние  
давления  
воздуха  $P$   
на диаметр пор  
в покрытии  $d$   
(1) и величину  
максимальных  
окружных  
напряжений  
 $\sigma_{окр}$  (2)

ния обеспечивает повышение прочности покрытия на разрыв от 180 до 230 МПа, существенно увеличиваются прочность сцепления покрытия с подложкой и твердость. Наличие алюминия в покрытии способствует релаксации напряжений растяжения в процессе формирования покрытия и последующего охлаждения, а также предупреждает образование трещин. Максимальная пористость покрытия не превышает 10%.

В [186] установлено, что при использовании порошковой проволоки большого диаметра одновременно с увеличением твердости покрытия уменьшается его адгезия к подложке. Поэтому при восстановлении ответственных деталей необходимо использовать проволоку диаметром до 2 мм.

Существенное влияние на распределение напряжений в покрытиях имеет также уровень давления воздуха. При его увеличении с 0,2 до 0,7 МПа уменьшается размер частиц расплава проволоки, что в свою очередь обуславливает уменьшение размера пор в покрытии от 400 до 50 мкм (рис. 128) [186].

При формировании покрытий с применением порошковой проволоки с шихтой на основе  $FeCr + Al + C$  с практической точки зрения существенными являются две концентрационные (по содержанию алюминия) области (рис. 129) [186]. При содержании в шихте алюминия до 10% покрытия характеризуются высокой твердостью и низким уровнем остаточных напряжений растяжения, поэтому могут быть использованы как износостойкие. Если содер-

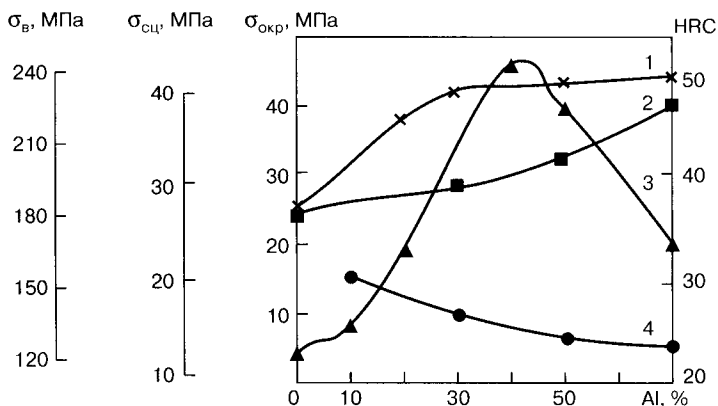


Рис. 129. Влияние содержания алюминия в шихте ПП ( $\text{FeCr} + \text{Al} + \text{C}$ ) на физико-механические характеристики покрытия толщиной 1 мм: 1 — прочность покрытия на разрыв  $\sigma_{\text{в}}$ ; 2 — прочность сцепления покрытия с подложкой  $\sigma_{\text{сц}}$ ; 3 — максимальные окружные напряжения в покрытии  $\sigma_{\text{окр}}$ ; 4 — твердость HRC

жание алюминия составляет свыше 50%, твердость таких напыленных покрытий не превышает 26 HRC, уровень напряжений растяжения около 20 МПа, а прочность сцепления — примерно 40 МПа. В связи с этим их рекомендуют для использования при восстановлении поверхностей ответственных деталей машин.

Рассмотренные выше материалы разработаны для восстановления, как правило, внешних поверхностей деталей типа «вал», работающих в парах с подшипниками скольжения из традиционных материалов. При этом порошковая проволока с шихтой ( $\text{FeCrV} + \text{Al}$ ), которая обеспечивает наиболее высокий комплекс механических характеристик, изготавливается серийно и широко применяется в Украине и за ее пределами для восстановления изношенных шеек коленчатых валов автотракторной техники, локомотивных дизелей, компрессоров, насосных установок [186]. Проволоки с шихтой ( $\text{FeCr} + \text{Al} + \text{C}$ ) используют при восстановлении оборудования, работающих в менее тяжелых условиях.

В работе [191] исследовали влияние состава шихты различных типов порошковых проволок и условий напыления на физико-механические свойства ЭДН покрытий (табл. 106). Эти результаты показывают, что добавки алюминия в шихту на основе феррохрома

**Таблица 106. Физико-механические свойства ЭДН покрытий из порошковой проволоки**

Тип проволоки	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Пористость $\Pi$ , %	Модуль упругости $E$ , $10^{-4}$ МПа	Коэффициент термического расширения $\alpha \cdot 10^6$ , °C <sup>-1</sup>	Прочность сцепления с основой $\delta_{\text{шр}}$ , МПа
Fe-Cr-C	5,81±0,28	7±1,8	7,2	10,8	18,0±1,6
Fe-Cr-C-Al	6,26±0,24	4±0,7	7,8	10,9	20,4±1,4
Fe-B	6,80±0,18	6±1,2	8,0	11,3	23,5±1,5
Fe-B-РЗМ	7,21±0,21	3±0,6	8,4	11,3	26,5±1,4

редкоземельных металлов (РЗМ) и кальция в шихту на основе ферробора снижают пористость покрытий в 1,8 и 2,0 раза.

Установлено также, что увеличение плотности покрытий возможно при увеличении давления воздуха, скорости подачи проволоки, уменьшения дистанции напыления, а для проволоки с шихтой на основе ферробора — при увеличении напряжения дуги и содержания бора в проволоке.

Проведенные исследования показали, что нагрев и охлаждение покрытий сопровождается усадкой, не превышающей 0,15%. Значения коэффициентов термического расширения (КТР) (см. табл. 106) близки к таковым для стали и чугуна, что позволяет наносить покрытия непосредственно на основу без промежуточного слоя. В то же время добавки алюминия и РЗМ не оказывают существенного влияния на величину КТР.

Установлено, что в наружных слоях всех изученных материалов покрытий действуют растягивающие остаточные напряжения, которые при толщине покрытия около 0,5 мм переходят в напряжения сжатия.

В покрытиях, полученных из порошковой проволоки Fe-Cr-C, максимальные значения сжимающих напряжений составляют 115 МПа, а растягивающих — 180 МПа. Добавление алюминия в состав шихты приводит к снижению как сжимающих напряжений на границе «основа-покрытие» (100 МПа), так и растягивающих напряжений на поверхности (150 МПа). При ЭДН порошковой проволоки Fe-B указанные напряжения составляют соответственно 80 и 190 МПа, а с добавками РЗМ и кальция — 115 и 170 МПа.

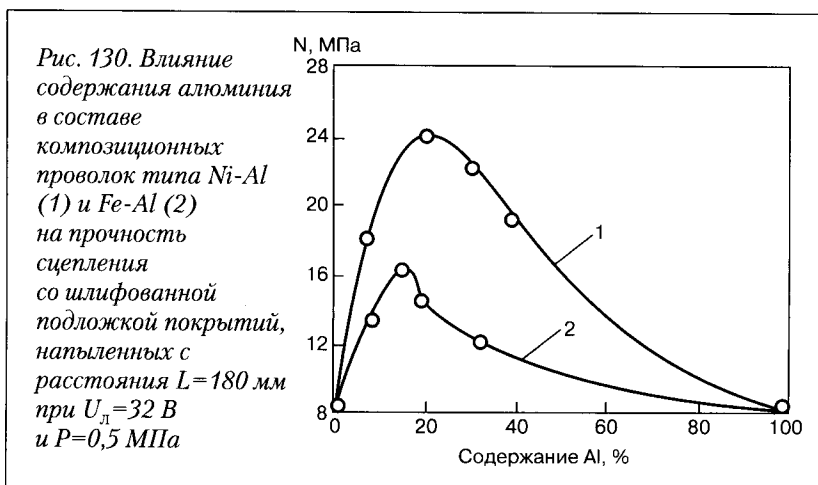
Добавки алюминия в шихту на основе феррохрома, а также РЗМ и кальция в шихту на основе ферробора приводят к повышению прочности покрытий соответственно на 14 и 12%.

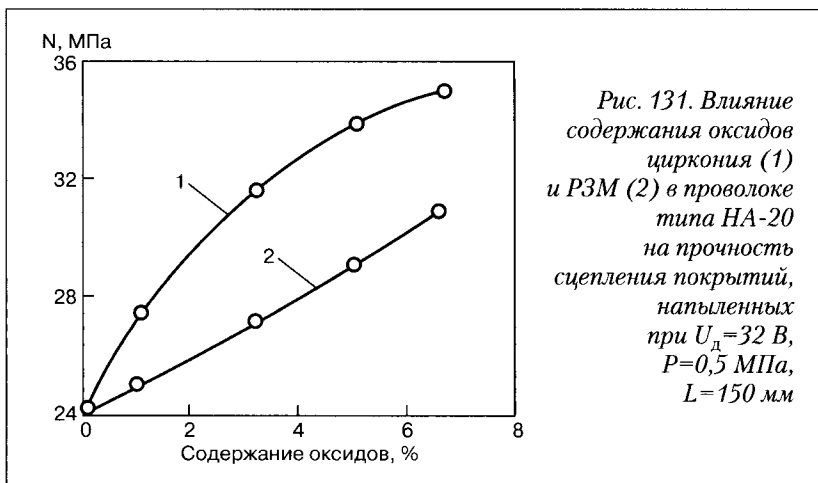
Согласно [191] износостойкость тормозных шкивов трактора ДТ-75, восстановленных ЭДН с использованием порошковой проволоки (Fe-B-PЗМ), в 1,8 раза выше, чем новых, и в 1,4 раза выше, чем напыленных проволокой Св-08Г2С с подачей в зону горения дуги смеси порошков (ПТ-НА-01 + чугунная стружка).

Напыление покрытий, как правило, выполняют в два приема: сначала напыляют подслоя, а затем требуемый сплав. Перед напылением подслоя производят предварительную обработку деталей с целью образования требуемого микрорельефа (активацию поверхности). Однако при восстановлении деталей из отбеленного чугуна, а также закаленных деталей на обрабатываемых поверхностях трудно создать соответствующий микрорельеф. В этих случаях прибегают к использованию напыляемых материалов и технологий, обеспечивающих высокую прочность сцепления.

В работе [192] изучена возможность использования при электродуговом напылении композиционных проволок с никелевой и железной оболочками для нанесения слоев с высокой прочностью сцепления. Оптимальным оказалось использование композиционных проволок диаметром 1,7–1,8 мм. Напыление проводили с применением металлизатора ЭМ-12, подключенного к источнику питания ВС-600. В качестве распыляющего газа использовали воздух, который подавался под давлением.

Установлено [192], что проволоки типа Ni-Al обеспечивают более высокую прочность сцепления по сравнению с Fe-Al (рис. 130).





При этом для покрытий типа Ni-Al максимальное сцепление наблюдается при 18–22% алюминия, а для Fe-Al – при 8–12%.

Исследования показали, что прочность сцепления композиционных покрытий увеличивается с уменьшением напряжения дуги. В то же время при низком напряжении дуги затруднено ее зажигание и ухудшается стабильность горения. Введение в состав сердечника никельалюминиевой проволоки с 20% Al ионизаторов в виде концентрата оксидов РЗМ, содержащего кроме оксида церия (до 50%) оксиды лантана, неодима, празеодима, циркония и гафния, а также циркония в чистом виде улучшает не только стабильность горения дуги, но и увеличивает прочность сцепления (рис. 131).

Применение проволоки на основе железа даже с добавками оксидов циркония и РЗМ дает более низкую прочность сцепления напыленных покрытий.

Положительные результаты по улучшению прочности сцепления покрытий получены при использовании экономно легированных композиционных проволок системы Fe-Al, Fe-Ni-Al и Fe-NiCr-Al путем введения в сердечник железоалюминиевой проволоки составляющих из нихрома Х20Н80 или никеля Нп-2 [192]. Установлено, что введение нихрома способствует более интенсивному росту прочности сцепления, чем введение никеля.

При добавлении 2–6% оксида циркония в сердечник проволоки типа Fe-NiCr-Al прочность сцепления со шлифованной поверхностью достигает 38–45 МПа.

Никельалюминиевые проволоки более технологичны в изготовлении, чем проволоки типа Fe-NiCr-Al.

Предложенные проволоки хорошо себя зарекомендовали при нанесении ЭДН покрытий (без предварительного создания необходимой шероховатости) на валы двигателей внутреннего сгорания и коландровые из отбеленного чугуна, лощильные цилиндры целлюлозно-бумажного производства, на посадочные поверхности с высокой твердостью. После напыления композиционного подслоя толщиной 0,1 мм в зависимости от условий эксплуатации наносят рабочие слои из различных материалов, чаще всего с использованием высокоуглеродистых проволок.

К отличительным особенностям активированной дуговой металлизации (АДМ) относят использование восстановительных смесей в качестве транспортирующего газа, определенное взаимное расположение сопел и электродов, целенаправленное воздействие на зону горения дуги [179, 182, 185, 193].

Аппараты для реализации процесса АДМ обеспечивают меньший в 2–3 раза угол распыла, коэффициент использования материала на уровне 85%, снижение степени окисления стального покрытия с 4,7 до 2,9% и существенное улучшение качества покрытий.

На рис. 132 приведена прочность сцепления покрытий, нанесенных плазменным напылением (ПН) и АДМ, в зависимости от ше-

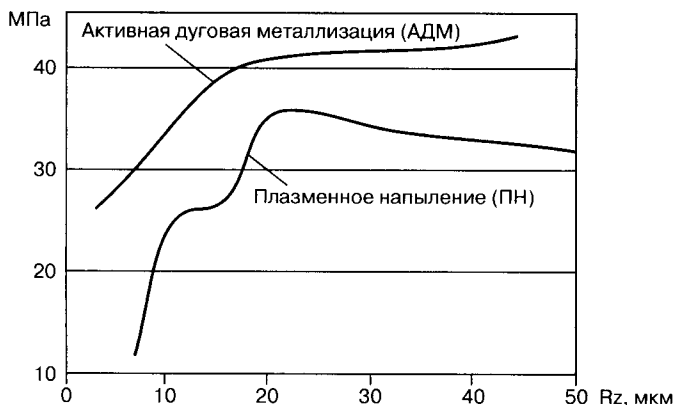


Рис. 132. Прочность сцепления покрытий и шероховатость основы при АДМ (проволока Св-04Х19Н9) и ПН (порошок СНГН 55 состава (%): 16 Cr; 4 Si; 4 В; 4 Fe; Ni — остальное)

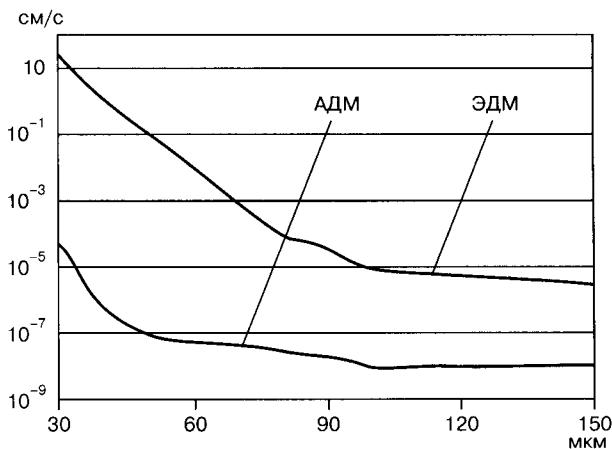


Рис. 133. Зависимость газопроницаемости от толщины покрытия (проволока Св-04Х19Н9, дистанция напыления 100 мм, сила тока 180 А, напряжение 30 В)

роховатости поверхности. Эти данные свидетельствуют о примерно равноценном качестве ПН- и АДМ-покрытий [193].

Газопроницаемость АДМ-покрытий на два порядка ниже, чем у обычных ЭДМ-покрытий (рис. 133) [193]. Эти данные говорят о том, что при уменьшенной толщине АДМ-покрытия аналогичны по эксплуатационным характеристикам ЭДМ-покрытиям, что позволяет снизить трудоемкость и расход материала.

АДМ-процесс используют для восстановления цилиндрических и плоских поверхностей, нанесения антикоррозионных покрытий.

Сверхзвуковое ЭДН с использованием в качестве распыляющего газа продуктов сгорания природного газа с воздухом обеспечивает газодинамическое обжатие металлопотока, способствует снижению рассеивания дисперсной фазы [184]. Угол раскрытия составляет 7–10°. При этом центральный и боковой электроды в металллизаторе (см. рис. 123) работают в разных условиях. Центральный электрод плавится под действием теплоты прикатодного (прианодного) участка дуги с подогревом проволоки на длине вылета за направляющим мундштуком горячими продуктами сгорания, а боковой — под действием тепла от дуговой плазмы и прианодного (прикатодного) падения потенциала. Следовательно, боковая проволока воспринимает больше тепла и скорость ее плавления больше

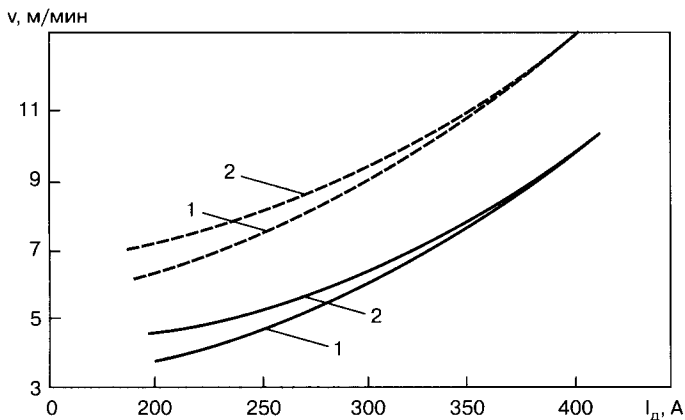


Рис. 134. Зависимость скорости подачи проволоки (12X18H10T,  $\varnothing 1,6$  мм) от тока дуги: 1 — обдувающий газ — воздух; 2 — обдувающий газ — горячие продукты сгорания; сплошные кривые — центральная проволока; штриховые — боковая

центральной. Силу тока (при питании от источника с жесткой внешней характеристикой) задают скоростью подачи центральной проволоки. Скорость подачи боковой проволоки выбирают таким образом, чтобы ее конец плавился на линии продолжения верхней поверхности центральной проволоки. При таком характере плавления боковой проволоки обеспечивается минимальная пульсация тока и напряжение дуги, равномерное и стабильное плавление проволоки, наиболее узкий диапазон диспергирования расплава, наименьший угол раскрытия металлопотока.

На рис. 134 представлена зависимость скорости подачи центральной и боковой проволоки из стали 12X18H10T диаметром 1,6 мм от тока дуги [184].

При больших значениях силы тока вклад дополнительной теплоты продуктов сгорания практически не ощущается вследствие высокой скорости подачи проволоки.

Согласно [184] сверхзвуковая головка обеспечивает фокусировку металло-газового потока с углом раскрытия  $10-12^\circ$  и позволяет получить качественные покрытия, повышенную прочность сцепления и пониженную пористость (табл. 107).

При сверхзвуковом напылении продуктами сгорания углеводородов с воздухом появляется еще один легко регулируемый пара-



**Таблица 107. Параметры процесса сверхзвукового напыления и свойства покрытия из нержавеющей стали**

Обдувающий газ	Сила тока дуги, А	Дистанция напыления, мм	Скорость полета частиц, м/с	Прочность сцепления, МПа	Пористость, %	Микротвердость фазы, МПа	
						светлая	темная
Воздух, $\alpha = \infty$	220	300	110	24	10,0	245...350	450...530
Продукты сгорания:							
$\alpha = 1,2$	180	300	110	34	3,2	325...380	510...570
$\alpha = 0,8$	180	300	90	35	2,8	210...230	400...700
$\alpha = 0,8$	180	150	120	39	3,6	200...280	590...700
* Производительность во всех случаях была одинакова и составляла 9,5 кг/ч.							

метр — соотношение горючего газа и воздуха. Это расширяет технологические возможности процесса и позволяет целенаправленно управлять структурой покрытия. При этом прочность сцепления стальных покрытий из порошковых проволок со стальной основой возрастает с 25–30 до 40–60 МПа, пористость покрытия снижается с 15–20 до 2,0–3,5%, окисленность материала покрытия снижается в два раза, изменяется структура покрытия — она состоит из более мелких lamel с повышенной на 10–15% микротвердостью в результате высокоскоростной закалки стали [184].

При отработке технологии восстановления коленчатых валов было установлено (табл. 108), что сверхзвуковая электродуговая металлизация является оптимальным технологическим процессом напыления шеек коленчатых валов [184].

**Таблица 108. Свойства покрытий из порошковой проволоки**

Способ нанесения покрытия	Пористость, %	Твердость, HRC	Микротвердость фазы, МПа		Прочность сцепления, МПа
			светлая	темная	
Сверхзвуковая электродуговая металлизация	2...3	35...37	1200	16000	65
Плазменное напыление	6...8	28...30	1000	13000	50
Типовая электродуговая металлизация	10...12	22...25	900	11000	35

Опыт многолетней эксплуатации восстановленных по этой технологии тяжело нагруженных коленчатых валов показал, что срок службы восстановленных шеек валов больше новых в два раза, причем в экстремальных и аварийных ситуациях (прекращение подачи масла, наличие абразивных частиц) покрытие оказывается более стойким, чем основной материал коленчатого вала.

## 2.5. Электродуговая резка

Удаление металла по заданной линии или объему посредством нагрева электрической дугой — это совокупность способов электродуговой резки. Получили промышленное применение несколько разновидностей электродуговой резки металлов:

- дуговая резка металлическими электродами;
- кислородно-дуговая резка трубчатым металлическим электродом;
- воздушно-дуговая резка.

**При дуговой резке металлическим электродом** применяют преимущественно стальные обмазанные электроды [194]. Резка может быть выполнена обычными сварочными электродами. Обычно при резке металлическим электродом сила тока на 20–30% больше, чем при сварке электродами такого же диаметра. Однако с целью улучшения качества реза и производительности резки предпочтительнее следует отдавать специальным электродам для резки [195, 196]. В покрытия таких электродов вводят компоненты, являющиеся активными окислителями или выделяющие большое количество газов. Чтобы получить твердый «козырек» на конце электрода, в обмазку добавляют керамику и другие компоненты.

Производительность резки металлическим электродом определяется мощностью дугового разряда, которую можно повысить, применяя специальное покрытие стержня, функции которого сводятся к увеличению втулки, образующейся при горении дуги, а также исключению возможности его отслоения при предельно допустимой силе тока. Так, для электродов марки ОЗР-1 диаметром 4 мм максимально допустимая сила тока составляет 300 А, что существенно превышает силу тока для электродов данного диаметра, используемых при сварке (*табл. 109*) [194]. Это обусловлено повышенной термостойкостью покрытия на электродах ОРЗ-1 из-за большого количества кварцевого песка в их покрытии [196]. Для

**Таблица 109. Режимы ручной электрической дуговой резки стали металлическим электродом**

Разрезаемый материал	Толщина, мм	Диаметр электрода, мм	Режимы сварки		Разрезаемый материал	Толщина, мм	Диаметр электрода, мм	Режимы резки	
			сила тока, А	скорость, м/ч				сила тока, А	скорость, м/ч
Низкоуглеродистая сталь	6	2,5	140	12,36	Нержавеющая сталь	6	2,5	130	12
	12			7,2		12			4,38
	25			2,1		25			3
	6	3,0	190	13,8		6	3,0	195	18,72
	12			8,1		12			8,7
	25			3,78		25			4,5
	6	4,0	220	15		6	4,0	220	18,9
	12			9,3		12			10,2
	25			4,5		25			5,4
	6	5,0	325	20,4		6	5,0	300	18,9
	12			12,9		12			11,4
	25			6,9		25			6,72

электродов ОЗР-1 диаметром 6 мм разница еще больше — предельно допустимая сила тока 700–750 А.

Металлическим покрытым электродом можно резать на постоянном и переменном токе углеродистые и низколегированные стали, чугун, нержавеющие стали и цветные металлы, которые не поддаются обычной кислородной резке.

При разделительной резке конец электрода перемещают в полость реза от верхних кромок к нижним и обратно, направляя дугу на его лобовую стенку. Основные недостатки этого способа резки — низкая производительность и плохое качество реза. Рез получается с большими неровностями и натеками металла с обратной стороны.

Технологию дуговой резки штучными металлическими электродами используют при выполнении ремонтных и строительно-монтажных работ, в том числе под водой.

Для подводной резки разработана также технология **дуговой резки порошковой проволокой** (РПП) [197, 198]. В отличие от резки штучными электродами порошковая проволока подается непре-

рывно, а ее сердечник содержит газообразующие и стабилизирующие горение дуги компоненты. При этом газоплазменная струя расплавляет, окисляет и удаляет жидкий металл из полости реза. Различие между процессом РПП и резкой штучными металлическими электродами состоит в следующем:

- диаметр порошковой проволоки 2,0–3,0 мм (электродного стержня 4–5 мм);
- диапазон силы тока при резке порошковой проволокой — 400–1000 А (при резке электродами 280–420 А);
- напряжение дуги изменяется в пределах от 35 до 50 В (при резке электродами от 27 до 35 В);
- газовый поток, образующийся при диссоциации компонентов шихты, формируется в центральной зоне реза, а не в периферийной, как при резке электродами.

Таким образом, с энергетической точки зрения процесс РПП более эффективен, так как в меньшем объеме выделяется большее количество энергии, эквивалентное 15–50 кВт.

Установлено [197, 198], что в процессе РПП торец проволоки находится в основном в полости реза, где перемещается вслед за удаляющейся дугой до момента критического сближения боковой поверхности с кромками реза. Затем дуга переходит в новый, более короткий межэлектродный промежуток. Оболочка порошковой проволоки прожигается, и дуга вновь переходит в межэлектродный промежуток «торец проволоки — жидкий металл» по линии оси проволоки.

Степень погружения торца порошковой проволоки в полость реза возрастает с увеличением толщины разрезаемого металла, скорости подачи порошковой проволоки, ростом гидростатического давления и снижением напряжения дуги. Форму реза определяет степень погружения торца порошковой проволоки в полость реза (чем больше погружение, тем уже рез в области верхних кромок).

Глубина погружения в воду разрезаемых изделий оказывает существенное влияние на электрические параметры РПП. Показано [197, 198], что увеличение гидростатического давления в интервале 0,1–0,6 МПа нарушает стабильность горения дуги и снижает ее прорезающую способность. С увеличением глубины погружения изделия в воду скорость резки снижается (*рис. 135*). При этом оптимальные значения напряжения дуги, характерные для максимальной производительности, увеличиваются на 0,1–0,15 В/м (*рис. 136*).

Для выполнения РПП был разработан ряд порошковых проволок диаметром 2,0–2,4 мм оригинального состава. Режимы резки

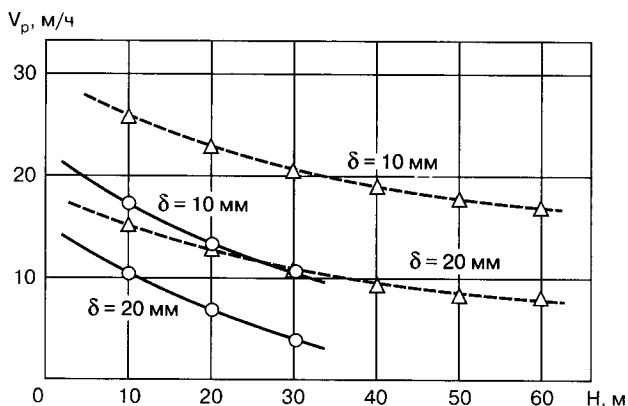


Рис. 135. Зависимость скорости реза  $V_p$  от глубины погружения  $H$  (порошковая проволока марки ППР-АНЗ):  $I_p = 400 \dots 530$  А;  $U_d = 42 \dots 50$  В; сплошная линия —  $d_{др} = 2,0$  мм; штриховая —  $d_{др} = 2,4$  мм

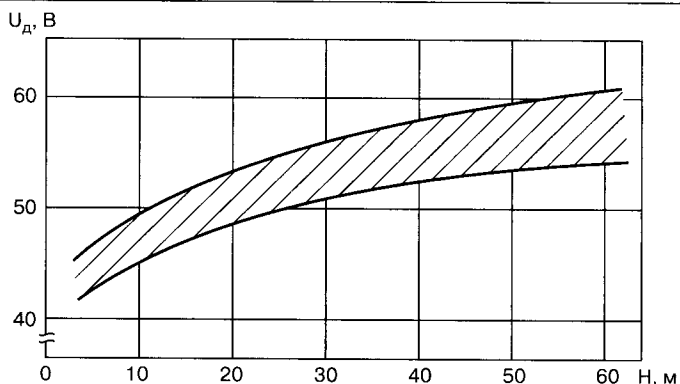


Рис. 136. Область оптимальных значений напряжения  $U_d$  на дуге при разных глубинах погружения  $H$  (порошковая проволока ППР-АНЗ):  $I_p = 400 \dots 530$  А;  $d_{др} = 2,0 \dots 2,4$  мм

этим проволоками углеродистых и низколегированных сталей приведены в табл. 110.

Вылет электрода при резке (расстояние от изделия до токоподводящего наконечника) должен быть в пределах 10–30 мм.

Существенное влияние на скорость резки оказывает пространственное положение металлоконструкции. Наибольшей скорости

<i>Марка проволоки</i>	<i>Максимальная рабочая глубина, м</i>	<i>Толщина металла, мм</i>	<i>Сила тока, А</i>	<i>Напряжение дуги, В</i>	<i>Скорость резки, м/с (м/ч)</i>
ППР-АН1	30	10–20	530–600	50–55	0,0022–0,0055 (8–20)
ППР-АН2	30	10–20	470–580	40–50	0,0022–0,0067 (8–24)
ППР-АН3	60	10–40	440–550	40–55	0,00167–0,0072 (6–26)
ППР-ЭК3	60	10–40	450–550	40–55	0,00167–0,0061 (6–22)

достигают при резке на вертикальной плоскости в направлении сверху вниз. В нижнем положении скорость на 10–15%, а в потолочном на 15–20% ниже, чем в вертикальном. Скорость резки в морской воде на 10–20% ниже, чем в пресной.

Угол наклона проволоки к разрезаемой поверхности 5–30° (углом вперед). Ширина реза по верхним кромкам 4–6, а по нижним — 7–9 мм.

Процесс РПП используют для разделения металлоконструкций, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, чугуна, нержавеющей сталей, алюминия, меди и сплавов на их основе.

При **кислородно-дуговой резке трубчатым металлическим электродом** предварительный нагрев разрезаемого металла осуществляют дугой, горячей между трубчатым покрытым электродом и изделием. Подогретый до температуры воспламенения металл сгорает в струе кислорода, подаваемой по трубчатому электроду [197].

Расход кислорода, проходящего через продольный канал в электроде, зависит от глубины выполнения подводных работ, длины электрода, сопротивления в держателе и давления на выходе из редуктора.

Кислородно-дуговая резка трубчатым металлическим электродом в настоящее время является наиболее употребляемым способом при разделении под водой металлоконструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной до 110 мм [197].

Средняя производительность резки металла толщиной 16 мм на глубине 10 м с учетом подготовительно-заключительного времени (замена электрода и перемещение водолаза) электродом АНР-Т8 составляет 4–6 м/ч.

К недостаткам кислородно-дуговой резки относят:

- высокие требования к подготовке водоплава-резчика;
- частый выход резака из строя при плохой подготовке электрода или неплотном его контакте с токоподводящим элементом (образуется дуга между зажимной цангой и непокрытой частью электрода).

Сущность **воздушно-дуговой резки** состоит в том, что металл расплавляют теплом электрической дуги, а затем выдувают из места реза струей сжатого воздуха [134].

Резку производят омедненными угольными или графитированными электродами круглого, квадратного или прямоугольного сечения. Пластинчатые (прямоугольные) электроды используют только для поверхностной резки.

Воздушно-дуговая резка служит преимущественно для поверхностной обработки, но может быть использована и как разделительная. При поверхностной резке (рис. 137) закрепленный в резачке электрод (рабочий вылет 100–120 мм) направляют под углом  $30^\circ$ – $45^\circ$  в точку начала реза и, сохраняя его положение, перемещают по линии реза, углубив конец электрода в образующуюся канавку. Направленный вдоль электрода воздушный поток выбрасывает расплавленный металл вперед и частично в стороны. Вдоль кромок канавки может откладываться небольшое количество застывших шлаков, легко удаляемых по окончании реза.

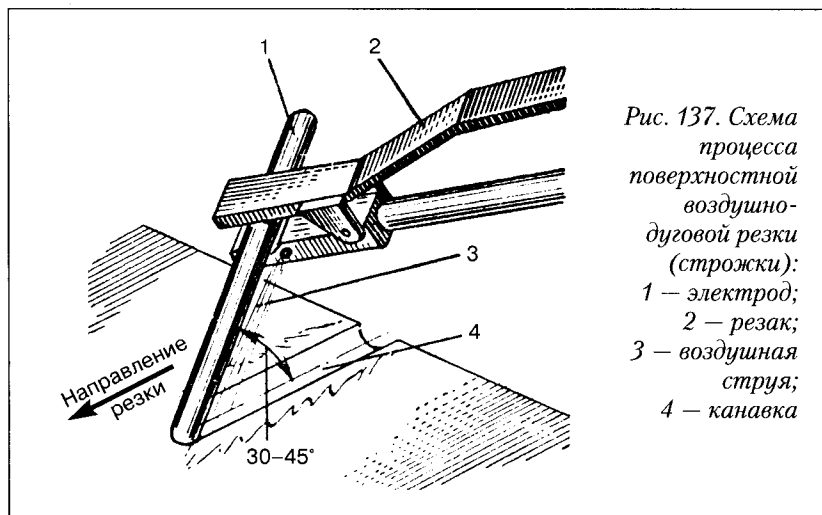
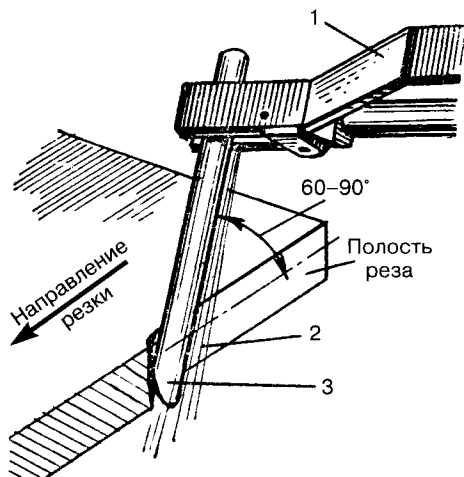


Рис. 138. Схема процесса разделительной воздушно-дуговой резки:

- 1 — резак;  
2 — воздушная струя;  
3 — электрод

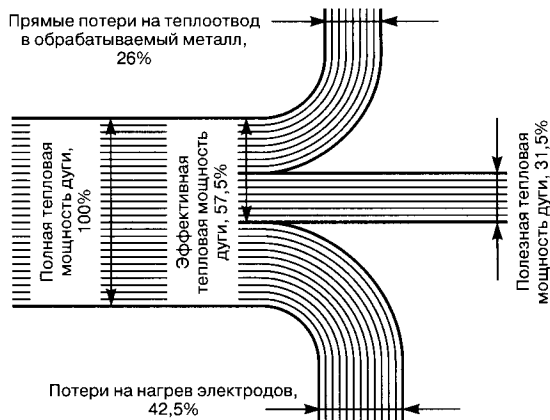


При разделительной резке (рис. 138) электрод углубляют на всю толщину разрезаемого металла. Удерживая его под углом  $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$  и перемещая вдоль линии резки, получают сквозной разрез. При резке металла большой толщины конец электрода перемещают внутри полости пилообразно, от верхней кромки к нижней и наоборот. Продукты резки выдуваются сквозь образующуюся полость.

Примерная схема распределения тепловой мощности дуги при воздушно-дуговой резке приведена на рис. 139 [200]. Около 43%

Рис. 139. Примерный тепловой баланс дуги при воздушно-дуговой резке.

Диаметр электрода 10 мм;  
 $V=460$  мм/мин;  
 $I=360$  А;  
 $U_{д}=48$  В





энергии дуги расходуется на нагрев электрода и воздушного потока. Примерно третья часть тепловой мощности затрачивается на выплавление металла по линии реза. Остальная часть тепловой мощности (около 26%) поглощается обрабатываемым металлом.

Эффективная тепловая мощность дуги, т. е. количество теплоты, введенное в металл за единицу времени, соответствует примерно 57%, что сопоставимо с эффективностью дуговой сварки угольным электродом. Термический к.п.д. процесса, т. е. доля эффективной тепловой мощности дуги, расходуемая на расплавление металла за единицу времени, достигает 0,5–0,55.

Воздушно-дуговую резку стали производят на постоянном токе обратной полярности, а при обработке цветных металлов используют прямую полярность. При обработке чугуна используют переменный ток и постоянный ток прямой полярности.

Эффективность поверхностной воздушно-дуговой резки определяется интенсивностью выплавления металла  $g$ , которая зависит от силы тока  $I$  и может быть представлена упрощенным выражением

$$g = k_B \cdot I,$$

где  $k_B$  — коэффициент выплавления, г/А·ч.

Изменение коэффициента выплавления при воздушно-дуговой резке стали на постоянном (обратной полярности) и переменном токе различной величины представлено на рис. 140 [200].

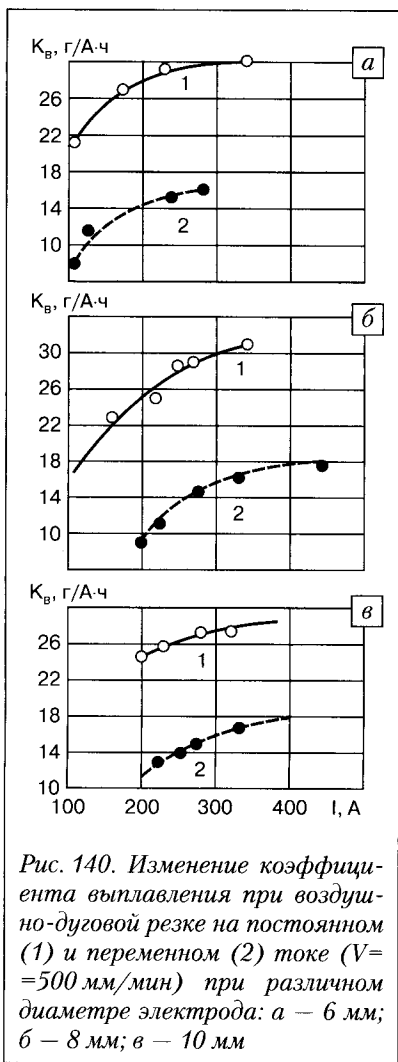


Рис. 140. Изменение коэффициента выплавления при воздушно-дуговой резке на постоянном (1) и переменном (2) токе ( $V = 500$  мм/мин) при различном диаметре электрода: а — 6 мм; б — 8 мм; в — 10 мм

Установлено также, что при резке на постоянном токе коэффициент выплавления  $k_b$  снижается с увеличением диаметра электрода и повышается с ростом скорости резки.

Высокую эффективность воздушно-дуговой резки на переменном токе при обработке чугуна отмечают в [199]. Переменный ток позволяет интенсифицировать процесс удаления металла из полости реза за счет большей подвижности расплава. Кроме того, время контакта расплава с основным металлом при воздушно-дуговой резке чугуна на переменном токе значительно меньше, следовательно, термическое и химическое воздействие на основной металл также уменьшается. При использовании переменного тока силой 700–1400 А процесс резки идет устойчиво, ванна расплавленного металла наиболее подвижна, поэтому продукты расплава не перегреваются, удаляются полностью и без задержек, а это препятствует передаче тепла вглубь металла.

О влиянии струи сжатого воздуха на характеристики резки можно судить по сравнительным данным, полученным И. С. Шапиро (табл. 111), по результатам использования при дуговой резке электродом диаметром 6 мм различных рабочих газов: кислорода, воздуха, аргона и азота.

Как видно из табл. 111, при использовании кислорода продукты резки получаются несколько более окисленными, однако производительность резки практически не различается для разных газов. Газовая струя оказывает в основном механическое воздействие на расплавленный металл, способствуя его удалению из полости реза, в то время как термическое воздействие газовой струи незначительно и практически не зависит от химической активности применяемого газа. Это указывает на электротермическую сущность

**Таблица 111. Влияние применяемого газа на содержание продуктов расплава и производительность резки**

Применяемый газ	Режим резки		Содержание продуктов расплава, % по массе			Производительность резки, кг/ч
	сила тока, А	скорость резки, мм/мин	Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Кислород	200	580	70,1	15,4	14,5	6,28
Воздух	190	570	80,3	7,9	11,8	6,20
Азот	200	580	80,2	8,5	11,3	6,22
Аргон	200	570	81,0	7,7	11,3	6,23

воздушно-дуговой резки, при которой функция применяемого газа ограничивается механическим удалением расплавленного металла из полости реза.

Хотя состав применяемого газа и не оказывает существенного влияния на производительность процесса, но он сильно влияет на скорость сгорания угольного электрода. Так, если расход электродов при резке с подачей азота на рабочем режиме (сила тока 300 А, диаметр электрода 6 мм, расход газа 18 м<sup>3</sup>/ч) принять за 100%, то при резке с подачей сжатого воздуха на том же режиме расход электродов равен 120%, а при подаче кислорода — 160% [199].

Следует отметить, что расход электродов при воздушно-дуговой резке обусловлен двумя основными факторами: выделением теплоты на торцевой поверхности электрода, а также окислением и эрозионным износом боковой поверхности стержня воздушной струей.

Теплота дуги приводит к сублимации материала электрода с торца, и электрод укорачивается (сгорает). Окисление и воздушная эрозия приводят к заострению конца электрода. Так как сублимация материала электрода практически происходит за счет теплоты, выделяемой в активном пятне на торце электрода, то интенсивность сгорания электрода определяется в основном плотностью тока в электроде и его полярностью. Разновидность углеродистого материала, его плотность и зернистость также сказываются на скорости сгорания электрода, но в меньшей мере. Так, по данным В. И. Рыбакова и П. С. Карпеченко, при применении более плотных и мелкозернистых графитированных материалов интенсивность сгорания снижается по сравнению со сварочными углями до 47%, но для самих же графитированных электродов колебания менее значительны (1,18–1,34 г/А·ч).

Окисление с боковой поверхности и эрозионный износ, вызванные воздушной струей, зависят от температуры нагрева электрода — в основном за счет прохождения тока по его вылету из электрододержателя и теплопередачи из активного пятна.

Для защиты боковой поверхности электрода от окисления и эрозионного износа наибольшее распространение получило медное покрытие. Такое покрытие эффективно при работе на малых и средних токах, когда электрод нагревается до температуры 400–800°С [200]. Подобный нагрев не вызывает отслаивания покрытия и не приводит к его расплавлению. При работе на больших токах, свыше 1000 А, когда электрод накаляется до температуры 1200°С, медное покрытие начинает плавиться и стекает в зону реза.

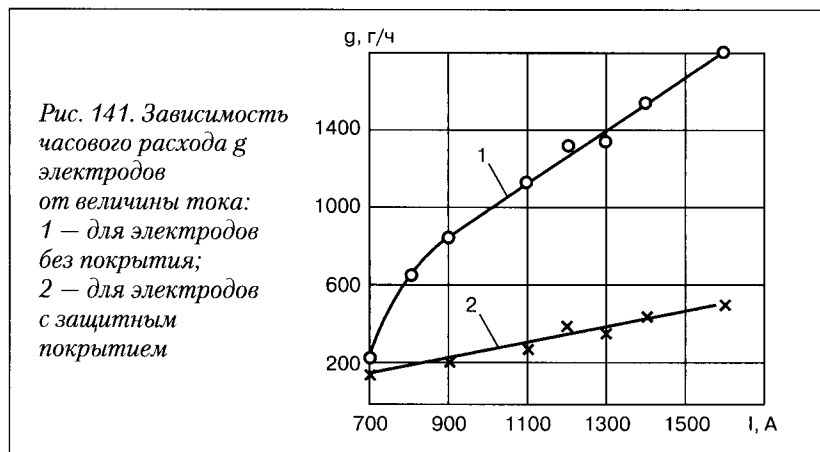
Рез получается омедненным, золотистого цвета. В этом случае медное покрытие не выполняет никаких защитных функций, а вызывает засорение медью основного металла.

Покрытие из стали имеет температуру выше, чем температура нагрева электрода, однако оно недостаточно стойко против окисления при высокой температуре, поэтому интенсивно окисляется потоком воздуха и быстро сгорает.

Разработанные для воздушно-дуговой резки электроды с покрытием из смесей окиси алюминия с чистым алюминием обеспечивают устойчивую работу на силе тока свыше 1000 А [199]. Защитное покрытие из указанной смеси наносят способом плазменного напыления.

Установлено [199], что часовой расход электродов с защитным покрытием 50%  $Al_2O_3$  + 50% Al значительно меньше, чем расход электродов без покрытия (рис. 141). Увеличение расхода покрытых электродов при увеличении силы тока происходит менее резко, чем расход электродов без покрытия.

При воздушно-дуговой резке и строжке происходит науглероживание обрабатываемой поверхности. При этом содержание углерода в металле поверхности реза глубиной 0,06–0,08 мм может повыситься до 0,5–1%. Чем выше скорость резки, тем больше науглероживание. Для уменьшения степени науглероживания кромок необходимо производить резку в диапазоне умеренных скоростей при давлении сжатого воздуха 0,25–0,30 МПа. В [199] при воздушно-дуговой резке на постоянном токе обратной полярности получено науг-



лероживание поверхности реза: сталь Ст3 — на 0,11–0,19%, сталь 20 — на 0,13%, чугун С4 28–48 — на 0,15–0,24%. Отмечают также, что науглероживания при резке на переменном токе не происходит. Это объясняют действием трех основных факторов: меньшей почти в 2 раза науглероживающей способностью угольной дуги переменного тока по сравнению с дугой постоянного тока обратной полярности; кратковременностью контакта расплавленного металла с изделием (2–3 мс); окисляющим действием струи сжатого воздуха.

Как правило, тонкий науглероженный слой не ухудшает свойств сварных соединений деталей после воздушно-дуговой резки. Тем не менее, при воздушно-дуговой обработке низколегированных и особенно низколегированных высокопрочных сталей с целью удаления корневого слоя или дефективных мест сварных соединений с последующим наложением швов необходимо удалять науглероженный слой механической резкой (строжкой, фрезерованием, шлифовкой).

Окисляющее воздействие интенсивного потока сжатого воздуха, удаляющего расплавленный металл из полости реза, сказывается на распределении некоторых легирующих элементов в поверхностном слое реза. Так, например, обнаружено, что кремний и марганец выгорают с поверхности на глубину 0,1 мм при воздушно-дуговой резке чугуна и стали [199]. Выгорания хрома и никеля не происходит.

Рекомендуемые значения силы тока при воздушно-дуговой обработке приведены в *табл. 112*.

<b>Таблица 112. Рекомендуемые значения силы тока при воздушно-дуговой строжке</b>					
<i>Диаметр, мм</i>	<i>Длина, мм</i>	<i>Сила тока, А</i>	<i>Диаметр, мм</i>	<i>Длина, мм</i>	<i>Сила тока, А</i>
Строжка на постоянном токе			Строжка на переменном токе		
4	355	180	6	355	250
6		220	8		400
8		350	10		600
10		500	12		700
12		600	14		800
14		700	16		900
16		800			
18		900			

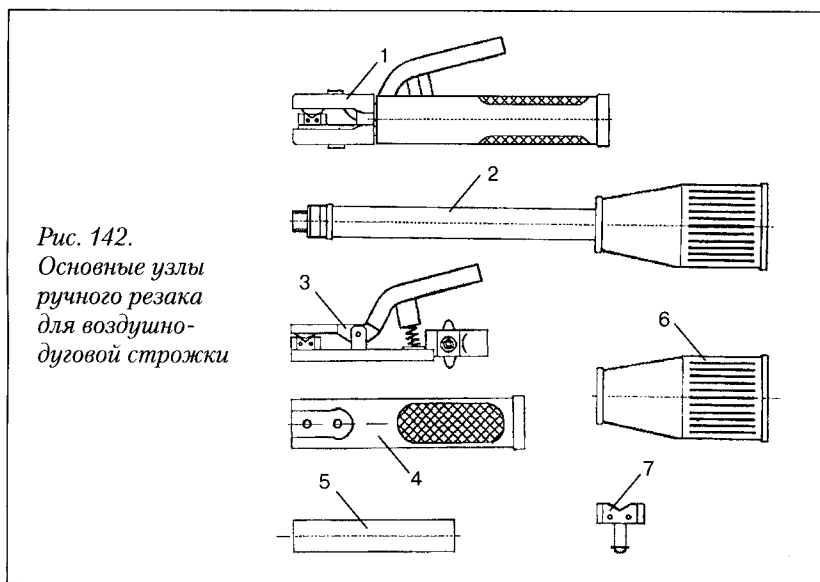


Рис. 142.  
Основные узлы  
ручного резака  
для воздушно-  
дуговой строжки

С позиций производительности резки оптимальным является давление воздуха 0,5–0,7 МПа при расходе 600–3000 л/мин. Сжатый воздух должен быть очищен от воды и масла, в этом случае достигается хорошая чистота поверхности реза и полное удаление металла из зоны обработки.

Для воздушно-дуговой обработки угольным электродом используют специальные резаки. Основные узлы ручного резака для воздушно-дуговой обработки представлены на рис. 142 [201]. Резак состоит из держателя 1 для контактного закрепления электрода, снабженного каналом для подачи струй сжатого воздуха в зону режущей дуги, и специального полого кабеля 2. С помощью разъема полый кабель подсоединяют к сварочному кабелю и пневматическому шлангу. Основные части воздушно-дугового резака: головка 3 с контактным зажимным и сопловым устройствами, рукоятка 4, специальный шланг 5, узел 6 крепления токо- и воздухоподводящих коммуникаций.

Фирма «Абикор Бинцель» предлагает три модификации держателей для воздушно-дуговой строжки круглыми угольными электродами [201].

Для удаления с отливок остатков литниковой системы, приливов, заливов, перекосов, неровностей применяют специальные ре-

заки, позволяющие вести обработку электродами прямоугольного сечения [192]. Большую сторону поперечного сечения располагают перпендикулярно направлению поверхностной воздушно-дуговой резки, выполняемой углом вперед при подаче струи сжатого воздуха параллельно боковой поверхности электрода.

Воздушно-дуговую строжку обычно осуществляют от серийных сварочных источников с силой тока от 500 до 1000 А, имеющих крутопадающую внешнюю характеристику. Напряжение холостого хода источника должно быть не менее 60 В, в этом случае обеспечивается легкое зажигание дуги и ее стабильное горение.

Резку следует начинать с проверки режимов, для чего перед началом зажигания дуги необходимо включить воздух, затем зажечь дугу и сделать пробный рез с целью регулировки тока и контроля качества реза. Расплавленный металл должен быть полностью удален из зоны дуги. Наличие застывшего расплава на поверхности реза свидетельствует о недостаточной интенсивности воздушной струи, что недопустимо, так как при этом значительно увеличивается глубина зоны повышенной твердости, препятствующей последующей механической обработке. Угол наклона электрода относительно детали следует выдерживать в пределах 30–60°. В этом случае наблюдается наиболее полное удаление продуктов расплава из зоны реза.

При снятии тонких слоев (3–5 мм) удобнее работать при угле наклона электрода 15–30° без ущерба для интенсивности удаления расплавленного металла.

При необходимости удаления металла у кромки изделия необходимо использовать специальные приемы. В этих случаях резаку следует придавать положение, при котором струя воздуха не отсекалась бы кромкой, попадая в зону дуги.

Необходимо следить за давлением воздуха в сети, полное удаление расплава из полости реза обеспечивается при давлении более 0,4 МПа.

При удалении металла со значительной площади используют строжку параллельными проходами.

Поверхностную воздушно-дуговую резку используют при удалении корня шва, дефектных участков сварных швов, обработке отливок.

Рациональный подбор технологического оборудования, источников питания, электродов и использование комплексных рабочих мест с системами местной вентиляции гарантируют высокую эффективность воздушно-дуговой резки.

---

## Глава 3.

# Плазменные технологии

Низкотемпературная плазма, представляющая собой ионизированный газ, генерируемый плазмотронами, находит широкое применение в различных областях современной науки и техники. включая плазмохимию (плазменно-водородное восстановление и плазменный синтез в химически активных средах при получении порошков), переплавку металлов, сварочное производство (резка, сварка, наплавка и напыление) и др.

Академик Б.Е. Патон отметил: «По плотности энергии плазменный источник находится в промежуточном, но наиболее выгодном положении между электродуговыми и лучевыми (электронно-лучевыми и лазерными) источниками теплоты. Он позволяет получить более высокую температуру и плотность теплового потока на обрабатываемом изделии по сравнению с температурой и плотностью, которые получают от дуговых источников, и хотя уступает дуговому по концентрации энергии, но значительно дешевле и доступнее их по техническому воплощению».

Плазменные источники обеспечивают плотность мощности  $10^4$ – $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, т. е. меньше, чем электронный и лазерный лучи, но их единичная мощность может достигать 160 кВт и более, а эффективный КПД нагрева — 0,72.

Оборудование для выполнения работ с помощью плазмы по стоимости и сложности изготовления вполне сопоставимо с оборудованием для электродуговой сварки, наплавки и т. д. Его широко применяют для резки, наплавки, напыления, сварки и более ограничено — для упрочнения.

В отличие от «горячей» термоядерной плазмы, температура которой достигает десятков миллионов градусов, температура низкотемпературной плазмы (плазма газового разряда) в зависимости от состава среды от 2000–3000°С (с добавками щелочных металлов) до 40 000–50 000°С (дуга, стабилизированная водяным вихрем) [135]. В дугах средней мощности (сила тока до 1000–1500 А), ста-



билизованных потоком газа (аргон, азот, кислород, водород), плазма обычно имеет температуру 5000–20 000 °С.

Плазменные струи получают в специальных устройствах, которые называют плазмотронами или плазменными горелками.

В промышленной практике находят применение главным образом дуговые плазмотроны постоянного тока. Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазмотрона.

В инженерной практике применяют дуговые плазмотроны, выполненные по двум схемам:

1. Плазмотроны для обработки плазменной дугой (прямого действия), в которых одним из электродов является обрабатываемый материал (сварка, резка). В этом случае используют два энергетических источника: плазменную струю и электрически активное пятно дуги. Внутренний КПД такого плазмотрона, т.е. использование подведенной к нему электрической энергии, достигает 60–80%.

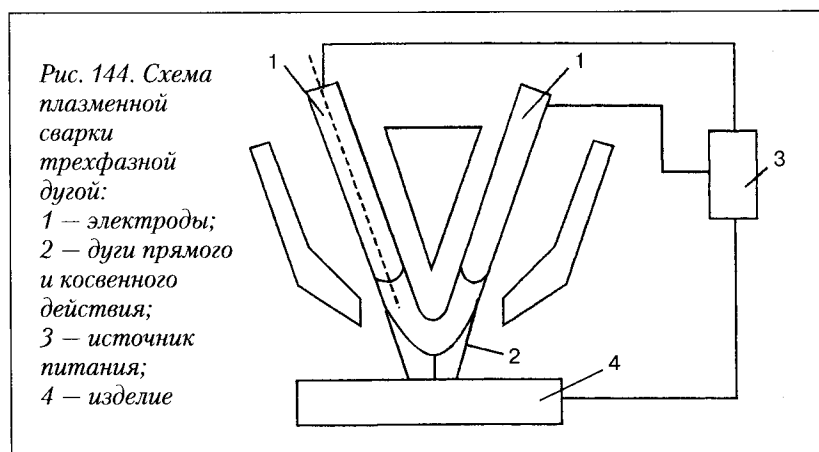
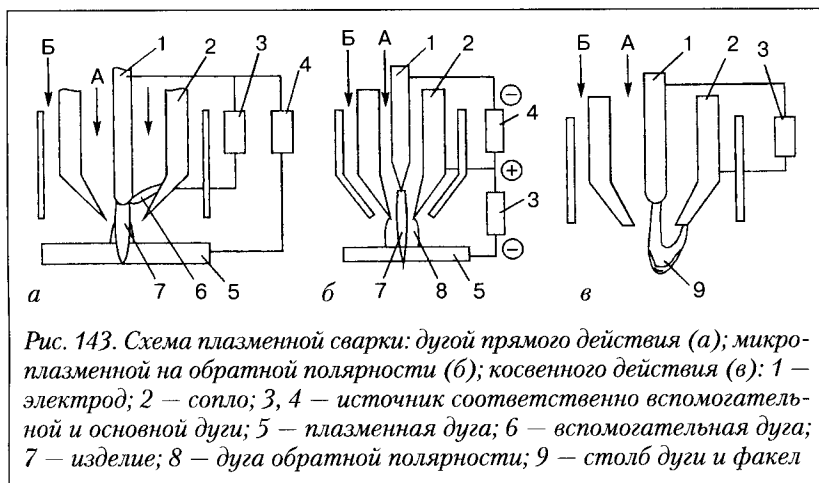
2. Плазмотроны для обработки плазменной струей косвенного действия, в которых дуга горит между электродом и соплом. Для снижения тепловой нагрузки на электрод и сопло применяют магнитное или вихревое закручивание дуги; максимальное значение внутреннего КПД таких плазмотронов достигает 50–70%.

Состав плазмообразующих газов и материала электродов выбирают в зависимости от способа выполнения работ.

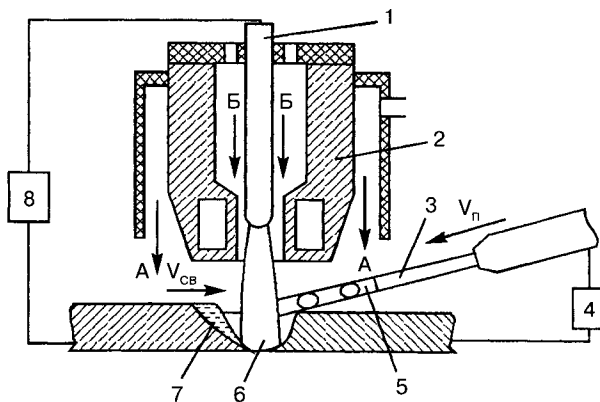
### 3.1. Плазменная сварка

Согласно [202] плазменная сварка относится к дуговому виду сварки, при котором происходит сжатие столба дуги в канале сопла потоком газа или магнитным полем. Существенным отличием плазменной сварки от дуговой является тот факт, что на формирование ванны и шва существенное влияние оказывает плазменно-газовый поток.

**Разновидности и особенности плазменной сварки.** В мировой практике применяют технологию и оборудование для плазменной сварки дугой косвенного действия, на постоянном токе прямой и обратной полярности и дугой прямого действия (*рис. 143*), трехфазной дугой (*рис. 144*), с двойными дугами неплавящимся и плавящимся электродами с отдельными источниками питания (*рис. 145*) [203].



Для повышения производительности и качества плазменной сварки предложены способы, предусматривающие использование нескольких источников нагрева. К таким способам относятся плазма-МИГ-сварка, предложенная фирмой «Филипс», и плазменная сварка биполярной дугой, предложенная в ИЭС им. Е. О. Патона. В последнем случае сварку можно выполнять биполярной дугой сдвоенного плазматрона или плазматроном и дуговой горелкой, расположенными по обе стороны от поверхности свариваемого изделия [203].



*Рис. 145. Схема плазменно-дуговой сварки с боковой подачей плавящегося электрода: 1 — электрод плазмотрона; 2 — сопло; 3 — плавящийся электрод; 4 — источник питания плазменной дуги; 5 — источник питания плавящегося электрода; 6 — плазменная дуга; 7 — дуга плавящегося электрода; 8 — изделие*

Основными параметрами регулирования тепловых характеристик плазменной дуги или струи являются сила тока, длина дуги и расход плазмообразующего газа. Увеличение силы тока и длины дуги приводит к возрастанию температуры, а повышение расхода плазмообразующего газа — к ее понижению.

Важными характеристиками плазменной струи как источника теплоты при обработке материалов является эффективная тепловая мощность, т. е. мощность, вводимая плазменной струей в обрабатываемый материал, и распределение этой мощности по пятну нагрева.

Эффективная мощность плазменной струи меньше на срезе сопла вследствие конвекционных и лучистых потерь. Увеличение силы тока дуги, длины ее в дуговой камере и уменьшение диаметра канала сопла повышают тепловую эффективную мощность струи. Увеличение расхода газа при малых его значениях резко увеличивает мощность струи. При больших расходах газа эффективная мощность изменяется незначительно. Увеличение расстояния между соплом и нагреваемой поверхностью снижает эффективную мощность струи вследствие возрастания потерь энергии струи в основном в результате конвекционного теплообмена струи с окру-

жающей средой. Конвекционные потери возрастают при турбулентном истечении струи из сопла. Этим объясняют более резкое снижение эффективной мощности струи при повышении расхода газа, чему способствует также снижение температуры струи по мере удаления из сопла.

Наиболее распространен способ сварки плазменной дугой, при котором дуговой разряд возбуждается между неплавящимся электродом плазмотрона и свариваемым изделием (см. рис. 143, а).

По сравнению с аргонодуговой сваркой плазменно-дуговая сварка отличается стабильным горением дуги. При плазменной сварке обеспечивается более равномерное проплавление кромок.

Благодаря цилиндрической форме столба дуги плазменно-дуговая сварка менее чувствительна к изменению длины дуги, чем аргонодуговая. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению пятна нагрева, а следовательно, и к изменению ширины шва. Плазменная дуга позволяет сохранять практически постоянный диаметр пятна, а также стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги успешно используют при сварке очень тонких листов.

Пятну нагрева при сварке плазменной дугой может быть придана наиболее благоприятная форма. Изменения формы пятна нагрева получают, применяя специальные сопла (рис. 146) [135]. Если необходимо иметь пятно нагрева вытянутой формы, то в сопле делают два дополнительных отверстия (рис. 146, б). Через эти отверстия поступает холодный газ, что приводит к уменьшению поперечного размера пятна нагрева и придает ему вытянутую форму. При сварке плазменной дугой с таким соплом зона термического влияния сужается, а скорость сварки возрастает на 50–100%.

Разновидность сопла с дополнительным отверстием для создания фокусирующего газового потока показана на рис. 146, в. Плазмообразующий газ 1 подается тангенциально, что позволяет при небольшом его расходе хорошо стабилизировать дугу. Поток фокусирующего газа, направленный под углом к оси столба дуги, дополнительно сжимает ее. Деформировать пятно нагрева при сварке плазменной дугой возможно, накладывая на нее неоднородное магнитное поле, которое создают две пары магнитных полюсов. Дуга, находясь в середине такой магнитной системы, вытягивается в одном направлении, превращаясь в линейный источник теплоты.

При сварке плазменной дугой получают глубокое проплавление основного металла в форме «замочной скважины».

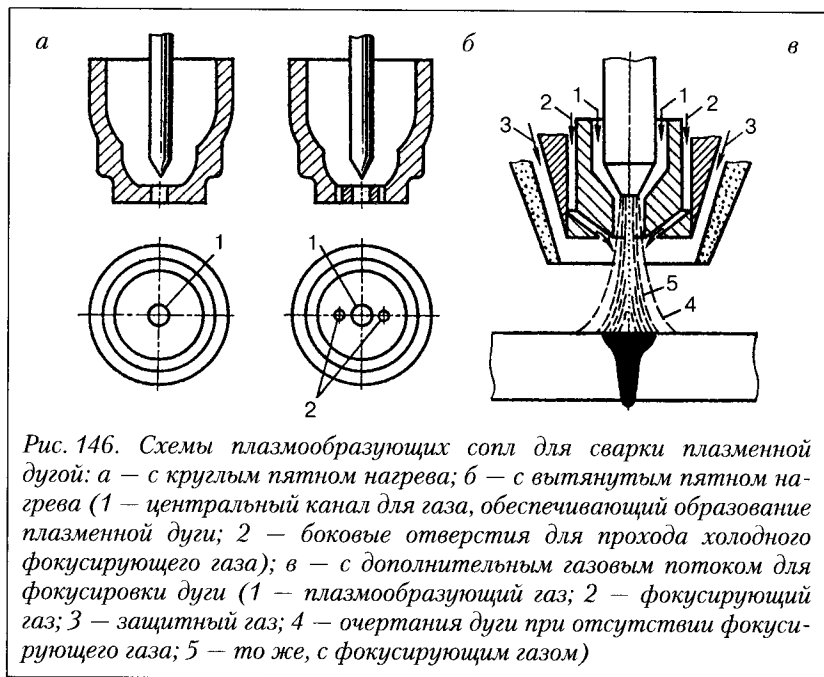


Рис. 146. Схемы плазмообразующих сопел для сварки плазменной дугой: а — с круглым пятном нагрева; б — с вытянутым пятном нагрева (1 — центральный канал для газа, обеспечивающий образование плазменной дуги; 2 — боковые отверстия для прохода холодного фокусирующего газа); в — с дополнительным газовым потоком для фокусировки дуги (1 — плазмообразующий газ; 2 — фокусирующий газ; 3 — защитный газ; 4 — очертания дуги при отсутствии фокусирующего газа; 5 — то же, с фокусирующим газом)

При проектировании сварочных плазмотронов учитывают следующие факторы: необходимое глубокое проплавление при сварке; обеспечение хорошего формирования и качества металла шва. В обеспечении этих показателей серьезную роль играют геометрия и компоновка электродного и соплового (защитного и плазменно-формирующего) узлов, которые решают в комплексе. Стабилизации дуги и повышения глубины проплавления достигают несколькими путями [203]:

- повышением электрической мощности с сохранением степени сжатия дуги (т. е. с постоянной плотностью тока в канале плазмотрона);
- повышением степени сжатия дуги путем уменьшения диаметра канала, изменением геометрии электродно-соплового узла и т. п.;
- комбинацией подключения к источникам питания электродов и сопла, взаимодействия основной, дежурной и вспомогательной дуг, а также применением импульсных режимов питания;
- комбинацией процессов (неплавящимся и плавящимся электродами) в условиях обдува потоком газа и т. п.

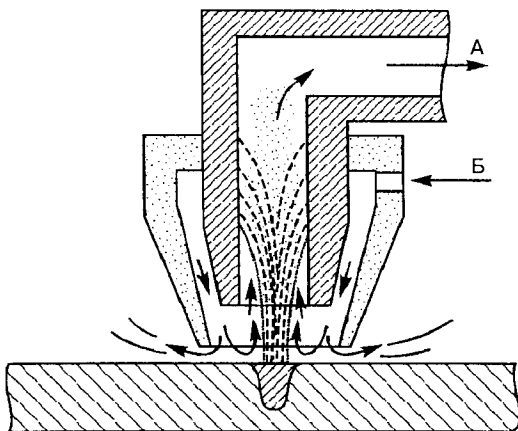
Как уже отмечалось выше, сварные соединения, выполненные плазменной дугой, отличаются глубоким проплавлением и незначительной шириной шва, причем оба этих качества обеспечиваются на скоростях, которые при одинаковой мощности дуги превышают скорости других дуговых способов.

Решая задачу качественного формирования металла шва и обеспечения достаточно глубокого проплавления, нельзя забывать о производительности плазменной сварки.

При сварке на форсированных режимах для качественного формирования шва необходимо обеспечить движение расплавленного металла не в глубину полости кратера, а параллельно поверхности свариваемых пластин по его боковой поверхности [204]. По мере увеличения скорости сварки и повышения газокINETической энергии плазменного потока это условие может нарушаться, что приводит к образованию грубочешуйчатой формы шва, подрезов, неравномерности глубины проплавления, периодической цепочки пор или выбросу расплавленного металла. Для уменьшения динамического напора плазменно-газового потока предложено подавать сжимающий газ в канал сопла в обратном (от изделия) направлении (рис. 147) [203]. С этой же целью был разработан плазмотрон с системой подачи сжимающего газа в радиальном направлении через стенку канала из пористого газопроницаемого материала (рис. 148).

При плазменно-дуговой сварке расход плазмообразующего газа устанавливают таким, чтобы истечение плазмы из сопла не было

Рис. 147. Схема плазмотрона с обратным потоком плазмообразующего газа



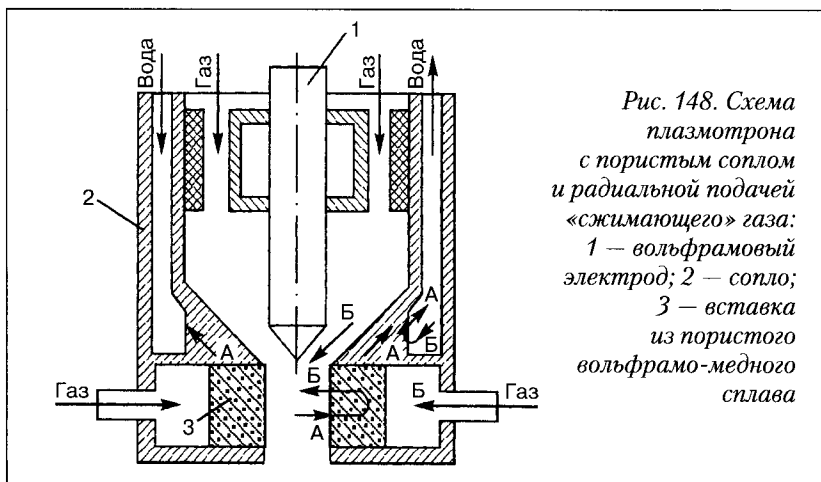


Рис. 148. Схема плазмотрона с пористым соплом и радиальной подачей «сжимающего» газа:  
 1 — вольфрамовый электрод; 2 — сопло;  
 3 — вставка из пористого вольфрам-медного сплава

турбулентным, а силовое воздействие плазменно-газовой струи на поверхность ванны не приводило к разбрызгиванию металла и нарушению формирования шва.

В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон или его смеси с водородом и гелием, а для защиты металла сварочной ванны от окисления при сварке легированной стали, меди, никеля и сплавов на его основе — смесь аргона с 5–8% водорода. При сварке циркония и титана водород вообще нельзя применять ввиду большого его сродства к этим металлам. При укладке второго валика при двухслойной сварке или подварке корня шва рекомендуют применять гелий. При сварке малоуглеродистой и низколегированной стали в качестве плазмообразующего и защитного газа можно использовать углекислый газ.

Состав плазмообразующего газа влияет на глубину проплавления при данной силе тока. Добавление к аргону небольшого количества водорода увеличивает проплавление. Оптимальное содержание водорода 7%. Глубина проплавления при использовании гелия меньше, чем при применении аргона или аргоно-водородной смеси.

Плазменной дугой сваривают листы толщиной до 9,5 мм встык без разделки кромок и присадочного металла. В ряде случаев успешно сваривают за один проход листы толщиной до 12,7 мм. При сварке листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная подготовка кромок, причем глубина и угол разделки значительно меньше, чем для аргонодуговой сварки. Наибольшие преимущества

сварки плазменной дугой проявляются при соединении толстых листов без разделки кромок и без присадочного металла.

Кольцевые швы, например, труб, сваривать в начале и конце шва целесообразно с программным изменением режима. Благодаря программированию параметров режима сварки можно успешно выполнять замыкание шва, и этот участок получается ровным, без заметных шероховатостей и подрезов.

При сварке со сквозным проплавлением типа «замочная скважина» изменение расстояния от сопла плазменной горелки до свариваемых листов в пределах 1,6 мм не влияет на очертания и форму проплавления шва. Сравнительно узкая зона проплавления при плазменной сварке требует, чтобы отклонение оси плазменной горелки от оси шва не превышало 1,3 мм.

Плазменно-дуговая сварка может быть выполнена практически в любом пространственном положении. Режимы сварки плазменной дугой некоторых металлов и сплавов приведены в табл. 113 [135].

Таблица 113. Режимы сварки плазменной дугой стыковых соединений без присадочного металла									
Металл	Толщина листов, мм	Скорость сварки, м/мин	Диаметр сопла, мм	Параметры дуги		Плазмообразующий газ		Фокусирующий и защитный газ	
				сила тока, А	напряжение, В	состав	расход, м <sup>3</sup> /ч	состав	расход, м <sup>3</sup> /ч
Коррозионно-стойкая сталь	2,4	0,97	2,4	160	31	Ar+7,5% H <sub>2</sub>	0,14	Ar+7,5% H <sub>2</sub>	0,99
	3,2	0,61		145	32		0,28		
	4,8	0,41		240	38		0,34		
	6,4	0,36					0,5		
	12,7	0,190		305	35		0,14		
Титан	3,2	0,51	2,4	185	21	Ar	0,23	Ar	0,85
	4,8	0,38		190	26		0,34		1,27
	12,7	0,254		285	38		0,113		0,85
Инконель 600	3,5	0,40	2,4	180	27	Ar	0,34	Ar	1,13
Низкоуглеродистая сталь	6,4	0,254		305	35		0,057		1,4
Алюминий*				85	27		He+ Ar		0,085+ 0,028

\* Сварку выполняли на обратной полярности; остальные металлы сваривали на прямой полярности.

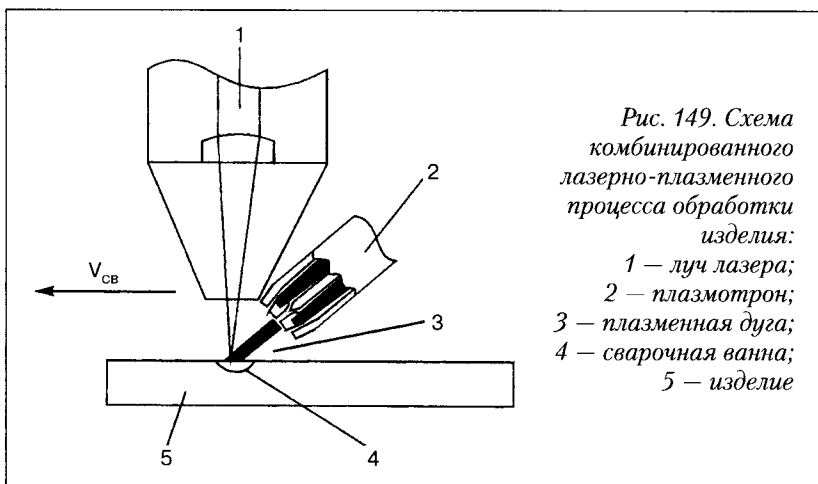


Присадочную проволоку обычно вводят в плазменную струю со стороны хвостовой части сварочной ванны.

При многопроходной плазменной сварке с присадкой толстых листов выполнение последующих проходов не должно сопровождаться проплавлением типа «замочная скважина». Поэтому при укладке последующих швов силовое действие плазменной дуги регулируют изменением расхода плазмообразующего газа так, чтобы расплавленный металл не вытеснялся из сварочной ванны.

В последние годы получает развитие способ плазменно-порошковой сварки, при котором порошок подают в плазму и заполняют разделку [205]. Способ проверен при механизированной и ручной сварке металла толщиной 1–50 мм во всех пространственных положениях. При варьировании составов присадочных порошков открываются новые возможности получения неразъемных соединений металлических, композиционных и керамических материалов.

Применение отдельного и независимого регулирования тепло-содержания основного и жидкого наплавляемого металла открывает новые технологические возможности, в частности, способствует снижению перегрева сварочной ванны и получению минимального проплавления присадочного металла с основным. При выполнении сварки плазма-МИГ имеется возможность отдельно регулировать тепловложение в основной и присадочный металл и сваривать образцы толщиной 16 мм из коррозионно-стойкой стали с разделкой кромок за один проход. При минимальном перемешивании основ-



ного металла с жидким присадочным металлом появляется возможность получить шов с любой формой поперечного сечения без изменения формы разделки [206].

В настоящее время ведутся интенсивные работы в области лазерно-плазменной сварки, при которой сварочная ванна нагревается плазменной дугой и лучом лазера (рис. 149) [203, 207]. При этом лазерный луч, проходя через плазменную дугу, существенно повышает температуру плазмы, тем самым контрагируя дуговую плазму, и увеличивает плотность мощности плазменно-лазерного источника.

**Микроплазменная сварка.** Для соединения металлов и сплавов толщиной от 0,025 до 2,0 мм применяют микроплазменную сварку. При этом сила тока плазменной дуги 0,1–20 А. Среди способов микроплазменной сварки выделяют сварку на прямой полярности в непрерывном и импульсном режимах горения дуги, сварку переменным током и сварку в вакууме [208].

Микроплазменную сварку на прямой полярности выполняют при изготовлении изделий из углеродистых и легированных сталей, различных цветных металлов (медь, никель, титан), а также благородных металлов и сплавов.

Сварку подавляющего большинства металлов выполняют в непрерывном или импульсном режиме при прямой полярности дугой, горящей между вольфрамовым электродом плазмотрона и изделием в струе плазмообразующего инертного газа, как правило, аргона.

Для предотвращения взаимодействия расплавленной ванночки жидкого металла и околошовной зоны с атмосферой по периферии дуги подают защитный газ: аргон, гелий, азот, углекислый газ, смеси аргона с водородом, аргона с гелием, аргона с азотом и другие смеси в зависимости от свойств свариваемого металла.

При микроплазменной сварке прикатодная область дуги находится в среде плазмообразующего газа, а столб и прианодная область — преимущественно в среде защитного газа. При правильном выборе защитного и плазмообразующего газов, их расхода, а также соответствующей конструкции плазмотрона сжатая плазменная дуга имеет конусообразную форму с вершиной, обращенной к изделию. При этом в аноде-изделии существенно возрастает концентрация энергии. Такую форму дуги объясняют тем, что у среза сопла плазма находится преимущественно в среде аргона, а по мере приближения к аноду плазмообразующий и защитный газы все сильнее перемешиваются, и разряд горит уже в смеси этих газов. Чем ближе к аноду, тем больше содержание защитного газа. Если при

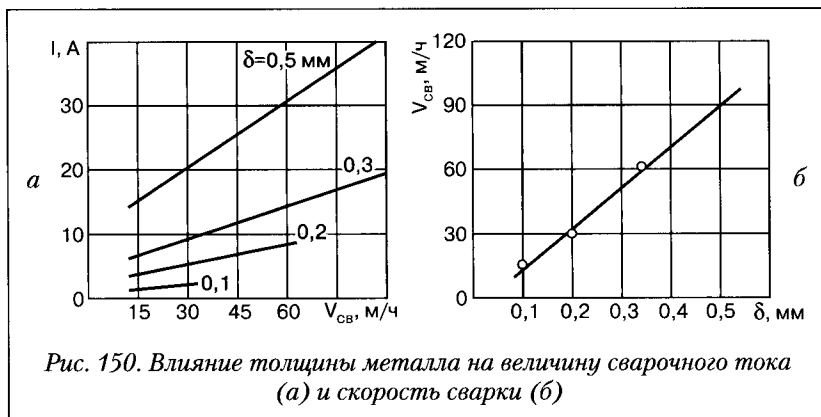


Рис. 150. Влияние толщины металла на величину сварочного тока (а) и скорость сварки (б)

этом защитный газ имеет больший коэффициент теплопроводности, чем плазмообразующий, то степень сжатия дуги по мере приближения к аноду увеличивается.

Отмеченную форму дуги наблюдают в аргоно-водородной смеси, гелии, азоте, углекислом газе при правильно выбранном расходе плазмообразующего газа. Если защитным газом является аргон, то дуга имеет цилиндрическую или даже расходящуюся в направлении к изделию форму. Практически цилиндрическую форму приобретает дуга также на силе тока более 20 А, где влияние среды на контрагирование дуги заметно ослабляется. В этом случае ее диаметр определяется в основном диаметром канала сопла. При больших расходах плазмообразующего газа из зоны горения дуги оттесняется защитный газ и эффект фокусировки также ослабляется.

При сварке углеродистых и легированных сталей величину сварочного тока выбирают пропорционально толщине соединяемого металла. На рис. 150, а показаны кривые зависимости силы тока и скорости сварки от различной толщины металла [208]. Для каждой толщины металла существует оптимальная скорость сварки (рис. 150, б).

Типичные режимы микроплазменной сварки листов встык некоторых материалов приведены в табл. 114 [135].

Для получения качественных сварных соединений из особо тонких металлов ( $<0,2 \text{ мм}$ ) разработан способ импульсной микроплазменной сварки, при котором нагрев и плавление металла осуществляют импульсами тока  $\tau_{п}$  дугой прямой полярности.

Во время паузы  $\tau_{п}$  ванночка жидкого металла остывает, металл кристаллизуется и формируется сварная точка. Частоту импульсов

**Таблица 114. Режимы микроплазменной сварки листов встык (плазмообразующий газ — аргон; расход 17 л/ч; диаметр сопла 0,76 мм)**

Толщина листов, мм	Сила тока, А	Защитный газ		Скорость сварки, см/мин
		расход, л/ч	состав	
Коррозионностойкая сталь				
0,79	10	710	Ar	7,6
0,76		425	0,5%H <sub>2</sub> +Ar	12,7
0,25	6	566		3%H <sub>2</sub> +Ar
	5,6	510	38,1	
0,12	2	566	0,5%H <sub>2</sub> +Ar	12,7
	1,6		50%H <sub>2</sub> +Ar	33
0,08*			0,5%H <sub>2</sub> +Ar	15,2
0,02*				0,3
Титан				
0,56	12	566	75%He+Ar	22,9
0,38	5,8			14
0,20	5		50%He+Ar	12,7
0,02*	3			15,2
Инконель				
0,41	3,5	566	1%H <sub>2</sub> +Ar	15,2
0,30	6		75%He+Ar	38,1
Хастеллой				
0,51	10	566	Ar	25,4
0,25	5,8			20,3
0,12	4,8			25,5
Медь				
0,08*	10	566	75%He+Ar	15,2

\* С отбортовкой кромок.

и скорость сварки выбирают так, чтобы обеспечить определенную величину перекрытия сварных точек. Таким образом, новая сварная точка формируется из непроплавленного и частично переплавленного металла. Подбирая амплитуду и длительность импульса тока, а также длительность паузы, можно исключить прожоги ме-

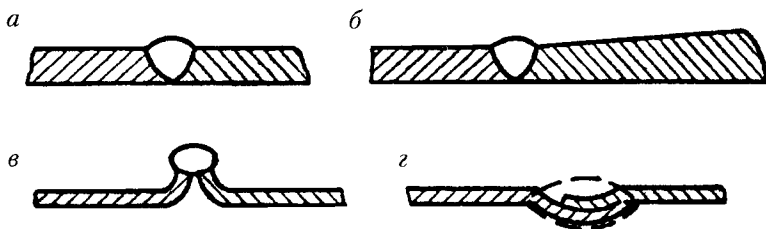


Рис. 151. Стыковые соединения:  
*а* — одинаковой толщины; *б* — различной толщины;  
*в* — с отбортовкой кромок; *г* — с предварительным изгибом кромок

талла даже при остановке плазменной горелки или неравномерности ее перемещения, характерной для ручной сварки. Импульсная микроплазменная сварка значительно облегчает выполнение сварки и улучшает качество сварных соединений.

При микроплазменной сварке металлов толщиной 0,1–2,0 мм применяют стыковые соединения разных видов (рис. 151). Разделку свариваемых кромок при сварке этих толщин не производят. При сварке металлов различной толщины на более толстом из них выполняют скос кромок с одной или двух сторон для получения толщины, равной толщине более тонкого металла (рис. 151, б). Если разница в толщинах небольшая (не более чем в 2–3 раза), скос кромок не производят. Распространенным видом стыковых соединений металлов толщиной менее 0,2–0,3 мм являются соединения с отбортовкой кромок (рис. 151, в).

Сварку стыковых соединений осуществляют в прецизионных зажимных приспособлениях на технологических подкладках. При сварке легких металлов и сплавов толщиной 0,5–2,0 мм с использованием присадочной проволоки в подкладках предусматривают канавки овальной, прямоугольной или треугольной формы. Канавки служат для формирования обратной стороны шва. Ширина и глубина формирующей канавки в зависимости от толщины металла соответственно равны 2–3 и 0,2–0,5 мм. Металлы толщиной до 0,3 мм сваривают преимущественно на подкладках без формирующих канавок.

Качественное соединение легких металлов и сплавов толщиной 0,2–0,5 мм при сварке с присадочной проволокой может быть получено, если стыкуемые кромки соединяемых металлов изогнуть по форме канавки в подкладке и вывести торцы кромок в корень шва за пределы основного металла (рис. 151, г).

Ориентировочные размеры стыковых швов металлов толщиной 0,3, 0,5 и 1,5 мм даны на рис. 152. Основными конструктивными элементами таких швов являются общая толщина шва, ширина проплавления в верхнем и нижнем основаниях, величина проплавления и высоты усиления (ослабления).

В угловых соединениях (рис. 153) угол между сопрягаемыми металлами может быть прямым, острым или тупым. Швы угловых соединений в зависимости от угла расположения деталей по форме являются стыковыми и торцовыми. Угловые соединения с тупым углом между сопрягаемыми металлами толщиной более 0,5 мм сваривают аналогично стыковым соединениям. Если толщина металла меньше 0,5 мм, кромки соединяют впритык и выполняют сварку торцовым швом. Затем сварное соединение разгибают на необходимый угол. Соединения впритык весьма распространены при микроплазменной сварке, так как они наиболее технологичны для данного способа сварки.

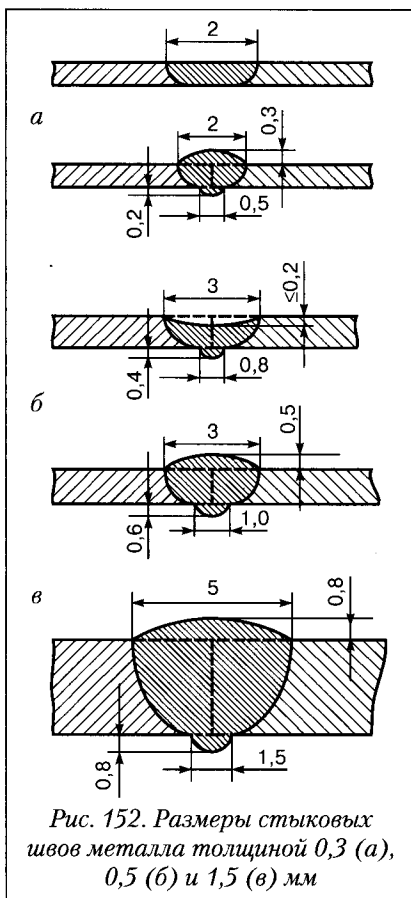


Рис. 152. Размеры стыковых швов металла толщиной 0,3 (а), 0,5 (б) и 1,5 (в) мм

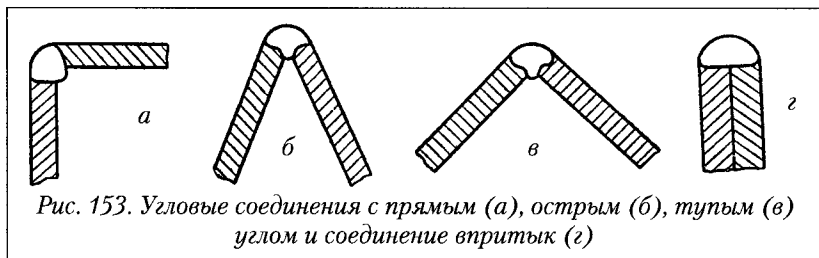


Рис. 153. Угловые соединения с прямым (а), острым (б), тупым (в) углом и соединением впритык (г)

Поскольку микроплазменную сварку применяют для тонкостенных, а в некоторых случаях и для миниатюрных изделий, к технике сборки и сварки соединений предъявляют повышенные требования. Листовые заготовки режут на ручных и механизированных гильотинных ножницах, рабочие части которых тщательно очищают от загрязнений. Разметку, как правило, проводят карандашом. Кромки стыков тщательно очищают от поверхностных загрязнений. Рихтуют заготовки деревянным молотком с плоским основанием.

В процессе сборки изделий для фиксации отдельных деталей применяют прецизионную оснастку с соответствующими удобными зажимными устройствами. При сборке без прихваток сборочные приспособления должны обеспечивать минимальные величины зазоров и превышений кромок. Перед сваркой протяженных швов устанавливают прихватки длиной 3–5 мм. При сборке и сварке особо тонких заготовок ( $d \leq 0,1-0,2$  мм) целесообразно пользоваться оптическими средствами, обеспечивающими многократное увеличение объектов изображения.

Стабильность микроплазменной сварки в значительной мере зависит от формы рабочей части вольфрамового электрода и его расположения в сопле. Перед установкой вольфрамового электрода в цангу горелки конец его загачивают на конус с углом 10–15°. Непосредственно перед сваркой следует проверить центровку электрода в плазмообразующем сопле. Острие электрода должно находиться строго по оси внутреннего канала сопла с глубиной погружения относительно нижнего среза не более 0,5 мм. При отклонении электрода от центра или глубоком погружении его в сопло затрудняются поджиг и горение дежурной дуги, нарушается устойчивость горения основной дуги. Если электрод установлен правильно, длина факела дежурной дуги, выдуваемого из отверстия сопла, должна быть не менее 1,5–2 мм.

При ручной микроплазменной сварке плазмотрон следует располагать к изделию под углом на 60–80°, а при автоматической — 80–90°.

При сварке с присадочной проволокой прутки вводят перед дугой. Угол между присадочной проволокой и горелкой в процессе сварки должен быть около 90°.

В качестве неплавящихся электродов при микроплазменной сварке используют проволоку из вольфрама с активирующими присадками из лантана или иттрия. Электроды из чистого вольфрама не обеспечивают стабильного поджига и горения плазменной дуги.

**Таблица 115. Рекомендуемые диаметры вольфрамовых электродов и размеров сопла для микроплазменной сварки**

Сила тока, А	Диаметр канала сопла, мм	Высота канала сопла, мм	Диаметр электрода, мм
До 10	0,6–0,8	0,8–1,0	0,8–1,0
10–20	0,8–1,2	1,0–1,2	1,0–1,2
20–30	1,2–1,5	1,2–1,5	1,2–1,5
Свыше 30	1,5–1,8	1,0–1,5	1,5–2,0

Рекомендации по выбору сопел и диаметров вольфрамовых электродов при сварке постоянным током при прямой полярности приведены в *табл. 115* [208].

Расход плазмообразующего газа при микроплазменной сварке в зависимости от толщины и свойств свариваемого металла находится в пределах 0,1–0,8 л/мин. При выборе оптимального расхода плазмообразующего газа при микроплазменной сварке необходимо иметь в виду, что чрезмерное его увеличение ухудшает формирование швов и приводит к эффекту резки металла. С другой стороны, малый расход плазмообразующего газа снижает устойчивость горения дуги. Особенно важно правильно выбрать расход плазмообразующего газа при сварке металла толщиной менее 0,2 мм.

В зависимости от толщины свариваемого металла силу тока дежурной дуги выбирают в пределах 1–5 А. Меньшей толщине металла соответствует меньшая сила тока дежурной дуги. При сварке металлов толщиной не более 0,1 мм во избежание чрезмерного разогрева металла факел дуги должен быть длинным.

Соотношения между параметрами импульсов и скоростью микроплазменной сварки должно обеспечивать перекрытие точек на величину не менее 50% их диаметра. Жесткость режима сварки  $G$ , характеризуемая отношением длительности паузы  $\tau_{\text{п}}$  к длительности импульса  $\tau_{\text{и}}$ , находится в пределах  $G = \tau_{\text{п}} / \tau_{\text{и}} = 0,5–10$ .

Для предупреждения образования дефектов в соединениях при микроплазменной сварке необходимо:

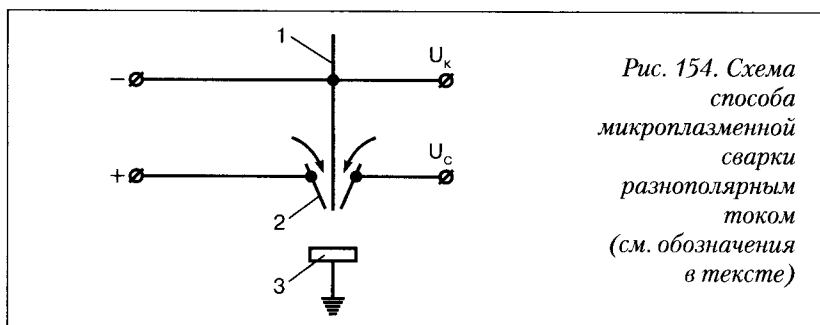
- контролировать качество заготовок (размеры, шероховатость, чистоту);
- контролировать качество сборки (перекосы, несовмещение кромок, величину зазоров, общие размеры узла, размеры и места расположения прихваток);



- контролировать базовые размеры приспособлений, фиксаторов и крепежных деталей, а также состояние поверхности мест, соприкасающихся с изделием;
- контролировать параметры режимов сварки, а при необходимости вести их запись электронными средствами;
- выполнять внешний осмотр и обмер швов;
- применять специальные способы испытаний качества согласно техническим требованиям на данное изделие.

Микроплазменная сварка **асимметричным переменным током и разнополярными прямоугольными импульсами** нашла применение при изготовлении изделий из алюминия и алюминиевых сплавов толщиной 0,2–2,0 мм [208, 209].

Сущность способа микроплазменной сварки разнополярными импульсами (рис. 154), разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона, заключается в том, что в целях катодного разрушения оксидных пленок на свариваемом металле на сопло плазмотрона 2 подают положительные относительно изделия 3 импульсы напряжения для питания дуги обратной полярности, а в промежутках между ними на вольфрамовый электрод 1 подают отрицательные относительно изделия импульсы напряжения, под действием которых между электродом и изделием формируется плазменная дуга прямой полярности. Между вольфрамовым электродом и соплом в потоке плазмообразующего газа непрерывно горит малоамперная дежурная дуга постоянного тока, создающая факел плазмы. В результате обеспечивается стабильный режим функционирования микроплазменной дуги при разнополярном токе. Плазмообразующий газ (аргон) поступает в кольцевой зазор между вольфрамовым электродом и соплом; защитный газ (как правило, гелий) — в зазор между плазмообразующим и защитным соплом.



**Таблица 116. Режимы плазменной сварки алюминиевых сплавов при разнополярных импульсах**

$\delta$ , мм	Марка сплава	$I_{пр}$ , А	$I_{об}$ , А	$\tau_{и.пр}$ , с	$\tau_{и.об}$ , с	Диаметр вольфрамового электрода, мм	$v_{св}$ , м/ч	Расход газа, л/мин	
								плазмообразующего	защитного
0,3	A5	10–12	8–10	0,02	0,04	1,0	25–30	0,15–0,2	2–3
0,5	A5	20–25	15–20	0,03	0,03	1,0	25–30	0,2–0,25	2–3
1,0	A5	40–50	18–20	0,04	0,04	1,0	20–25	0,25–0,3	3–4
	AMг6	35–40	16–18						
1,5	A5	70–80	25–30	0,06	0,06	1,5	20–25	0,3–0,35	3–4
	AMг6	60–70	20–25						
2,0	A5	110–130	30–40	0,08	0,08	1,5	15–20	0,35–0,4	4–5
	AMг6	90–110	30–35			2,0			

*Примечание.* Для  $I_{пр}$  и  $I_{об}$  приведены амплитудные значения силы тока, замеряемые по осциллограммам тока.

Режимы сварки алюминиевых сплавов разнополярными импульсами приведены в табл. 116 [208].

Сборку элементов тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов при сварке без присадочной проволоки производят в прецизионной оснастке, обеспечивающей минимальные зазоры в стыке (менее 0,05–0,10δ) на всем протяжении шва.

Во избежание деформирования поверхности свариваемых заготовок поверхность рабочих кромок прижимных планок сборочно-сварочной оснастки должна быть полированной. Наилучшее формирование обратной стороны швов стыковых соединений получают с поперечной канавкой круглой формы в технологической подкладке (радиус канавки 5–8 мм, глубина – 0,2–0,5 мм).

Механические свойства сварных соединений технического алюминия и термически неупрочненных алюминиевых сплавов, выполняемых микроплазменной сваркой при оптимальных параметрах режимов и соответствующей досварочной подготовке и сборке, равноценны свойствам основного металла в отожженном состоянии.

При сварке термически упрочняемых алюминиевых сплавов различных систем легирования прочность сварных соединений равна 0,7–0,9 прочности основного металла, что на 10–15% превышает аналогичные показатели при аргонодуговой сварке. Что каса-

ется ударной вязкости, то она также в 1,5–2 раза превышает значения, получаемые при аргонодуговой сварке.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия оборудования [209]:

- прецизионный автомат А-1342 с плазмотроном ОБ-1213 для механизированной микроплазменной сварки стыковых, угловых, торцевых и нахлесточных соединений;
- автомат А-1284 для микроплазменной сварки продольных и поперечных торцевых швов секций сотовых конструкций;
- установка А-1578 для механизированной микроплазменной сварки продольных коробчатых элементов и другое оборудование.

При сварке химически активных и тугоплавких металлов весьма высокую эффективность защиты зоны сварки обеспечивает вакуум. Результаты исследований контрагирования и энергетических характеристик импульсной дуги низкого давления (вакуум  $7,5 \text{ Па} - 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ) позволили рекомендовать этот источник нагрева для сварки тонких металлов [208]. Выбором параметров импульсного режима (амплитуды тока, длительности импульсов, частоты их следования) можно регулировать в широком диапазоне средний ток (2,5–50 А) и мощность (0,1–2,5 кВт) дуги низкого давления. При этом удается сваривать металлы весьма малой толщины.

**Области применения плазменной сварки.** Микроплазму как высококонцентрированный источник теплоты при прямой полярности в непрерывном и импульсном режиме применяют для:

- высококачественной сварки тонкостенных изделий и прецизионных конструкций из различных черных и цветных металлов и сплавов (сталь, никель, титан, молибден, ниобий, палладий, ковар, медь, латунь и др.);
- прецизионной наплавки и заварки микротрещин и микродефектов в готовых изделиях;
- приварки проводов при изготовлении различных электро- и радиотехнических устройств и др. [208].

Микроплазменную сварку применяют при изготовлении полупроводниковых элементов, конденсаторов, теплообменников, вакуумных датчиков, реле, резисторов, труб, сильфонных узлов, фильтров и др.

Способы микроплазменной сварки на переменном токе с разнополярными импульсами хорошо зарекомендовали себя при изготовлении изделий из легких металлов и сплавов в авиационной, радиотехнической, космической, машиностроительной и других отраслях промышленности (алюминиевые корпуса бытовых водо-

нагревателей, уплотнительные прокладки для химической аппаратуры, корпуса конденсаторов, защитные кожухи и каркасы, трубы, обечайки, фланцевые соединения трубопроводов и др.).

Задачу изготовления криогенных трубопроводов длиной до 12000 мм, диаметром от 150 до 600 мм и толщиной стенки от 2,0 до 8,0 мм из стали 12X18H10T в НПО «Криогенмаш» (РФ) удалось успешно решить с помощью плазменной сварки на весу [203].

Сначала в СССР, а потом и в США была реализована технология сварки проникающей плазменной дугой переменного тока топливных баков ракет.

Благодаря однопроходной плазма-МИГ-сварке удалось обеспечить высокое качество стыковых соединений сплава ЭП-202 толщиной 8–12 мм. Большой опыт эффективного применения плазма-МИГ-сварки алюминиевых цистерн накоплен фирмой «Швельмер Гейзенверк / Мюлер и компания» (Германия). Применяв оборудование фирмы «Филипс», удалось полностью исключить поры, подрезы и другие дефекты в металле шва при одновременном увеличении скорости сварки по сравнению со скоростью при ранее применяемой дуговой сварке плавящимся электродом.

Техника плазменной сварки продолжает развиваться за счет использования компьютерной техники и электроники, в том числе современных инверторных источников питания.

Большое внимание в последние годы уделяется разработке новых способов сварки с использованием плазмы, электрической дуги и лазерного луча.

## **3.2. Плазменная наплавка**

Плазменная наплавка в последние десятилетия развивается достаточно интенсивно. Ее применяют при восстановлении деталей и в большей мере — при изготовлении деталей.

Интерес к плазменной наплавке вызван высоким качеством покрытий, возможностью получать наплавленный слой с заданным составом, структурой и физико-механическими свойствами без нежелательных примесей, пор и других дефектов. Гибкость управления плазменной наплавкой позволяет регулировать тепловложение в деталь и глубину проплавления, что не дает расплавлять поверхность обрабатываемой детали при нанесении сплавов с относительно низкой температурой плавления, например, меди и никеля.



Рис. 155. Классификация способов плазменной наплавки

Можно также получать гладкие покрытия с небольшим припуском на механическую обработку, особенно при нанесении дорогих материалов (кобальта, никеля и т. п.) или особо твердых покрытий.

Достоинства плазменной наплавки побудили и побуждают исследователей и производителей непрерывно совершенствовать ее возможности, например, увеличить толщину наносимого покрытия и повысить производительность [210, 211].

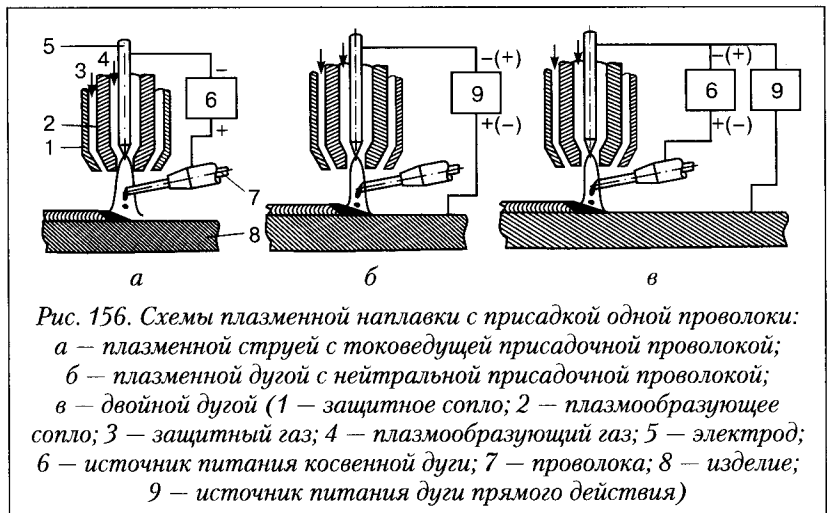
**Особенности плазменной наплавки и основные ее разновидности.** При плазменной наплавке используют плазменную дугу, плазменную струю или их комбинацию. Классификация способов плазменной наплавки по различным признакам в виде схемы показана на *рис. 155* [210].

В зависимости от применяемого присадочного материала все известные способы плазменной наплавки разделяют на три основные группы:

- наплавка проволокой или прутками;
- наплавка по неподвижной присадке, уложенной или закрепленной на наплавляемой поверхности;
- наплавка порошком.

Схемы различных способов выполнения плазменной наплавки с подачей одной присадочной проволоки показаны на *рис. 156* [210].

При наплавке плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой (*рис. 156, а*) дуга горит в аргоне между вольфрамовым



электродом-катодом и присадочной проволокой, подаваемой сбоку под прямым углом к оси плазмотрона. Дуги питаются током прямой полярности, а между катодом и соплом постоянно горит слабощелочная дежурная дуга (на схеме не показана).

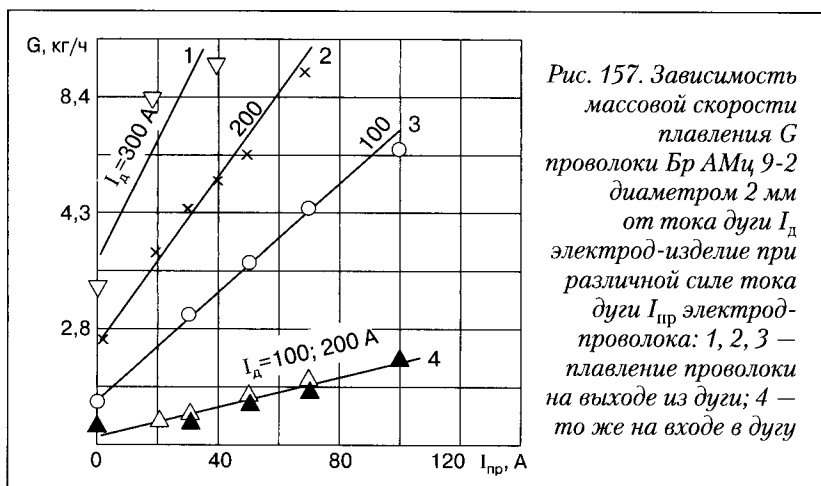
Основной металл нагревается за счет теплового воздействия струи плазмы и теплоты переносимого каплями присадочного металла.

Отличительной особенностью этого способа наплавки является весьма незначительное проплавление основного металла, которое в то же время обеспечивает высокую прочность соединения наплавленного и основного металла.

При наплавке плазменной дугой с подачей нейтральной присадочной проволоки (рис. 156, б) основной металл нагревается более эффективно, а сам источник нагрева является более локальным, чем плазменная струя.

Наплавку можно производить как дугой прямой полярности, так и обратной. В последнем случае благодаря катодной очистке появляется возможность наплавлять сплавы, легированные алюминием, титаном и другими элементами, образующими трудновосстанавливаемые тугоплавкие оксиды, а также наплавлять детали из алюминиевых сплавов.

При наплавке с подачей нейтральной присадочной проволоки интенсивность ее плавления ниже, в то же время разбрызгивание меньше, снижается угар легко испаряющихся легирующих элементов, предупреждается чрезмерное растворение карбидных зерен и др.



Отличительной особенностью наплавки двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой (рис. 156, в) является наличие двух дуг при прямой или обратной полярности, которые питаются, как правило, от автономных источников. При этом интенсивность плавления зависит от силы тока обеих дуг (рис. 157), полярности, диаметра и места плавления присадочной проволоки, а также некоторых других факторов.

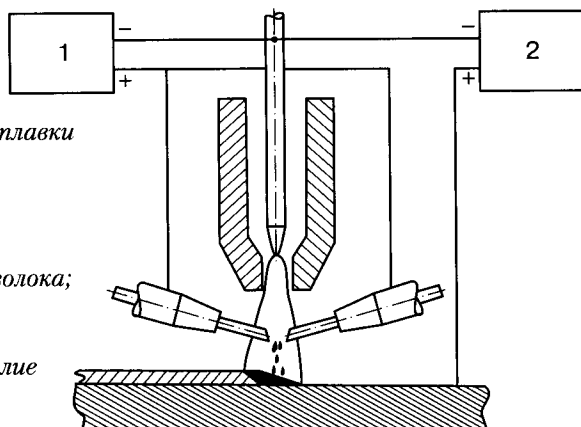
Данный способ по производительности превосходит наплавку плазменной дугой с нейтральной присадкой, обеспечивая при этом меньшее проплавление основного металла. По сравнению с наплавкой плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой он более универсален и надежен.

При наплавке комбинированной плазменной дугой с присадкой из двух проволок (рис. 158) последние подаются навстречу друг другу, что позволяет компенсировать их магнитное дутье и повысить производительность наплавки до 30 кг/ч и более. В качестве защитного газа используют аргон или аргон с водородом; плазмообразующего газа — аргон или аргон-гелиевую смесь. Процесс наплавки стабилен, нечувствителен к колебаниям длины дугового промежутка: изменение расстояния между плазмотроном и изделием на  $\pm 6$  мм не оказывает существенного влияния на проплавление основного металла.

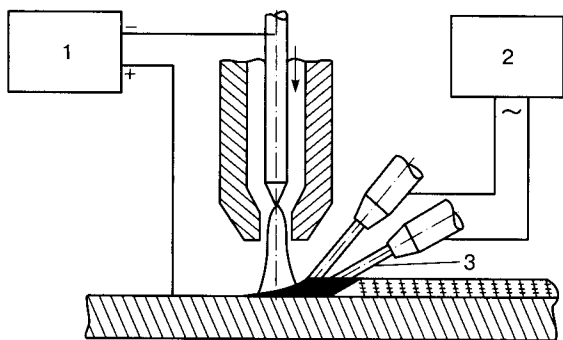
Плазменную наплавку двумя горячими проволоками осуществляют по схеме, приведенной на рис. 159. При этом две присадочные

Рис. 158.

Схема  
плазменной наплавки  
с присадкой  
двух проволок:  
1 — источник  
питания дуги  
электрод-проволока;  
2 — источник  
питания дуги  
электрод-изделие







*Рис. 159. Схема плазменной наплавки «горячими» проволоками:  
 1 — источник постоянного тока для питания плазменной дуги;  
 2 — источник переменного тока для подогрева проволоки;  
 3 — присадочные проволоки*

проволоки, обычно диаметром 1,6 или 2,4 мм, расположенные V-образно под углом  $30^\circ$  друг к другу, подключены к автономному источнику и подаются в сварочную ванну, создаваемую мощной плазменной дугой прямого действия. Проволока нагревается за счет джоулевой теплоты почти до температуры плавления, что позволяет повысить производительность наплавки до 40–50 кг/ч.

Такая схема позволяет достаточно гибко управлять процессом наплавки. С помощью главного источника постоянного тока регулируют мощность дуги, управляя проплавлением основы и формой сварочной ванны, а с помощью вспомогательного источника переменного тока, изменяя скорость подачи проволоки, регулируют интенсивность ее расплавления.

Получила распространение и плазменная наплавка плавящимся электродом (рис. 160) [210].

Наплавку (рис. 160, а) начинают с поджига плазменной дуги между расположенным эксцентрично относительно сопла неплавящимся электродом и изделием. Дуга между электродной проволокой, которую подают по оси плазматрона, и изделием возбуждается спонтанно, без короткого замыкания, и горит стабильно при изменении скорости в очень широком диапазоне. Сварку и наплавку можно вести как при прямой, так и при обратной полярности. При обратной полярности резко возрастает нагрузка на неплавящийся электрод, что ограничивает силу тока плазменной дуги (например,

для вольфрамового электрода диаметром 6 мм она не должна превышать 200 А).

Для повышения допустимой силы тока плазменной дуги применяют медный водоохлаждаемый электрод или, что более эффективно, используют в качестве неплавящегося электрода сопло (рис. 160, б). Во втором случае упрощается конструкция плазмотрона, уменьшаются его габариты. Однако при этом нельзя начинать сварку и наплавку с поджига плазменной дуги, так как дуга блуждает по торцу сопла и не стабилизируется по оси плазмотрона. Поэтому процесс начинают с поджига дуги плавящегося электрода, после чего в течение 0,1 с самопроизвольно возникает плазменная дуга между соплом и изделием. Под воздействием магнитного поля, существующего вокруг электродной проволоки, активное пятно дуги располагается на стенке канала сопла. Для борьбы с разбрызгиванием при возбуждении дуги плавящегося электрода используют специальную электрическую схему, управляющую силой тока и подачей проволоки.

При плазменной наплавке по неподвижной присадке присадочный материал укладывают, насыпают, напыляют или каким-либо

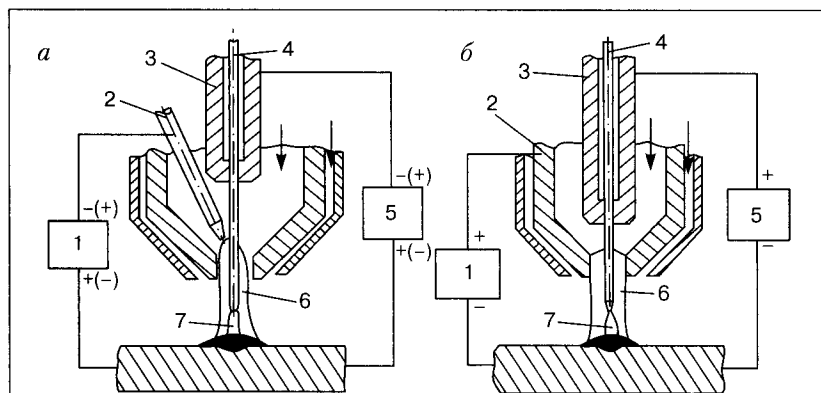


Рис. 160. Схема плазменной наплавки плавящимся электродом:

- а — с неплавящимся электродом плазменной дуги;
- б — с токоведущим соплом (1 — источник питания плазменной дуги;
- 2 — вольфрамовый или водоохлаждаемый медный электрод;
- 3 — мундштук; 4 — электродная проволока; 5 — источник питания дуги с плавящимся электродом; 6 — плазменная дуга;
- 7 — дуга плавящегося электрода)

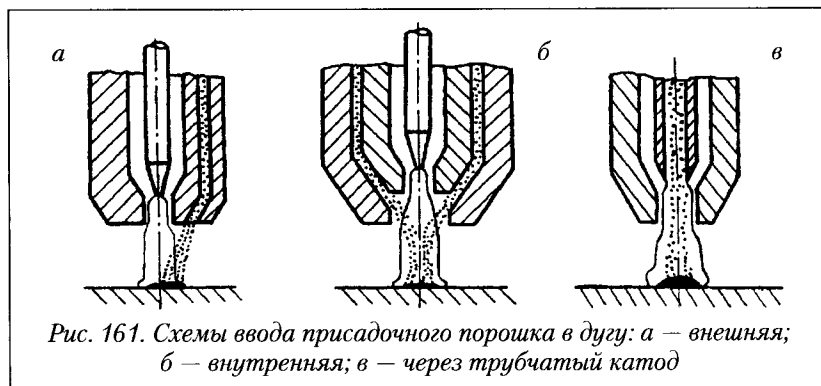
иным способом наносят заранее на подлежащую наплавке поверхность или же подают на нее перед дугой в процессе наплавки [210]. В качестве присадки используют кольца или пластины, форма и размеры которых соответствуют разделке для наплавки, пасты, порошки и другие материалы.

В последние годы все большее распространение получает плазменно-порошковая наплавка, которая отличается малой глубиной проплавления основного металла, прецизионной точностью, высокой производительностью и возможностью наплавки самых разнообразных сплавов [210, 211, 212].

Для плазменно-порошковой наплавки (ППН) используют плазмотроны с внешней и внутренней схемами ввода порошка в дугу. В первом случае порошок поступает в дугу по одному или нескольким боковым каналам плазмотрона (рис. 161, а), а во втором порошок поступает в дугу в виде распределенного потока через узкую щель между плазмообразующим и фокусирующим соплами (рис. 161, б) [212]. Возможен также ввод порошка в дугу через трубчатый катод (рис. 161, в).

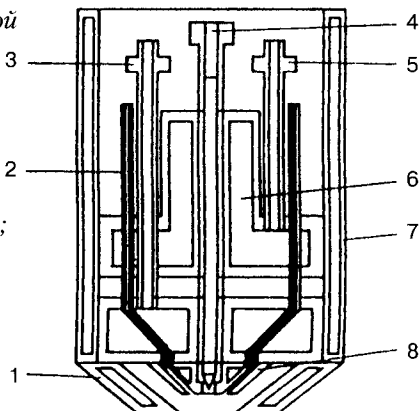
При применении плазмотронов с внешней подачей порошка (см. рис. 161, а) отмечают большие потери порошка и существенные затраты энергии (особенно при производительности  $> 3$  кг/ч). Кроме того, односторонний ввод порошка приводит к деформации дуги и, следовательно, к нарушению стабильности процесса наплавки и ухудшению формирования наплавленного валика.

Отличительной особенностью порошковых плазмотронов повышенной мощности является подача порошка плазмообразующим газом через главное центральное сопло: достаточно большой поток



*Рис. 162. Схема горелки высокой мощности для плазменно-порошковой наплавки:*

*1 – водоохлаждаемое сопло защитного газа; 2 – боковой ввод порошка; 3 – токоввод дежурной дуги; 4 – подача порошка по катодному каналу; 5 – главный токоввод; 6 – интенсивно охлаждаемый водой катодный блок; 7 – водоохлаждаемый корпус; 8 – плазмообразующее и порошковое сопло*



плазмообразующего газа при силе тока свыше 300 А обеспечивает транспортировку частиц порошка по длинному и тесному каналу катодной камеры. Иногда подача порошка по катодному каналу совмещена с обычным вводом порошка в плазменную дугу по боковым каналам плазмотрона (рис. 162) [213]. Центральный ввод порошка обеспечивает известные преимущества: поток порошка становится более компактным, сжатым; удлиняется траектория движения частиц порошка в плазменной дуге, обеспечивая их расплавление до подхода к поверхности обрабатываемой детали. При высокой мощности наплавки, необходимой для большой производительности, вольфрамовый электрод и плазмообразующее сопло подвергаются высоким термическим нагрузкам. Поэтому для обеспечения надежности плазмотрона предельно увеличивают охлаждающие поверхности и одновременно уменьшают толщину стенок деталей.

В плазмотронах фирмы «Плазма-Мастер Лтд» (г. Киев) используют внутреннюю схему ввода порошка в дугу (табл. 117) [212]. При этом независимо от конструкции плазмотрон имеет распределительный узел (рис. 163) с равномерно расположенными по окружности продольными пазами, по которым порошок под определенным углом вводят в дугу, и кольцевой распределительной камерой. Размеры, количество и наклон пазов подобраны таким образом, чтобы частицы порошка попадали в самую высокотемпературную область дуги на выходе из фокусирующего сопла. Коэффициент равномерности распределения порошка по окружности при оптимальном расходе

**Таблица 117. Технические характеристики плазмотронов**

Параметр	ПП-6	ПП-6-01	ПП-12	ПП-12-01*	ПП-14	ПП-21
Сила тока прямой дуги, А	30–150	40–100	50–250	50–200	30–200	30–150
Сила тока косвенной дуги, А	30–150	30–150	30–80	30–100	30–50	25–50
Производительность наплавки, кг/ч	0,5–8,0	0,5–10,0	0,5–50	0,2–4,0	0,2–3,0	0,2–2,0
Размер частиц присадочного порошка, мкм	40–250	40–250	40–200	40–160	40–125	40–125
Потери порошка, %	<5	<5	<5	<5	<8	<6
Общий расход рабочего газа (аргона), л/мин	12–20	12–20	12–15	12–18	10–12	12–15
Расход охлаждающей воды, л/мин	>5	>6	>4	>6	>3	>3
Диаметр (толщина) × высота, мм	56×98	60×16	52×68	52×68	34×37	16×70
Масса, кг	1,5	1,8	1,2	1,2	0,8	0,7
Назначение	Универсальный $d_{\text{вн}} \geq 120 \text{ мм}$ $L^{**} \leq 750 \text{ мм}$	Наплавка наружных поверхностей	Наплавка внутренних поверхностей $d_{\text{вн}} \geq 85 \text{ мм}$ , $L^{**} \leq 750 \text{ мм}$	Универсальный $d_{\text{вн}} \geq 85 \text{ мм}$ $L^{**} \leq 750 \text{ мм}$	Наплавка внутренних поверхностей $d_{\text{вн}} \geq 50 \text{ мм}$ , $L^{**} \leq 350 \text{ мм}$	Наплавка труднодоступных мест

\* Полярность обратная. \*\* Длина внутренней наплавляемой поверхности.

транспортирующего газа должен быть не ниже 0,8, а скорость полета частиц в момент попадания в дугу – не более 1,5–2,0 м/с.

Отличительной особенностью компоновки рассматриваемых плазмотронов, за исключением ПП-6-01, является горизонтальное расположение держателей, что позволяет вынести коммуникации из рабочей зоны и сделать их универсальными при наплавке как наружных, так и внутренних поверхностей. Узел крепления плазмотронов позволяет быстро устанавливать и снимать их для обслуживания, а также заменять один плазмотрон другим.

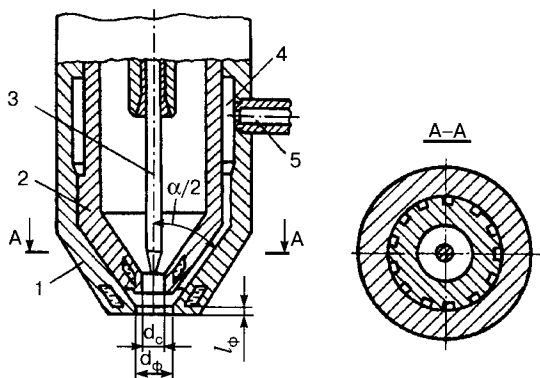


Рис. 163. Узел распределения и ввода порошка в дугу:  
 1 — фокусирующее сопло; 2 — стабилизирующее сопло; 3 — электрод;  
 4 — кольцевая распределительная камера; 5 — входной штуцер

Плазматрон ПП-6-01 обеспечивает наибольшую производительность наплавки (10 кг/ч) при силе тока не более 400 А.

Современные зарубежные плазматроны позволяют довести силу тока дуги до 500 А и поднять производительность до 12 кг/ч. Характеристики различных способов плазменно-порошковой наплавки (микроплазменной, обычной и повышенной мощности) приведены на рис. 164 [211].

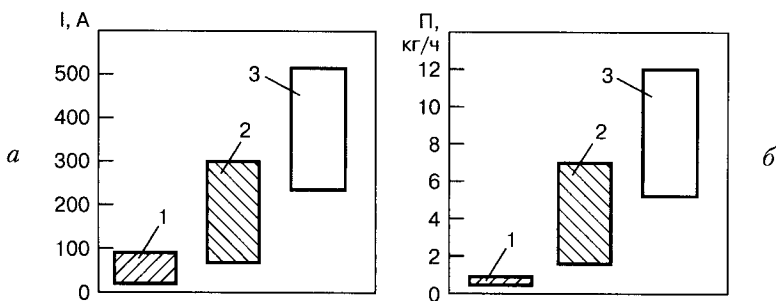


Рис. 164. Диаграммы мощности дуги (а) и производительности (б) при различных вариантах плазменно-порошковой наплавки:  
 1—3 — микроплазменная наплавка, обычная плазменная и плазменная наплавка высокой мощности соответственно

Для плазменной наплавки используют все металлические присадочные материалы: кобальт, никель, железо, алюминий, медь, молибден, титан и их сплавы, а также карбиды вольфрама в металлической матрице, за исключением металлов с низкой точкой кипения, например, цинка.

На современном этапе при выборе присадочных материалов для плазменной наплавки прослеживается следующая тенденция: кобальтовые сплавы заменяют никелевыми, а последние, в свою очередь, сплавами на железной основе по причине более низкой стоимости последних [211]. Иногда приводят доводы экологического характера, относя кобальт и никель к канцерогенным веществам.

Все приведенные выше способы наплавки находят промышленное применение. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки [210]. Плазменная наплавка проволокой обеспечивает малую глубину проплавления, меньшее по сравнению с дуговой наплавкой тепловложение в основной металл, отсутствие при наплавке трудностей металлургического характера, связанных с плохой отделимостью шлаковой корки, наличием шлаковых включений и т.п.

В то же время по сравнению с наиболее распространенной дуговой наплавкой для плазменной наплавки проволокой требуется более сложное и дорогое оборудование, а также более высокая культура производства. Этот способ находит практическое применение при наплавке сплавов на основе цветных металлов и, в редких случаях, высоколегированных сталей. Широкое внедрение в промышленную практику высокопроизводительных способов плазменной наплавки двумя проволоками и плавящимся электродом наталкивается на сильную конкуренцию со стороны сторонников дуговой и электрошлаковой наплавки лентами, которые обеспечивают еще более высокую производительность при достаточно малом проплавлении основного металла.

Считают [210], что плазменная наплавка по неподвижной присадке эффективна только для небольшого круга деталей, как правило, массового производства, поэтому ее применение в будущем будет, по-видимому, ограниченным.

Плазменно-порошковая наплавка обладает всеми достоинствами плазменной наплавки проволокой, но является более универсальным способом, так как порошковый присадочный материал может быть получен из любого сплава независимо от его химического состава и физико-механических свойств. Кроме того, порошки на 10–30% дешевле, чем прутки и ленты. Качество порошков, в ча-

стности, их химический состав контролировать легче, чем качество порошковой проволоки и лент.

К достоинствам плазменной наплавки порошком следует отнести и возможность нанесения слоя весьма небольшой толщины и высокого качества, что позволяет снизить расход наплавочных материалов и трудоемкость механической обработки. Поэтому считают [210, 211], что плазменно-порошковая наплавка является наиболее универсальным и перспективным процессом среди рассмотренных выше технологий плазменной наплавки. Объемы промышленного использования этой технологии в последние годы заметно увеличились.

**Плазменно-порошковая наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания.** Плазменно-порошковую наплавку применяют взамен плазменной наплавки по неподвижной присадке и индукционной наплавки способом «намораживания», которые широко применяют при изготовлении клапанов двигателей внутреннего сгорания [210, 214]. При этом среди недостатков наплавки по неподвижной присадке, в качестве которой используют металлокерамические кольца, выделяют трудности, связанные с промышленным производством упомянутых колец, и отсутствие современного автоматизированного оборудования.

К недостаткам технологии индукционной наплавки «намораживанием» относят:

- одновременный нагрев всего объема наплавляемого металла, что ведет к образованию усадочной рыхлости, «выталкиваемой» фронтом растущих кристаллов к поверхности, и, как следствие, увеличению припусков на последующую обработку;
- относительно низкую скорость нагрева, что при наплавке аустенитных сталей может привести к разупрочнению металла в ЗТВ;
- ограничение температуры плавления применяемых для наплавки материалов, особенно при наплавке малогабаритных клапанов, в связи с сильным перегревом (вплоть до оплавления) металла основы, что не позволяет наплавлять данным способом сплавы на кобальтовой основе на заготовки диаметром менее 30 мм.

Повышение требований к динамическим характеристикам автомобиля, необходимость соблюдения международных норм токсичности выхлопных газов приводят к необходимости изменить конструкцию современных двигателей внутреннего сгорания. Для таких двигателей характерно существенное повышение рабочих нагрузок при одновременном увеличении ресурса безремонтной экс-



**Таблица 118. Химический состав порошков и твердость наплавленного металла**

Порошок	Массовая доля элементов, %							Твердость НRC <sub>3</sub>
	C	Cr	Si	Fe	Ni	Co	Другие	
ЭП-616А	0,85	26	2,2	3	Основа	–	1,3 В	35...42
ПР-Н73Х16СЗРЗ	0,7	16	3,2	≤ 3		–	2,5 В	45...52
ПР-Н40Х25В6	1,5	27	0,5	25		–	6,0 W	30...35
ПР-К60Х30ВС	1,1	30	2,2	≤ 3	≤ 3	Основа	4,5 W	38...44
ПН-АН34	0,8	30	1,7	≤ 3	≤ 6		4,5 W, 0,8 В	42...47
ПН-АН35	1,5	30	1,7	≤ 3	≤ 3		4,5 W	42...47
ПР-К25Х25Н20В12	1,8	26	1,0	≤ 2	22		12 W	42...45

плуатации и уменьшение размеров деталей газораспределительного механизма с целью снижения его инерционности.

Результаты испытаний двигателей автомобиля «ВАЗ» показали, что клапаны, изготовленные по применяемой технологии индукционной наплавки хромоникелевым сплавом ЭП616А, разрушаются в процессе эксплуатации, не обеспечивая установленный ресурс.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология плазменно-порошковой наплавки клапанов и седел двигателей внутреннего сгорания с использованием гаммы порошков различного состава (табл. 118) [210, 214].

В зависимости от конструкции плазмотрона, а также наплавляемых клапанов и седел применяют порошки с размером частиц от 45–63 до 125–200 мкм. Производительность наплавки от 0,5 до 3–4 кг/ч, а толщина наплавленного слоя — от 1,5 до 4–5 мм. Режимы наплавки обеспечивают возможность нанесения тонких слоев с малым термическим воздействием на основной металл. Размер зоны между основным и наплавленным металлом при наплавке никелевых сплавов — 50–100 мкм, а кобальтовых — 100–150 мкм. Ширина зоны перегрева с крупным аустенитным зерном при плазменно-порошковой наплавке не превышает 0,2–0,3 мм. По этому показателю плазменно-порошковая наплавка выгодно отличается от индукционной наплавки, где основной металл неизбежно подвергается сильному перегреву с образованием обширной зоны крупного зерна, что может стать причиной усталостного разрушения клапанов в процессе эксплуатации.

В [215] приведена технология плазменно-порошковой наплавки выпускных клапанов двигателя автомобиля «ВАЗ». Для выполнения требований к размерам наплавленного слоя и обеспечения стабильности процесса разработан способ автоматизированного проектирования профиля головки клапана с применением графического пакета AutoCAD. Проектируют в такой последовательности:

- строят профиль головки клапана (рис. 165, а) по чертежу на готовую деталь с учетом припуска для последующей механической обработки (рис. 165, б) (величину припуска определяет технолог);

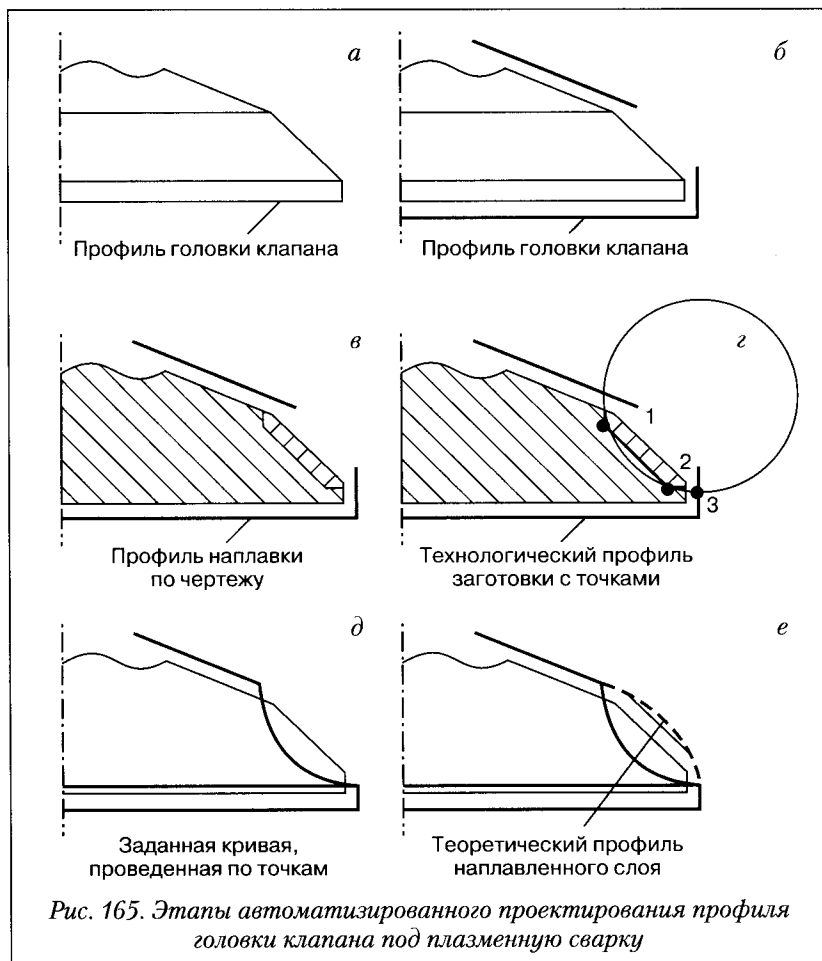


Рис. 165. Этапы автоматизированного проектирования профиля головки клапана под плазменную сварку

- наносят на чертеж точки, определяющие границы наплавленного слоя (рис. 165, в) (по данным чертежа);
- по полученным точкам 1–3 (рис. 165, з), определяющим границы наплавленного слоя и профиль головки клапана, проводят заданную кривую (окружность, трапецию и т. д.), удаляют линии построения (рис. 165, д);
- строят теоретический профиль наплавленного слоя (рис. 165, е);
- с полученной модели снимают необходимые размеры (толщину и площадь сечения наплавленного слоя, припуски на механическую обработку).

Наплавку выполняют по двухдуговой схеме (рис. 166), которая позволяет изменять распределение вносимой тепловой энергии в систему «наплавляемый порошок—заготовка» за счет регулирования теплоты, выделяемой дугами прямого и косвенного действия. Энергия вспомогательной дуги (косвенного действия) расходуется на нагрев и частичное расплавление присадочного порошка, энергия основной дуги — на нагрев заготовки клапана и окончательное расплавление присадочного порошка. Регулирование тепловложения в деталь и глубины проплавления основы обеспечивает при этом возможность управления составом, структурой и физико-механическими свойствами наплавленного слоя.

Для повышения эксплуатационных свойств наплавленного слоя необходимо минимизировать содержание в нем железа, а также по-

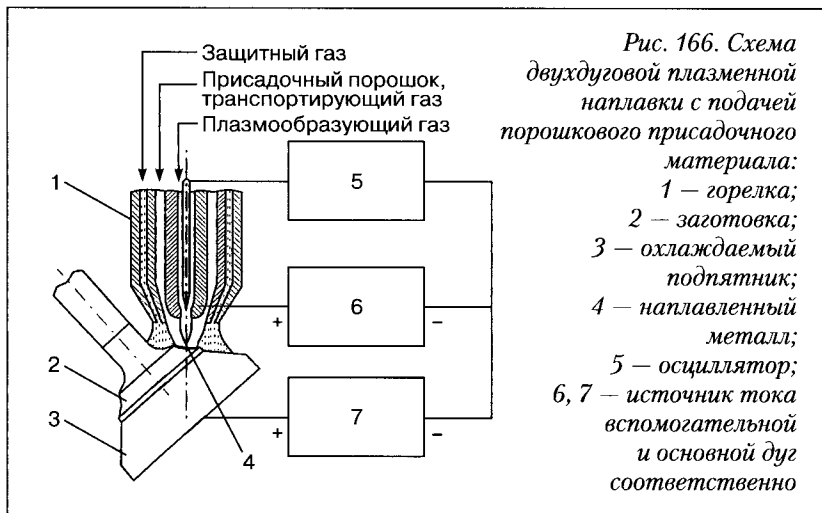


Рис. 166. Схема двухдуговой плазменной наплавки с подачей порошкового присадочного материала:

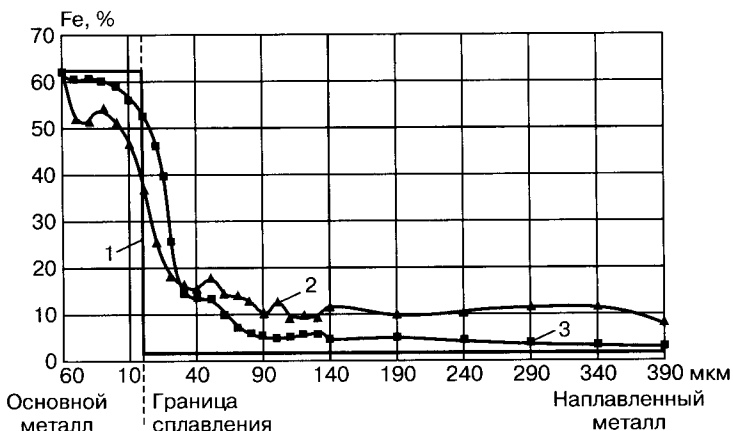


Рис. 167. Распределение содержания железа до (1) и после наплавки без модуляции (2) и с модуляцией (3) тока

ристость в наплавленном слое и на границе сплавления. Эти задачи решают, применяя при наплавке модуляцию тока.

Как показали исследования (рис. 167), благодаря модуляции тока содержание железа в наплавленном слое снижается с 7 до 2%. Пористость уменьшается на 10–12%.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа структуры металла наплавленного слоя показали, что металл представляет собой твердый раствор углерода в матрице из кобальта и никеля с включением карбидных составляющих. Длина дендритных кристаллов достигала 0,48 мм в наплавленном слое без модуляции тока и 0,2 мм при наплавке с модуляцией тока, что свидетельствует о положительном влиянии модуляции на структуру металла наплавленного слоя.

Производительность наплавки клапанов с применением модуляции тока 120–140 шт/ч.

### Плазменно-порошковая наплавка деталей запорной арматуры.

При изготовлении деталей запорной арматуры, применяемой в энергетическом, нефтехимическом, судовом и общем машиностроении, используют различные способы наплавки, отличающиеся производительностью, качеством и толщиной наплавленного слоя [210, 216]. Среди этих способов особо выделяется плазменно-порошковая наплавка, которая позволяет существенно повысить и стабилизировать качество наплавленных деталей, увеличить производительность,

улучшить условия труда и др. Согласно [216] брак при плазменной наплавке деталей арматуры не превышает 1%, а его появление напрямую связано с нарушением технологического процесса.

**Детали арматуры для судостроительной и химической промышленности** эксплуатируются в коррозионной среде различной интенсивности и в условиях трения металла о металл с высокими удельными нагрузками. Для наплавки таких деталей обычно используют сплавы на основе кобальта. При этом установлено, что металл системы легирования «кобальт-хром-вольфрам-углерод» с содержанием углерода 1,3–1,7%, наплавленный плазменно-порошковым способом, обладает значительно большей стойкостью против образования трещин, чем металл, наплавленный вручную электродами ЦН-2 [216].

В качестве основного металла для судовой арматуры используют различные цветные металлы, в частности бронзу (клинкетные задвижки). При наплавке кобальтового сплава 90X30K55B5H7P и никелевых сплавов НХ15СР2, НХ25С5Р на бронзу БрАЖНМц9-4-4-1 плазменно-порошковым способом кристаллизованный или диффузионная прослойка отсутствует, и соединение характеризуют удовлетворительная прочность и коррозионная стойкость.

При наплавке кобальтовых сплавов на стальную основу существует опасность появления горячих трещин. Лучшую стойкость против образования трещин обеспечивают стеллиты, содержащие 0,5–0,9% бора.

Для наплавки уплотнительных поверхностей судовой и химической аппаратуры предложен порошок ПП-АН34 (ПР-КХ30Н6ВСР) на основе кобальта с добавкой бора, обеспечивающий твердость 44–48 НРС<sub>3</sub> наплавленного металла.

Однако полностью отказаться от предварительного нагрева при наплавке кобальтовых сплавов не удастся. Поэтому применяют предварительный нагрев, а минимального проплавления основы достигают, регулируя режимы плазменно-порошковой наплавки.

Хорошо зарекомендовала себя плазменно-порошковая наплавка сплавами на основе меди. Например, применение плазменной наплавки деталей судовой арматуры порошком ПР-БрАЖНМц8,5-4-5-1,5 взамен аргонодуговой наплавки позволило в 3–8 раз повысить производительность труда и в 2 раза сократить расход прирабочного металла.

Плазменно-порошковую наплавку широко применяют при изготовлении **энергетической запорной арматуры** для трубопрово-

дов пара с температурой до 570°C, давлением до 26 МПа и воды с температурой 280°C, давлением 38 МПа.

При наплавке запорной энергетической арматуры толщина наплавленного слоя обычно составляет 3,8–4,2 мм, а после механической обработки —  $3\pm 0,5$  мм. При дуговой наплавке эти толщины равны соответственно 12–15 и 9–10 мм, при автоматической наплавке под флюсом — 10–12 и 7–9 мм.

Разработана промышленная технология плазменно-порошковой наплавки Ni-Cr-Si-B-C-сплавов на детали запорной энергетической арматуры, по которой ежегодно наплавливают десятки тысяч штук седел и тарелок с Ду 100–400 мм на предприятиях России и Чехии [216].

При плазменно-порошковой наплавке отказы в работе тарелок (до появления трещин на уплотнительных поверхностях) появляются через 46,7 тыс. ч, для седел — 210 тыс. ч.

Плазменная наплавка оказалась эффективной как при изготовлении, так и при восстановлении изношенных шиберов и седел **нефтегазовой запорной аппаратуры**. При этом гарантируется безопасность работы наплавленных деталей в течение не менее 10 лет [216].

При эксплуатации терминальных систем и линейной части трубопроводов для гидротранспорта грузов на предприятиях горнорудной (добыча и переработка руд черных и цветных металлов), угольной (обогащительные фабрики, гидродобыча), цементной и других отраслей промышленности необходима **износостойкая арматура**.

Значительно повысить ресурс шиберной и клиновой арматуры с Ду 100–400 мм, работающей при гидротранспортировке угля (давление от 1 до 16 МПа), позволила плазменно-порошковая наплавка.

**Наплавка режущего инструмента.** Плазменно-порошковую наплавку успешно применяют для многолезвийного инструмента (концевых фрез, метчиков и т. п.), а также режущих кромок дисковых и плоских ножей различного назначения, ленточных и дисковых пил [210, 211]. В качестве наплавочных материалов используют порошки быстрорежущих сталей, а также сплавов, содержащих ванадий.

**Оборудование для плазменной наплавки.** Современное универсальное и специализированное оборудование для различных способов плазменной наплавки создано на блочно-модульном принципе. Основными узлами оборудования для плазменной наплавки являются плазмотрон, механизмы перемещения плазмотрона в вертикальной и горизонтальной плоскостях, механизм колеба-

ния плазмотрона, устройство для подачи присадочного (электродного) материала, аппаратура питания газами, шкаф управления и источник питания. В состав установок для плазменной наплавки могут входить вращатели (универсальные, горизонтальные) и другое оборудование, предназначенное для перемещения наплавляемых изделий со скоростью наплавки и маршевой скоростью. Подробное описание оборудования для плазменной наплавки приведено в [210, 211].

### 3.3. Плазменное напыление

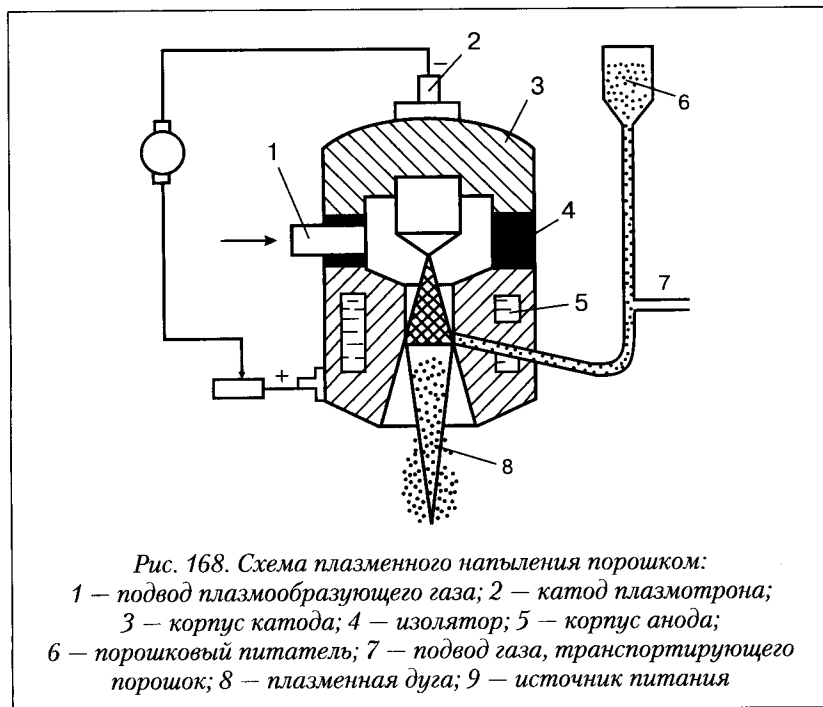
Плазменное напыление является одним из способов газотермического нанесения покрытий. В основе этого процесса лежит нагрев напыляемого материала до жидкого или пластического состояния и его перенос высокотемпературной плазменной струей к подложке с последующим образованием слоя покрытия [169, 219, 221, 222].

#### **Способы плазменного напыления и применяемые материалы.**

При плазменном напылении в качестве напыляющих материалов применяют порошки, проволоку, прутки. Наиболее широко распространено напыление порошками. Схема выполнения плазменного напыления с использованием порошка показана на *рис. 168*. В плазмотроне, состоящем из водоохлаждаемого катодного узла (катод 2 и корпус 3) и анодного узла, с помощью источника 9 постоянного сварочного тока возбуждается плазменная дуга 8, которая горит стабильно благодаря стенкам канала сопла и плазмообразующему газу, поступающему через подвод 1. Порошок подают из порошкового питателя 6 с помощью газа по подводу 7.

Температура плазменной струи достигает 5000–55000°C, а скорость истечения — 1000–3000 м/с. В плазменной струе частицы порошка расплавляются и приобретают скорость 50–500 м/с. Скорость полета частиц порошка зависит от их размера, плотности материала, силы сварочного тока дуги, природы и расхода плазмообразующего газа, конструкции плазмотрона. Порошок вводят в плазменную струю ниже среза сопла, на срез сопла или непосредственно в сопло. Нагрев напыляемых деталей не превышает 100–200°C.

К преимуществам способа плазменного напыления относят возможность получения покрытий из большинства материалов, плавящихся без разложения и ограничения по температуре плавления. Производительность плазменного напыления достаточно высока:

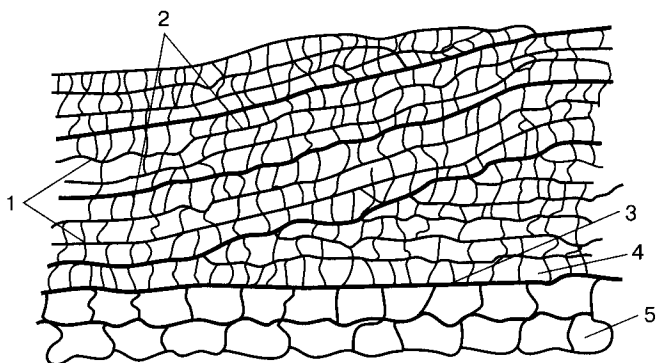


3–20 кг/ч для плазматронов с электрической мощностью 30–40 кВт и 50–80 кг/ч для плазматронов мощностью 150–200 кВт.

Плазменным напылением наносят покрытия как на плоские поверхности, так и на тела вращения и криволинейные поверхности. Для покрытия характерна слоистая структура с высокой неоднородностью физических и механических свойств (рис. 169). Тип связей между покрытием и деталью (подложкой), а также между частицами покрытия обычно смешанный — механическое сцепление, сила физического и химического взаимодействий. Прочность сцепления проверенного покрытия с подложкой при испытаниях на нормальный отрыв обычно 10–50 МПа.

Физические особенности формирования покрытий обуславливают появление пор. По мере увеличения толщины наносимого слоя открытые поры перекрываются и пористость покрытия снижается. Поэтому плотность плазменных покрытий отличается от плотности материала и колеблется в пределах 80–97%. Обычно пористость плазменных покрытий составляет 10–15%.





*Рис. 169. Схема структуры плазменного покрытия:  
 1 — граница между частицами напыленного материала; 2 — граница между слоями; 3 — граница между покрытием и деталью;  
 4 — частица напыленного материала; 5 — поверхность детали*

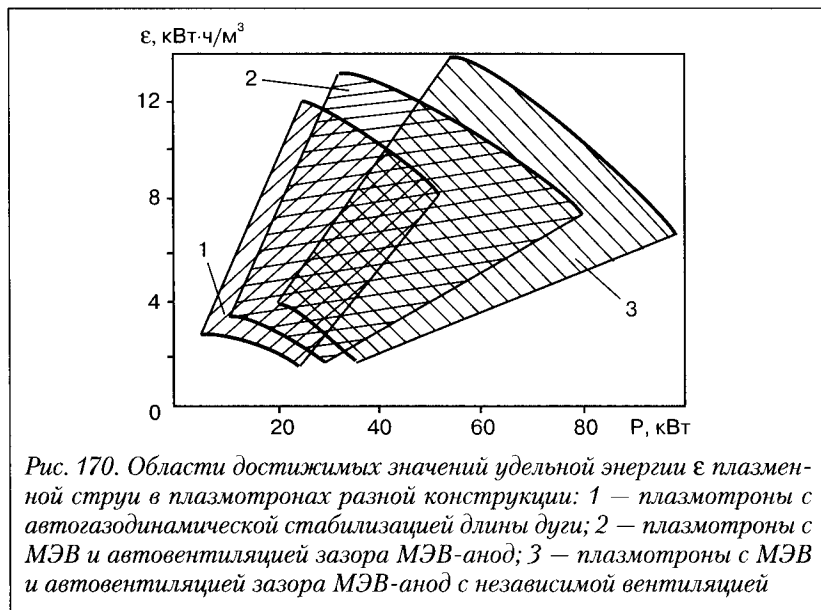
Толщина покрытия практически не ограничена возможностями самого способа. Однако в силу физических особенностей процесса образования покрытий с увеличением толщины наносимого слоя в нем возрастают внутренние напряжения, которые стремятся оторвать покрытие от подложки. Поэтому обычно толщина покрытия не превышает 1 мм. Нагрузку несет материал детали, а материал покрытия придает поверхности детали такие свойства, как твердость, износостойкость и т. п.

В качестве плазмообразующих газов применяют аргон, азот высокой чистоты, водород, гелий, а также смеси этих и других газов. В последние десятилетия успешно развивается плазменное напыление с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном) [184]. Плазма продуктов сгорания воздуха с горючим углеводородным газом отличается высокими значениями теплоемкости и теплопроводности, легкостью регулирования окислительно-восстановительного потенциала и относительно малой стоимостью. Это особенно важно при увеличении мощности плазмотрона и переходе к сверхзвуковым скоростям истечения плазмы, когда оптимальные режимы смещаются в область больших расходов плазмообразующего газа и снижается время контакта частиц с окружающей атмосферой.

Для генерирования плазмы используют различные плазмотроны. Эффективность преобразования электрической энергии дуги в тепловую энергию плазменной струи, а также технологические возможности плазмотрона зависят от конкретной конструкции, диапазона и уровня удельных мощностей. На *рис. 170* [234] показано, что в диапазоне мощностей  $P$  до 50 кВт для напыления могут быть использованы плазмотроны с автогазодинамической стабилизацией дуги, обеспечивающие достаточно высокий КПД (75–80%) и хорошие эксплуатационные характеристики. Диапазон более высоких мощностей (50–150 кВт) принадлежит плазмотронам с одиночной межэлектродной вставкой (МЭВ).

При разработке конструкции плазмотрона главной задачей является задача создания простой, ремонтпригодной конструкции, обеспечивающей стабильную длительную работу в широком диапазоне изменения силы сварочного тока дуги, расхода и состава плазмообразующего газа, а также генерирование плазменной струи с воспроизводимыми параметрами, что позволяет эффективно выполнять напыление на материалы с различными свойствами [184].

В практике для напыления применяют как однородные порошки различных материалов (металлов, сплавов, оксидов, бескисло-



*Рис. 170. Области достижимых значений удельной энергии  $\epsilon$  плазменной струи в плазмотронах разной конструкции: 1 — плазмотроны с автогазодинамической стабилизацией длины дуги; 2 — плазмотроны с МЭВ и автовентиляцией зазора МЭВ-анод; 3 — плазмотроны с МЭВ и автовентиляцией зазора МЭВ-анод с независимой вентиляцией*

родных тугоплавких соединений), так и композиционные, а также механические смеси указанных материалов [221].

Наиболее распространены следующие материалы:

- **металлы** — Ni, Al, Mo, Ti, Cr, Cu;
- **сплавы** — легированные стали, чугуны, никелевые, медные, кобальтовые, титановые, в том числе самофлюсующиеся сплавы (Ni-Cr-B-Si, Ni-B-Si, Co-Ni-Cr-B-Si, Ni-Cu-B-Si);
- **оксиды** Al, Ti, Cr, Zr и других металлов и их композиции;
- **бескислородные тугоплавкие соединения и твердые сплавы** — карбиды Cr, Ti, W и др., а также их композиции с Co и Ni;
- **композиционные плакированные** — Ni-графит, Ni-Al и др.;
- **композиционные конгломерированные** — Ni-Al, NiCrBSi-Al и др.;
- **механические смеси** —  $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{NiCr}$ ,  $\text{NiCrBSi} + \text{Cr}_3\text{C}_2$  и др.

Применяя порошки из композиционных смесей при газотермическом напылении, преследуют следующие цели:

- использование экзотермического эффекта взаимодействия компонентов (Ni-Al, Ni-Ti и т. п.);
- равномерное распределение компонентов, например, типа керметов (Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$  и т. п.) в объеме покрытия;
- защита материала ядра частицы от окисления или разложения при напылении (Co-WC, Ni-TiC и т. п.);
- формирование покрытия с участием материала, самостоятельно не образующего покрытия при газотермическом напылении (Ni-графит и т. п.);
- улучшение условий формирования покрытий за счет увеличения средней плотности частиц, введения компонентов с высоким теплосодержанием.

Применяемые для напыления порошки не должны разлагаться или переходить из одной фазы в другую в процессе напыления, а должны иметь достаточную разницу между температурами плавления и кипения (не менее  $200^\circ\text{C}$ ).

В последние годы усилился интерес к нанодисперсным материалам, в том числе нанодисперсным порошкам из металлов и химических соединений. Особые свойства получаемых высокодисперсных сред определяют области их возможного применения: в металллокерамике, в качестве активаторов компактирования, добавок к смазочным маслам, пигментов, модификаторов металлов и сплавов, катализаторов, нанокompозитных покрытий.

Следует отметить, что одним из новых направлений является получение нанопорошков с размерами частиц 1–30 нм и меньше

при помощи воздействия химически активной термической плазмы [217].

Уникальные свойства нанокристаллических материалов используют при нанесении покрытий, требования к эксплуатационным характеристикам которых (твердости, износостойкости, коррозионной и эрозионной стойкости, специальным свойствам и т.д.) постоянно возрастают. Покрытия с нанокристаллической структурой получают способами газотермического напыления (ГТН), в том числе плазменным, используя при этом нанопорошки.

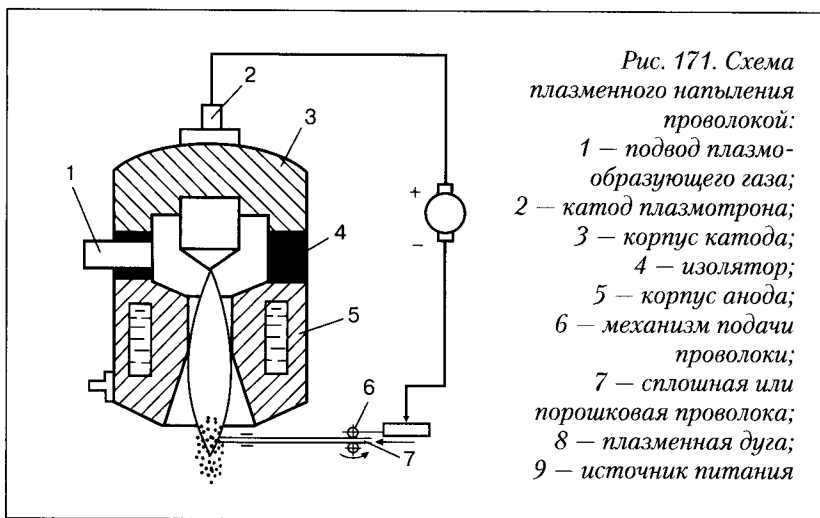
Исследования последних лет в области газотермического напыления нанопорошками сфокусированы на напылении двух основных групп материалов: оксидной керамики ( $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  и их сочетаний) на поверхности двигателей в целях повышения их КПД и керметов (на основе  $WC$ ,  $Cr_3C_2$ ,  $Al_2O_3$ ) для повышения износостойкости поверхности изделий [218].

Установлено, что структура наноструктурных покрытий отличается более высокой плотностью и дисперсностью по сравнению со структурой покрытий из обычных порошков; прочность сцепления их с основой также выше. Макроструктура этих покрытий и их свойства зависят от параметров выполнения напыления в меньшей степени, чем микроструктура и свойства покрытий при применении обычных микронных порошков. При напылении керметов происходит аморфизация металлической связки ( $Co$ ,  $Ni$ ,  $NiCr$ ) с выделением наноразмерных включений, что является дополнительным резервом упрочнения таких покрытий.

Микромеханические свойства наноструктурных покрытий, напыленных нанопорошками (модуль упругости, коэффициент пластичности, сопротивление ползучести), существенно выше, чем у напыленных порошками обычного размера.

Износостойкость наноструктурных покрытий как при абразивном изнашивании, так и при трении скольжением более чем в 2 раза выше, чем у покрытий из обычных порошков. Объясняют это изменением механизма износа: нанокompозитным покрытиям свойственен механизм вязкого разрушения, а покрытиям, напыленным обычными порошками, — механизм хрупкого разрушения.

В качестве напыляемого материала при плазменном напылении используют также проволоку [225]. Плазменное напыление с распылением проволоки (рис. 171) осуществляют двумя способами: нейтральной проволокой и проволокой-анодом. В первом случае нагрев, плавление и распыление нейтральной проволоки осуществ-



ляют плазменной струей, а во втором на проволоку-анод подают положительный потенциал источника питания дуги, а нагрев и плавление проволоки происходят преимущественно за счет выделения теплоты в анодном пятне. Плазменная струя в основном выполняет функции распыления.

На *рис. 172* показана схема плазменно-дугового напыления покрытий токоведущей проволокой с одновременной зачисткой слоев металлической щеткой [223]. Напыление осуществляют слоями толщиной 0,05–0,10 мм, одновременно обрабатывая каждый последующий слой специальной вращающейся металлической щеткой. Непрерывная механическая обработка поверхностного слоя основы, совмещенная во времени с процессом напыления, создает благоприятные условия для напыления покрытий большой толщины (15–20 мм). Прочность покрытия на отрыв 40–55 МПа. Плотность покрытия, полученного распылением проволоки из стали 65Г, — 93–96% плотности исходного материала, а плотность покрытия, полученного распылением проволоки 04Х20Н11МЗДТ, — 98%. Пористость покрытий 1–4%. Производительность процесса 2–10 кг/ч.

Технология плазменно-дугового напыления токоведущей проволокой позволяет наносить покрытия на металлические изделия любой проволокой, в том числе порошковой и проволокой из цветных металлов и сплавов; на многослойные покрытия из различных материалов, в том числе антикоррозионные покрытия; на металли-

ческие покрытия и неметаллические изделия (пластмасса, бетон, кирпич, графит и т. д.); на композитные покрытия одновременным распылением нескольких проволок различного состава; на внутренние поверхности тел вращения диаметром более 200 мм [223].

Применение плазменных установок мощностью 30–60 кВт для напыления мелких деталей, узких кромок или дорожек ведет к большим потерям напыляемого материала и необходимости введения дополнительных операций. Для устранения этих недостатков предложен способ микроплазменного напыления [224]. Его выполняют квазиламинарной плазменной струей, образованной плазмотроном мощностью до 2 кВт при силе сварочного тока 20–50 А. Способ позволяет напылять узкие дорожки шириной 1–3 мм при толщине 0,2–0,5 мм из различных материалов. При микроплазменном напылении на коротких дистанциях никелевого саморазогревающегося сплава с температурой плавления около 1000°С одновременно происходит процесс

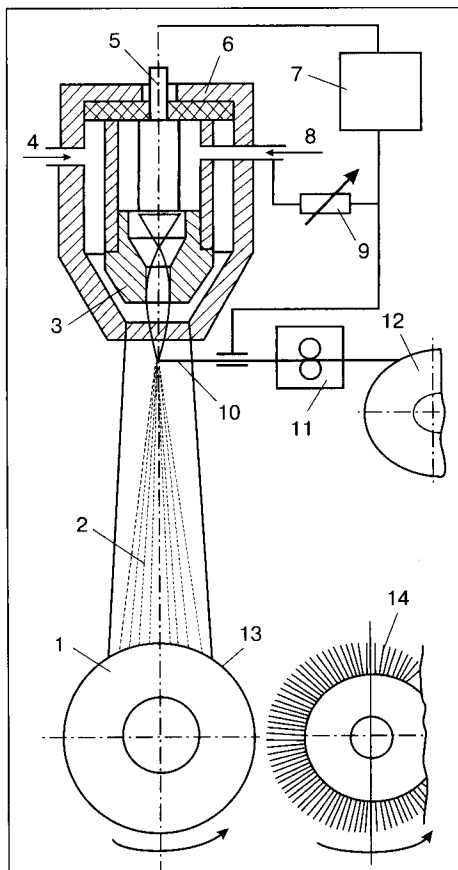


Рис. 172. Схема плазменно-дугового напыления покрытий из проволочных материалов: 1 — изделие; 2 — поток частиц напыляемого материала; 3 — плазмообразующее сопло; 4 — сжатый воздух; 5 — катод; 6 — плазмотрон; 7 — плазмообразующий газ; 8 — источник питания; 9 — балластное сопротивление; 10 — распыляемая проволока; 11 — подающий механизм; 12 — кассета с проволокой; 13 — покрытие; 14 — вращающаяся металлическая щетка

оплавления с образованием плотной, литой структуры покрытия. Низкая тепловая мощность микроплазменной струи позволяет уменьшить нагрев основы, что обеспечивает нанесение покрытий на изделия малых размеров и с тонкими стенками без существенного локального перегрева и коробления. Уровень шума при напылении ламинарной плазменной струей 30–50 дБ.

Микроплазменное напыление рекомендуют использовать для упрочнения и ремонта различных мелких деталей текстильных машин, в полиграфии, табачной промышленности, а также при изготовлении нагревательных элементов, имплантантов и др. При микроплазменном напылении используют также проволоку [226]. Таким способом напыляют покрытия из стальной, медной, вольфрамовой и нихромовой проволоки.

Одним из способов, позволяющим повысить качество газотермических покрытий, особенно из металлов и материалов, подверженных разложению, окислению, азотированию, является плазменное нанесение покрытий в камере с контролируемой по составу и давлению средой [222]. Для этих целей применяют также защитные сопловые насадки, создающие закрытое пространство между распылителем и изделием, заполненное плазмообразующим или защитным газом.

Лучшие результаты получают при плазменном напылении покрытий в динамическом вакууме. При этом истечение струи происходит в вакуумную камеру, из которой непрерывно откачивают рабочие газы, причем скорость струи превышает скорость звука в 2–3 раза, скорость напыляемых частиц материала увеличивают до 800 м/с. Получают более плотные, чем обычно, покрытия, характеризующиеся прочным сцеплением с основным материалом детали.

Необходимо подчеркнуть, что использование сверхзвуковых струй при газотермическом напылении является одним из главных направлений современного развития этой технологии [184, 227, 228]. Повышение скорости и кинетической энергии частиц напыляемого материала позволяет, с одной стороны, улучшить условия формирования покрытий, а с другой — ограничить вредное воздействие окружающей среды и снизить интенсивность процессов термического разложения материалов.

В мировой практике сверхзвуковое плазменное напыление выполняют с помощью установок «Plazjet-II-200». В качестве рабочего газа используют азот или смесь азота с водородом и аргоном [227]. При мощности установки 200 кВт температура струи дости-

гает 6600°C, скорость частиц в 6–8 раз выше, чем при обычном напылении. Расход порошка оксида алюминия до 12 кг/ч и карбида вольфрама — 40 кг/ч.

Специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона и Института газа разработаны технология и оборудование для сверхзвукового напыления с использованием плазмы продуктов сгорания углеводородных газов с воздухом [184, 227]. Плазмотрон генерирует слаборасширенную струю плазмы продуктов сгорания со степенью недорасширения 1,1–3,0 мм и скоростью истечения до 3000 м/с. Измерения показали, что скорость частиц на дистанции напыления 250–300 мм с использованием порошка WC–12Co — 480 м/с, оксида алюминия — 420 м/с, оксида хрома — 430 м/с, железоникелевого сплава — 500 м/с.

Существует возможность регулировать температуру в пределах 3500–6500 К, что позволяет эффективно напылять как легкоплавкие материалы (алюминий и его сплавы), так и тугоплавкие (например, диоксид циркония). Пористость покрытия на оптимальных режимах составляет 0,5–3,0%, а прочность сцепления — 60–120 МПа. Производительность напыления оксида алюминия достигает 20 кг/ч, а вольфрам-кобальтовых твердых сплавов — 40 кг/ч.

В настоящее время сверхзвуковое плазменное напыление находит все более широкое применение [184]. Технологический процесс нанесения плазменных покрытий в зависимости от условий и типа производства, особенностей конструкции изделий и покрытий содержит различные операции, которые могут быть объединены в следующие группы:

- подготовка поверхности деталей к нанесению плазменных покрытий;
- технология нанесения плазменных покрытий и дополнительная обработка нанесенных покрытий для улучшения их свойств;
- размерная обработка покрытий.

**Подготовка поверхности деталей к нанесению плазменных покрытий.** Размеры деталей должны быть уменьшены на толщину напыляемых покрытий, которую выбирают, руководствуясь рекомендациями, приведенными в работе [221]. Участок поверхности изделия, подлежащий напылению, должен иметь плавные переходы к примыкающим поверхностям либо соответствующую конфигурацию. Покрытия на пазы и глухие отверстия следует наносить при отношении ширины или диаметра отверстия к его глубине не менее 2 мм.



Степень очистки поверхности деталей от загрязнения во многом определяет качество нанесенных покрытий. Наличие на поверхности грязи, оксидных пленок, масла уменьшает прочность сцепления покрытия с металлом детали, и это может послужить причиной неисправимого брака. Особое внимание уделяют восстанавливаемым деталям, имеющим почвенные загрязнения, остатки топливно-смазочных материалов, продукты коррозии и др. Очистку производят различными способами: механическим, струйным, погружением, циркуляционным, комбинированным и др.

При подготовке поверхность обезжиривают органическими растворителями, моющими составами, щелочными растворами и эмульсиями по ГОСТ 9–402–80, затем промывают водой. После этого детали сушат в сушильном шкафу при температуре 60–150°C или обдувают сжатым воздухом. В отдельных случаях обезжиривают уайт-спиритом или бензином, соблюдая соответствующие правила промсанитарии и противопожарной безопасности. Детали, содержащие глубокие пазы, масляные каналы и другие места, затрудняющие удаление загрязнений, кроме поверхностного обезжиривания нагревают в печи при температуре 220–340°C в течение 2–3 ч для выгорания масла.

Предварительная обработка деталей перед напылением включает также активацию поверхности, которая состоит в создании определенной шероховатости, влияющей на прочность сцепления посредством изменения интенсивности физико-химического взаимодействия контактирующих материалов [221, 229]. Механическое сцепление напыляемых частиц с основой происходит за счет их растекания и заклинивания. Поэтому прочность сцепления во многом определяется шероховатостью поверхности ( $Ra$  – среднеарифметическое отклонение профиля микрорельефа;  $Rz$  – высота неровностей микрорельефа).

Установлено, что прочность сцепления покрытия при различных способах предварительной обработки основы изменяется. Деформирование и растекание напыляемых частиц на шероховатой поверхности зависит от топографии поверхности и, прежде всего, от шага неровностей. Если впадина слишком узкая, то напыляемая частица будет затекать в смежную впадину. При слишком широкой впадине малые напыляемые частицы могут не заклиниваться в ней и разбрызгиваться. Покрытие формируется преимущественно в канавках. На выступах образуется слой относительно меньшей толщины.

**Таблица 119. Скорость полета дроби, м/с, в зависимости от ее диаметра и длины разгонного участка сопла дробеструйного аппарата**

Длина разгонного участка сопла, мм	Условный диаметр дроби, мм					
	круглой			колотой		
	1	2	3	1	2	3
10	29,0	20,6	16,8	36,8	26,4	21,3
20	41,0	29,0	23,6	52,0	36,7	29,9
40	58,2	41,0	33,5	74,0	52,0	42,0
60	71,5	50,7	41,7	90,5	64,2	52,2

Активацию поверхности осуществляют различными способами. Однако наиболее распространены пневмоструйная обработка и нарезание рваной резьбы. При пневмоструйной обработке происходит преобразование энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию металлической дроби или абразива. Струя дроби или абразива характеризуется скоростью и углом рассеивания. Пространственный угол рассеивания струи дроби (абразива) при выходе из сопла дробеструйного аппарата является постоянной величиной, равной 28–30° [230]. Скорость дроби или абразива зависит от скорости энергоносителя (сжатого воздуха), длины разгонного участка сопла, размеров, формы и массы частиц.

Значения предельных скоростей полета дроби при рабочем давлении в сети 0,6 МПа и температуре воздуха +20°С приведены в табл. 119 [230].

При прочих равных условиях частицы с меньшей массой имеют большую начальную скорость, равно как и частицы с большим поперечным сечением. При одинаковых значениях давления сжатого воздуха и твердости поверхности ее микропрофиль является функцией вида и размера применяемой дроби или абразива. Степень воздействия дробинки или любой другой частицы абразива на поверхность зависит от скорости их полета и массы.

Параметры пневмоструйной обработки зависят от физико-механических свойств абразива, давления сжатого воздуха, скорости его истечения из сопла, расстояния до обрабатываемой поверхности, а также от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

При контакте абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью часть их врезается в металл, снимая стружку, вторая часть

скользит по поверхности, а третья часть, попадая на металлическую поверхность, выдавливает металл в стороны.

На параметры струйно-абразивной обработки влияет концентрация абразивно-воздушной смеси, т. е. отношение массы воздуха, проходящего через сопло в единицу времени, к массе абразива, выбрасываемого соплом за этот период. Концентрация абразивной смеси зависит от размера частиц и марки абразива, ее значение может колебаться в пределах 0,8–4,0 кг/кг. Наибольший удельный объем удаляемого металла получают при высоких концентрациях абразива в струе. Однако большая насыщенность абразивного потока ведет к увеличению изнашивания абразива.

Обычно в качестве абразивных материалов при плазменном напылении используют электрокорунд зернистостью 80–150 по ГОСТ 3647–80 или металлическую дробь ДЧК, ДСК №01, 02, 03, 05 по ГОСТ 11964–81Е.

Интенсивность изнашивания частиц зависит от свойств абразива и обрабатываемой поверхности. Стойкость абразива определяют количеством циклов использования абразивного материала до полной его непригодности. Абразив из стальной рубленой проволоки выдерживает до 5000 циклов. Дробь ДЧК после 150 циклов становится непригодной для дальнейшего использования. Абразив из электрокорунда может быть использован до 30 раз.

Металлическую дробь применяют для обработки материалов с твердостью до 50 HRC<sub>2</sub>. Она не пригодна для подготовки поверхности под напыление жаростойких и коррозионностойких покрытий, а также для деталей, изготовленных из цветных металлов и сплавов.

Детали, подвергаемые струйно-абразивной обработке, должны иметь комнатную температуру. Шероховатость поверхности после обработки должна быть  $Rz = 10...60$  мкм в зависимости от материала детали. Участки поверхности детали, не подлежащие напылению, должны быть защищены экранами или другими приспособлениями. Зона обработки должна быть на  $5 \pm 2$  мм больше зоны напыления. При толщине стенки детали менее 0,5 мм необходимо применять специальные приспособления и соблюдать меры предосторожности, исключающие чрезмерное снятие материала детали и ее коробление. После абразивно-струйной обработки деталь обдувают сжатым воздухом для удаления частиц абразива. Угол атаки струи абразива (угол между осью струи абразива и плоскостью очищаемой поверхности) изменяют от 30 до 90°. Для очистки поверхности

мягких материалов рекомендуют меньшие значения угла, а для очистки поверхности более твердых — большие.

При давлении воздуха 0,3–0,6 МПа расстояние от среза сопла струйно-абразивного аппарата до обрабатываемой поверхности должно быть 80–200 мм. Большие расстояния рекомендуют при обработке мягких поверхностей, меньшие — при обработке более твердых. Обрабатываемая поверхность должна быть матовой, серого цвета, без блестящих участков.

Перерыв между струйно-абразивной обработкой и нанесением покрытий не должен превышать 2–4 ч, а при напылении быстроокисляющихся поверхностей, например алюминия, — не более 1 ч. Детали после струйно-абразивной обработки перемещают в хлопчатобумажных перчатках или чистым инструментом.

При подготовке поверхности деталей типа тел вращения для нанесения покрытий значительной толщины (более 0,5 мм) часто используют нарезание рваной резьбы. Такой способ подготовки поверхности обеспечивает высокую прочность сцепления при сдвиге покрытия с поверхности детали. Резьбу нарезают обычным резьбовым резцом с верхним углом 55–60°. Высота угла имеет радиус закругления 0,3–0,5 мм. Угол резания 80°, а передний угол резца отрицателен или равен нулю. Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом 100–150 мм. Необходимую шероховатость получают за счет смещения режущей кромки резца ниже оси детали.

Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к шероховатости. Шаг рваной резьбы выбирают в зависимости от диаметра обрабатываемой детали: при диаметре до 20 мм — 0,5 мм; 25–50 мм — 0,8–1,0 мм; 60–100 мм — 1,5 мм. При нарезке нельзя применять охлаждающие жидкости. Рваную резьбу нарезают за один проход. Параметры рваной резьбы подбирают экспериментальным путем для каждого материала и толщины напыляемого покрытия.

Существуют и другие способы механической обработки поверхности перед напылением деталей [221].

**Технология нанесения и обработки плазменных покрытий.** При выборе порошков для получения различных плазменных покрытий необходимо учитывать следующие положения.

Гранулометрия частиц применяемых порошков имеет первостепенное значение, так как от нее зависят производительность и коэффициент их использования, а также свойства покрытий. Размер частиц порошка выбирают в зависимости от характеристик источ-

**Таблица 120. Классификация порошков по группам и granulometрии частиц**

Класс	Размер частиц, мкм	Остаток на сетке №005, %	Прохождение через сито, %, не менее, при номерах сеток					
			04	0135	02	016	0125	005
К (крупный)	50–135	Не менее 95	100	95	—	—	—	—
С (средний)	50–160		—	—	100	95	—	—
М (мелкий)	50–125		—	—	—	100	95	—
П (пыль)	Менее 50	Не более 4	—	—	—	—	—	96

ника тепловой энергии, теплофизических свойств напыляемого материала и его плотности.

Обычно при напылении мелкодисперсного порошка получают более плотное покрытие, хотя в нем содержится большое количество оксидов, возникающих в результате нагрева частиц и их взаимодействия с высокотемпературным потоком плазмы. Чрезмерно крупные частицы не успевают прогреться, поэтому не образуют достаточно прочной связи с поверхностью и между собой или просто отскакивают при ударе. При напылении порошка, состоящего из смеси частиц разных диаметров, более мелкие частицы расплавляются в непосредственной близости от места их подачи в сопло, заправляют отверстие и образуют наплывы, которые время от времени отрываются и в виде больших капель попадают на напыляемое покрытие, ухудшая его качество. Поэтому напыление предпочтительно выполнять порошками одной фракции, а все порошки перед напылением следует классифицировать.

Для проведения классификации порошков применяют металлические тканые сетки с квадратными ячейками нормальной точности по ГОСТ 6613–73. Классификация порошков по группам и granulometрии частиц приведена в *табл. 120*.

Для керамических материалов оптимальный размер частиц порошка 50–70 мкм, а для металлов — около 100 мкм. Порошки, предназначенные для напыления, должны иметь сферическую форму. Они обладают хорошей сыпучестью, что облегчает их транспортировку к плазматрону.

Почти все порошки гигроскопичны и могут окисляться, поэтому их хранят в закрытой таре. Порошки, находившиеся некоторое время в открытой таре, перед напылением прокаливают слоем

5–10 мм в сушильном шкафу из нержавеющей стали при температуре 120–130°С в течение 1,5–2 ч.

Порошок для напыления выбирают с учетом условий эксплуатации напыляемых деталей [221]. Практическое применение плазменного напыления порошками, выпускаемыми НПО «Тулачермет» и Торезским заводом наплавочных твердых сплавов (ТЗНТС), отражено в табл. 121.

<b>Таблица 121. Практическое применение плазменного напыления порошками</b>	
<i>Марка, тип</i>	<i>Цель напыления</i>
НПО «Тулачермет»	
Никель-алюминий ПН70Ю30	Защита экранных труб котельных агрегатов ГРЭС и ТЭЦ, деталей термического и металлургического оборудования, работающего в воздушной среде (до 1400°С). Износостойкие покрытия в некоторых парах трения. В композициях с оксидами обеспечивает получение теплозащитных покрытий
Никель-алюминий ПН35Ю15	Упрочнение подъемных шиберов холодильников прокатных станов, восстановление и упрочнение деталей и узлов автомобилей. Жаростойкие покрытия, работающие на воздухе при температуре до 1100°С. Шлифование можно обрабатывать точением. Износостойкие покрытия деталей, работающих в щелочных средах в парах трения с чугуном
Никель-титан ПН55Т45	Восстановление и упрочнение защитных втулок и валов гидронасосов, поверхностей плунжеров, штоков, упрочнение уплотнительных поверхностей валов щелочных насосов. Подслой для последующего напыления сталей и керамических материалов. Износостойкие покрытия, работающие в условиях изнашивания без ударных нагрузок, в условиях трения при наличии смазки. Коррозионностойкие покрытия деталей, работающих в щелочных средах (как правило, в сочетании с полимерными материалами)
Никель-титан ПТ88Н12	Износостойкие покрытия. Коррозионностойкие покрытия в сочетании с лакокрасочными, полимерными материалами. Упрочнение втулок насосных штанг, поршневых штоков грязевых насосов, вкладышей, полированных стержней
Титан-алюминий ПТ65Ю30	Жаростойкие покрытия деталей, работающих на воздухе. Упрочнение выхлопных глушителей, поддонов для отжига, наружных поверхностей печей для обжига

Марка, тип	Цель напыления
НПО «Тулачермет» (продолжение)	
<p>Самофлюсующие сплавы            ПР-Н80Х13С2Р,            ПР-Н77Х15С3Р2,            ПР-Н73Х16С3Р3,            ПР-Н70Х17С4Р4,            ПР-Н67Х18С5Р5,            ПР-Н65Х25С3Р3,            ПР-Н68Х21С5Р</p>	<p>Восстановление и упрочнение клапанов и распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, лопаток, роторов, вентиляторов, валов и втулок гидронасосов, деталей металлургического, горного оборудования, сельскохозяйственных машин и т. д. Беспористые уплотнительные слои на поверхностях арматуры высокого давления энергетических установок. Износостойкие коррозионностойкие покрытия, позволяющие эксплуатировать детали в условиях ударных нагрузок и в агрессивных средах с абразивным изнашиванием при температурах до 600°С. Повышение износостойкости в сочетании с высокотвердыми наполнителями: карбидами, боридами, оксидами и т. п.</p>
<p>Чугун            ПР-НД42СР</p>	<p>Исправление дефектов чугунного литья, восстановление изношенных пресс-форм, исправление дефектов, возникших при обработке</p>
<p>Кобальтовый сплав            ПР-К60Х30ВС (ВЗК)</p>	<p>Упрочнение ножей в целлюлозно-бумажной промышленности, гнезд выхлопных клапанов ДВС, клапанов высокотемпературных систем высокого давления, матриц для экструзионных прессов и других деталей машин, работающих в условиях высокотемпературного нагрева. Упрочнение обладает высокой стойкостью против стирания, повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью при высоких температурах, высокой твердостью</p>
<p>Высоколегированные стали:            ПР-Х18Н9,            ПР-06ХН28МДТ,            ПР-10Р6М5,            ПР-М6Ф3</p>	<p>Коррозионностойкие покрытия пористых изделий для фильтрации агрессивных жидкостей и газов штампового инструмента, работающего в условиях интенсивного изнашивания при ударных нагрузках, упрочнение рабочих поверхностей режущего инструмента, валков холодной прокатки и др.</p>
<p>ПР-Х18ФНМ</p>	<p>Упрочнение рабочих поверхностей пресс-инструмента при изготовлении деталей из пластмасс и др.</p>
<p>Высоколегированные чугуны:            ПГ-С27, ПГ-С1,            ПГ-УС25,            ПР-ЧН15Д7</p>	<p>Защита деталей металлургического, сельскохозяйственного, энергетического, горного и другого оборудования, работающего в условиях абразивного изнашивания при температурах до 500°С</p>

Марка, тип	Цель напыления
НПО «Тулачермет» (продолжение)	
Композиционные термореагирующие сплавы: Ni-Al – ПТ-Ю5Н, ПТ-Ю10Н	Подслои при напылении металлических, керамических и других покрытий, восстановление посадочных мест при ремонте. Упрочнение валов сервомоторов, качающихся балансирных рычагов, гильз цилиндров, статоров компрессоров в РД, седел выхлопных клапанов. Покрытие обладает высокой коррозионно- и жаростойкостью, умеренным сопротивлением изнашиванию и хорошим сопротивлением ударным нагрузкам
NiCrBSi-Al – ПТ-ЮНХ15СР2, ПТ-ЮНХ15СР3	Восстановительный ремонт, поверхностное упрочнение деталей машин. Упрочнение подшипников для рулей, валов роторов, роторов топливных насосов, коленвалов амортизаторов для штамповых прессов, поршневых колец ДВС. Наносят через подслои (ПТЮ5Н). Покрытия коррозионностойкие, хорошо сопротивляются изнашиванию и ударам
Бронзы Пр-Бр.АЖНМц, Пр-Бр.АЖНМц 8,5-1,5 – 5-1,5	Упрочнение вилок коробок передач автомобиля, баббитовых подшипников, патрубков гидравлических прессов, колодок упорных подшипников, направляющих поршней, деталей из конструктивных сталей, работающих в морской воде. Покрытия антифрикционные, износостойкие при условии смазки маслом
ТЗНТС	
Самофлюсующиеся сплавы NiCrBSi: ПГ-12Н-01	Упрочнение и восстановление поршней, валов, муфт насосов, направляющих лопаток, пресс-форм и пуансонов в стекольном производстве, деталей ДВС, деталей из простых и нержавеющей сталей и чугунов. Поверхности с достаточно низким коэффициентом трения, хорошо обрабатываются резанием
ПГ-12Н-02	Упрочнение и восстановление валов и пуансонов в стекольном производстве, поршней насосов, прокатных валов, направляющих роликов, остриев поддерживающих конусов, уплотнительных колец аппаратуры высокого давления, деталей запорной аппаратуры в гидро- и газопроводах деталей из простых и нержавеющей сталей и чугунов. Покрытие хорошо противостоит трению металла о металл, отлично сопротивляется коррозии и термическим ударам



Марка, тип	Цель напыления
ТЗНТС (продолжение)	
Механическая смесь самофлюсующегося сплава (65%) с карбидом вольфрама (35%) ПС-12НВК-01	Пары трения металл с металлом, лопасти смесителей для перемешивания абразивных сред, пуансоны прессов для керамики, транспортировочные и прессовые шнеки для кирпичного производства, отрезные ножи в стекольном производстве. Простые и легированные стали и чугуны. Покрытие износостойкое при стирании и эрозии в коррозионных средах. Допустимая рабочая температура не выше 700°С. Обрабатывается шлифованием
Композиционные терморегулирующие сплавы: Ni-Al – ПТ-НА-01	Подслои. Упрочнение воздушной заслонки компрессора РД, пластин и ребер жесткости клапана вентилятора в РД, крепления середины пролета (лопасти вентилятора), центра и задней бабки токарных и шлифовальных станков
NiCrBSi-Al – ПТ-19Н-01	Восстановление поршней гидравлических домкратов, шпинделей станков, опорных поверхностей, коленвалов и распределов. Покрытие коррозионностойкое, хорошо сопротивляется стиранию, устойчиво к фрикционному изнашиванию при трении металла о металл. Хорошо шлифуется
Бронза ПГ-19М-01	Восстановление поршней компрессоров, цапф различных машин и агрегатов, посадочных мест валов и осей, шпинделей станков. Низкий коэффициент трения
Композиционные WC-Ni, Cr3C2-Ni сплавы ВН-10, ВН-20, ВН-30, КХН-15, КХН-30	Детали машин и механизмов, работающие в условиях фреттинг-коррозии и абразивного изнашивания при обычных и повышенных (до 600°С) температурах. Направляющая закрылка самолета, статор компрессора

В мировой практике для газотермического напыления производят и применяют множество других марок и типов порошков [221].

В последние годы для получения аморфных газотермических покрытий разработаны специализированные порошки на никелевой и железной основах [231]. Аморфные покрытия получают способами плазменного, детонационного и газопламенного напыления. Эти покрытия отличаются повышенными значениями прочности сцепления с подложкой, износо- и коррозионной стойкостью. Установлено, что прочность сцепления у покрытий из сплавов  $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$ ,  $Ni_{45}Mo_{20}Cr_{25}B_{10}$  и  $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ , нанесенных плазмен-

ным способом на подложку из низколегированной стали, достигает 40–60 МПа. При этом долговечность деталей гидросистемы экскаваторов (валы масляных насосов, золотники) с аморфными плазменными покрытиями из сплавов на основе железа, а также деталей станков и металлообрабатывающего оборудования (направляющие, кулачки цанг, шпиндели, стержни хонинговальной головки) с аморфными покрытиями, полученными детонационным и плазменным напылением, повышается в 1,5–2,5 раза.

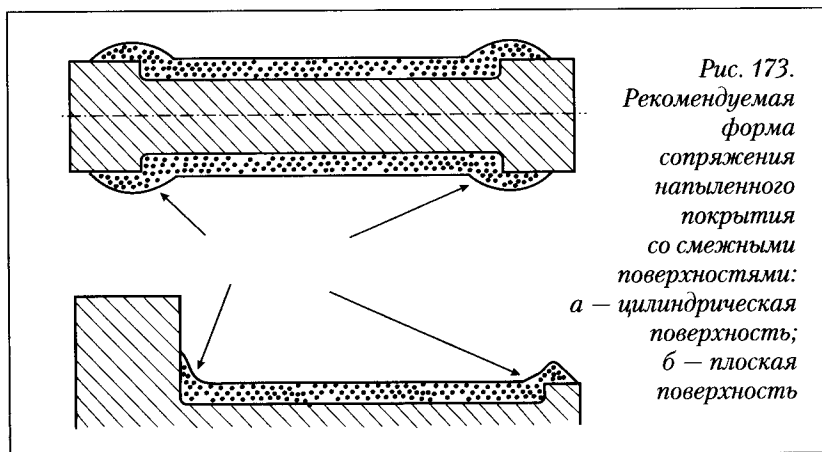
Высокая стойкость аморфных покрытий против изнашивания и коррозии увеличивает долговечность плунжеров бурового оборудования в 1,6–2,1 раза, насосных штанг нефтеперерабатывающего оборудования – в 2,5 раза [231]. В 1,9 раза возрос срок службы деталей центробежного насоса для перекачки технологических растворов, содержащих хлор-ионы (валы, рабочие колеса, корпуса), после их восстановления плазменным напылением порошком ПГ–Ж1.

С целью снижения себестоимости покрытий и экономии никелевых и кобальтовых сплавов в последние годы для плазменного напыления используют порошки, полученные из стружки серого чугуна [232, 233]. Установлено, что в процессе воздушно-газового плазменного напыления покрытий порошком серого чугуна СЧ20, полученного измельчением стружки, в структуре покрытия образуются метастабильный  $\epsilon$ -карбид, мартенсит, остаточный аустенит, способствующие повышению микротвердости в 2,2–2,4 раза по сравнению с твердостью литого состояния чугуна.

Добавки сплава ПГ–Ж5 и бронзы к порошку из серого чугуна уменьшают на 20–40% уровень растягивающих остаточных напряжений. При этом покрытия отличаются высокой прочностью сцепления (40–60 МПа), их износостойкость в 1,2–2,2 раза выше износостойкости плазменных покрытий из никелевого сплава ПГ–10Н–01, в 1,4–3,4 раза – из подвергнутой термообработке стали 45.

Плазменное напыление порошков на основе серого чугуна позволило повысить износостойкость коленчатых валов двигателей ВАЗ-2101 и М-412 в 1,1–1,4 раза, валов масляных насосов двигателей СМД-14 – в 1,5–1,75, распределительных валов двигателей ЗИЛ-508.10 – в 1,2–1,6, клапанов распределительного механизма двигателя ЗМЗ-53 и барабанов тормозов трактора Т-150К – в 1,5–1,7 раз.

Перед плазменным напылением необходимо выполнить ряд подготовительных операций. Механическую обработку деталей перед напылением выполняют с учетом обеспечения требуемой



формы сопряжения напыленного покрытия со смежными поверхностями (рис. 173). Поверхности деталей, не подлежащих напылению, защищают от попадания на них напыляемого материала с помощью асбестовых или металлических экранов, масок, а также специальных обмазок.

Перед нанесением покрытия деталь обдувают сжатым воздухом в течение 5–10 с. Для удаления адсорбированной влаги и уменьшения внутренних напряжений деталь перед напылением нагревают плазмотроном до 150–180°С.

Дистанцию напыления определяют опытным путем. Она зависит от порошка, режима напыления, особенностей конструкции обрабатываемого изделия и обычно равна 100–150 мм. Скорость перемещения струи относительно изделия 3–15 м/мин, а скорость вращения изделия — 10–15 м/мин. Ось сопла плазмотрона должна быть направлена по отношению к напыляемой поверхности под углом 60–90°, в стесненных условиях — под углом не менее 45°.

В процессе напыления плазменная струя должна быть устойчивой, без пульсаций. С помощью регулятора расхода газа, порошка и других устройств обеспечивают равномерную подачу порошка во избежание накопления порошка на наружной поверхности анода и закупорки отверстия для ввода порошка. После этого включают систему перемещения детали, а затем плазмотрона, и наносят покрытие. Необходимую толщину покрытия получают многократным повторением циклов напыления перемещением плазмотрона относительно напыляемой поверхности детали или перемещая и деталь, и

плазмотрон, перекрывая полосы напыления на одну треть диаметра пятна напыления.

После нанесения покрытия изделие снимают с приспособления, не допуская его повреждения. Экраны-маски и другие защитные приспособления снимают после охлаждения изделия до комнатной температуры так, чтобы не повредить покрытие.

В табл. 122 приведены ориентировочные режимы напыления различными порошками при использовании в качестве плазмообразующих газов аргона и азота. Кроме традиционных двухкомпонентных смесей, содержащих рабочий и защитный компоненты «водород-аргон», «водород-азот», применяют многокомпонентную смесь воздуха с углеводородными газами, т. е. смесь системы С-N-O-H (воздух-пропан-бутан, воздух-метан) [184, 234]. В этих смесях кислород воздуха, который нежелателен при напылении многих материалов, при нагреве смеси теплотой плазменной дуги образует с углеродом углеводородного

**Таблица 122. Режимы напыления различными порошками при использовании в качестве плазмообразующих газов аргона и азота**

Напыляемый материал	Режимы источника питания для:						Расход плаз-мообразующих газов, м <sup>3</sup> /ч		Расход транс-портирующего газа, м <sup>3</sup> /ч	Давление плаз-мообразующих газов, МПа		Листовая напыления, мм	Расход порошка, кг/ч	Коэффициент использования порошка, %
	аргона		азота		аргон	азот	аргон	азот						
	напря-жение, В	сила сва-рочного тока, А	напря-жение, В	сила сва-рочного тока, А										
	65-75	450-460	75-85	450-460	3,6-4,0	3,1-3,6	0,5-0,8	0,70-0,78	140-160	8,0-10,0	50-55			
Самофлюсующиеся никелевые сплавы	65-75	450-460	75-85	450-460	3,6-4,0	3,1-3,6	0,5-0,8	0,70-0,78	140-160	8,0-10,0	50-55			
Сплавы: Ni-Al, Ni-Ti	65-75	430-435	80-85	430-435	3,0-3,6	2,9-3,1	0,6-0,8	0,60-0,70	140-155	7,0-9,0	45-50			
Бронза	60-70	490-500	74-80	490-500	3,2-3,6	3,0-3,1	0,4-0,7	0,65-0,70	140-150	7,5-9,0	55-60			
Алюминий	60-60	490-500	74-80	490-500	3,6-4,0	3,1-3,5	0,45-0,75	0,65-0,70	140-150	8,0-9,0	60-65			

Таблица 123. Режимы напыления различными порошками при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси «воздух-пропан-бутан»								
Насыщаемый материал	Режимы источника питания		Расход плазмообразующих газов, м <sup>3</sup> /ч	Расход транспортирующего газа, м <sup>3</sup> /ч	Давление плазмообразующих газов, МПа	Дистанция напыления, мм	Расход порошка, кг/ч	Кoeffициент использования порошка, %
	напря-жение, В	сила сварочного тока, А						
Самофлюсующиеся никелевые сплавы	260–265	235–240	4,0–6,5	0,4–0,9	0,50–0,55	160–230	10,0–20,0	45–50
Сплавы: Ni–Al, Ni–Ti	250–255	240–245	5,0–7,0	0,6–0,9	0,40–0,50	150–200	8,0–10,0	45–47
Бронза	265–270	225–230	5,5–7,0	0,4–0,7	0,45–0,50	160–200	15,0–20,0	53–55
Алюминий	245–250	245–250	5,0–5,5	0,5–0,7	0,40–0,45	140–190	8,5–10,0	57–60

газа термически стойкий оксид углерода. В то же время водород, добавляемый к инертным газам в количестве 10–20% по объему для повышения нагрева и теплопроводности плазмы, обычно освобождается в процессе химической реакции в плазмотроне. Количество водорода, как и восстановительного потенциала среды в целом, регулируют изменением исходного соотношения «газ-воздух». Такие смеси являются относительно дешевыми и в большинстве случаев вполне конкурентоспособны с двухкомпонентными.

Многокомпонентные смеси позволяют увеличить мощность плазменной струи как за счет горения углеводородного компонента, так и за счет увеличения напряжения дуги. Установлено, что с повышением содержания углеводородного газа в смеси происходит рост напряжения дуги. Существенный рост (до 10%) наблюдают при замене воздуха на смеси с содержанием углеводородного газа 4,5% и далее 0,7–1,5% на каждый процент содержания углеводородного газа — при возрастании углеводородного газа свыше 9% [234].

В табл. 123 приведены ориентировочные режимы напыления различными порошками при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси «воздух-пропан-бутан».

В настоящее время все шире применяют плазменное напыление с использованием сверхзвуковых струй [184, 227, 228]. При этом добавление метана или пропан-бутана к воздуху делает высокотемпературный участок плазменной струи, в котором происходит нагрев и ускорение частиц порошка, более протяженным, а профиль температур и скоростей — более заполненным. Скорость частиц порошка  $Al_2O_3$  размером 80 мкм при сверхзвуковом газоздушном напылении на дистанции 250 и 300 мм — 330–500 м/с [184]. При этом гарантированный срок службы анода равен 40–50 ч. Ресурс работы катода с гафниевой вставкой — 6–10 ч, с циркониевой — 4–6 ч.

При сверхзвуковом газоздушном плазменном напылении сплава Fe–Mo–Cr–Ni–W происходит интенсивное расплющивание обладающих высокой кинетической энергией частиц, что обеспечивает плотный контакт с основой [228]. Это приводит к повышенной степени аморфизации напыленного материала.

При сверхзвуковом плазменном напылении различными порошками покрытия обладают низкой пористостью (0–3%), высокой прочностью сцепления с основой (до 150 МПа) и повышенной микротвердостью [184].

Возможные дефекты способа плазменного нанесения покрытий — это отслоение напыленного слоя, растрескивание покрытия, появление на поверхности крупных капель материала покрытия, капель меди, а также разнотолщинность покрытия (выше допустимой) [221]. Причины образования и способы устранения этих дефектов приведены в *табл. 124*.

С целью повышения адгезионной и когезионной прочностей и других качественных характеристик плазменные покрытия подвергают дополнительной обработке различными способами: обкатка роликами под током, очистка напыляемых поверхностей от окалина и удаление слабо сцепленных с основой или с предыдущим слоем частиц металлическими щетками в процессе самого напыления, струйно-абразивная и ультразвуковая обработка и др. [235, 236].

Одним из наиболее распространенных способов улучшения качества покрытий из самофлюсующихся сплавов является их оплавление [237]. Для оплавления используют индукционный или печной нагрев, нагрев в расплавах солей или металлов, плазменный, газопламенный, лазерный и др. В большинстве случаев предпочтение отдают нагреву в индукторах токами высокой частоты (ТВЧ). Напыленные покрытия системы Ni–Cr–W–Si–C подвергают оплав-

**Таблица 124. Возможные дефекты покрытий с плазменным напылением и способы их устранения**

<i>Дефект</i>	<i>Причины</i>	<i>Способы устранения</i>
Отслоение напыленного слоя	Неправильно подготовлена конфигурация напыляемого участка (острые углы, малые радиусы закругления и т. п.)	Удалить дефектное покрытие, подготовить конфигурацию напыляемого участка в соответствии с требованиями
	Неудовлетворительное качество подготовки поверхности (жировые пятна, малая шероховатость, наличие влаги или масла в сжатом воздухе и т. п.)	Удалить дефектное покрытие, проверить наличие масла и влаги в сжатом воздухе, заменить обезжиривающие средства на свежие, заменить абразив новым, повысить давление воздуха при струйно-абразивной обработке, не допускать касания подготовленной поверхности грязным инструментом и руками без перчаток
	Окисление подложки вследствие перегрева; высокие внутренние напряжения	Удалить дефектное покрытие, усилить охлаждение подложки при напылении, по возможности увеличить дистанцию напыления, снизить электрическую мощность, увеличить скорость перемещения горелки (или изделия), уменьшить толщину покрытия
	Большая разность коэффициентов термического расширения основы и покрытия	Удалить дефектное покрытие, ввести операцию напыления подслоя
Растрескивание покрытия	Высокие внутренние напряжения в покрытии	Брак неустраним. Усилить охлаждение подложки при напылении, по возможности увеличить дистанцию напыления, снизить электрическую мощность, увеличить скорость перемещения горелки (или изделия), уменьшить толщину покрытия, наносимого за один проход
Появление на поверхности крупных капель материала покрытия	Наращивание материала покрытия на внутренней стенке сопла-анода	Брак неустраним. Отрегулировать расход транспортирующего газа и порoshка таким образом, чтобы обеспечить устойчивость струи напыляемого материала

Дефект	Причины	Способы устранения
Появление капель меди на покрытии	Повышенная эрозия сопла-анода в результате его изнашивания или ухудшения водяного охлаждения	Брак неустраним. Проверить центровку электродов и расход охлаждающей воды, в случае его падения устранить причину
Разнотолщинность покрытия (выше допустимой)	Неравномерная подача напыляемого материала	Брак неустраним. Отрегулировать работу порошкового питателя и расход транспортирующего газа
	Неравномерное перемещение плазменной струи относительно поверхности напыления	Брак неустраним. Отрегулировать работу системы перемещения плазмотрона и изделия

лению при 920–1200°С с целью уменьшения исходной пористости, повышения твердости и прочности сцепления с металлом-основой.

**Размерная обработка покрытий.** Размерную механическую обработку плазменных покрытий осуществляют точением и шлифованием. Обработка напыленных покрытий имеет следующие специфические особенности. Во-первых, при обработке деталей с покрытием вследствие разных коэффициентов термического расширения покрытия и основного материала и особенностей структуры возникают внутренние напряжения. Во-вторых, различные теплофизические свойства материала и покрытия изменяют картину распространения тепловых потоков. В-третьих, слоистое строение материала покрытия, наличие оксидных включений и слабость межчастичных связей определяют специфическую природу физико-химических явлений в зоне контакта инструмента и обрабатываемого покрытия. Поэтому при точении предпочтительно использовать твердосплавные резцы с закругленной вершиной.

Шлифование применяют для многих плазменных покрытий. Наибольшие трудности при шлифовании связаны с быстрым «засаливанием» шлифовальных кругов. Для повышения качества обработанной поверхности выбирают шлифовальные круги из нормального электрокорунда Э с величиной частиц 36–46 мкм, на керамической связке К, среднемягкой твердости СМ. Режимы резания: скорость круга  $v_k=25...30$  м/с; скорость детали  $v_d=10...20$  м/мин; подача детали  $S_d=0,015...0,03$  мм/дв.х; подача круга  $S_k=5...10$  мм/об.



В целях продления срока службы шлифовальных кругов, а также во избежание возникновения перегрева контактируемых поверхностей и образования пыли необходимо в большинстве случаев применять различные охлаждающие смазки. Это особенно важно при использовании шлифовальных кругов на основе карбида кремния, корунда и алмаза. Рекомендуемые смазки: шлифовальные водно-масляные эмульсии и водные растворы.

Карбидо-кремниевыми шлифовальными кругами можно обрабатывать покрытия с твердостью до 63 HRC<sub>э</sub>. Эффективность шлифования этими кругами внешних поверхностей вращающихся деталей повышается при использовании относительно узких кругов, ширина которых не должна превышать 8–10% диаметра круга.

При обработке покрытий, обладающих низким сопротивлением резанию, рекомендуют применять круги из белого электрокорунда. Рекомендуемые режимы резания для круга ПП 600×63×305, ЭБ СМ1–6К:  $v_k=20$  м/с,  $v_d=3$  м/мин,  $S_d=0,03$  мм/дв.х,  $S_k=0,3$  м/мин.

Покрытия из никелевых самофлюсующихся сплавов, имеющих твердость 58–64 HRC<sub>э</sub>, обрабатывают кругами из зеленого или черного карбида кремния, например, ППТ 600×63×305, КЗ 80–50 СМ1–6К. При этом предварительное шлифование производят на режиме:  $v_k=20$  м/с,  $v_d=12$  м/мин,  $S_d=0,03$  мм/дв.х,  $S_k=0,6$  м/мин, а окончательное выполняют на режиме  $v_k=30$  м/с,  $v_d=17$  м/мин,  $S_d=0,03$  мм/дв.х,  $S_k=0,3$  м/мин. Наиболее оптимальным при обработке покрытий из самофлюсующихся сплавов, отличающихся большим сопротивлением резанию, является использование алмазных кругов для предварительного шлифования — АПП Б–100 АСО 160/125 и окончательного — АПП Б–100 АСО 50/40 (80/63) при  $v_k=10$  м/с,  $v_d=3$  м/мин,  $S_d=0,05$  мм/дв.х,  $S_k=0,5$  м/мин.

Обычно после механической обработки напыленного слоя допускаются поры и шлаковые включения размером менее 1 мм, общее число пор и включений не должно быть более пяти и расстояние между ними не менее 5 мм на площади 250×250 мм. Не допускаются местные отслоения напыленного материала, поры и шлаковые включения размером более 2 мм. В случае появления дефектов на обработанной напыленной поверхности (трещин, сколов, «чернот», рисок, следов резца) деталь возвращают для повторного восстановления по всей технологической цепочке. При занижении размера детали ее также возвращают для повторного восстановления.

Необходимо учитывать, что исправление дефектов допускается ограниченное число раз (в основном, не более одного раза), при этом

участок вновь покрываемой поверхности должен быть расширен на 10–15 мм по всему периметру. Кроме того, при местном исправлении дефектов вновь нанесенное покрытие должно перекрывать первоначальное на 4–6 мм по всему периметру исправляемого участка.

**Области применения плазменного напыления.** В авиационной промышленности плазменные покрытия наносят на сочленения лопатки турбины и компрессора реактивного двигателя, на цапфы и шасси, несущие конструкции и гидроэлементы; в машиностроении — на пресс-формы для литья под давлением, разъемные и неразъемные матрицы для прессования и экструзии, рольганги станков, индукторы для пайки, направляющие станков, втулки уплотнений, шнеки, коленчатые валы, шкворни, поршни и цилиндры двигателей; в энергетике — на различные узлы генераторов и топливных элементов, лопатки дымососов, на теплоизоляцию теплонапряженных узлов; в металлургии — на дроссельные заслонки и фурмы доменных печей, огнеупоры, тигли для плавки; в химической промышленности — на клапаны, седла клапанов, крыльчатки и оси насосов, втулки, кольца, детали конденсаторов-холодильников, емкости; в нефтяной и угольной промышленности — на рабочие колеса, втулки и другие детали буровых насосов, торцы колонковых труб, ковши экскаваторов и транспортеров.

Плазменное напыление многие годы применяют также в электронике, радио- и приборостроении, ракетостроении и строительстве. Плазменное напыление позволяет не только наносить различные покрытия, но и изготавливать изделия, состоящие из одного или нескольких напыленных материалов или слоев [238, 239, 240]. При этом напыление производят на специально изготовленные формы и модели, называемые оправками, которые придают напыляемым материалам заданную конфигурацию и размеры. После напыления изделия извлекают из формы или снимают с оправки. Учитывая специфические особенности и свойства напыленных материалов, изделия могут конструктивно усиливать цельнометаллическим каркасом, арматурой и др. Этот способ особенно перспективен при мелкосерийном производстве сложнопрофильных пресс-форм для обработки пластмасс с развитой геометрией поверхности (мебель, автомобильная фурнитура, детские игрушки, обувные подошвы, медицинские протезы, художественные изделия и др.) [240]. К числу изделий, которые могут быть изготовлены упомянутым способом, относятся сопла сварочных горелок и плазмотронов [220].

В настоящее время все более широко применяют плазменное напыление с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном). Представлена [241] технология восстановления коленчатых валов автомобилей с использованием пропан-воздушной плазмы. Подслой напыляли порошком ПН-70Ю30, а рабочий слой — ПН-55Т45. Размер напыляемых частиц 60–100 мкм. Напыление осуществляли на следующих режимах: напряжение дуги 190–220 В; сила сварочного тока 180–230 А; расход плазмообразующего воздуха 7,5–9,0 м<sup>3</sup>/ч, пропана — 0,8–1,5 м<sup>3</sup>/ч; дистанция напыления 110–120 мм. Ресурс работы восстановленных коленчатых валов автомобиля ГАЗ-53 был не ниже новых и равнялся не менее 100 тыс. км пробега.

Хорошие результаты дает газозвуковое напыление бронзовых покрытий [242]. Детали автогидроподъемников, выполненные из сталей марок 35 и 45, напыляли порошком ПГ-19М-01 (основа — медь, алюминий — 9,5%, железо — до 4,0%). Толщина напыляемого покрытия 2,0–2,5 мм, рабочего слоя после проточки — 1,5–1,8 мм. При этой технологии удалось без снижения эксплуатационных характеристик узлов трения достигнуть существенной экономии цветных металлов и одновременно повысить производительность труда.

Плазменное газозвуковое напыление на околосвуковых скоростях истечения позволяет получать алюмокерамические покрытия с улучшенными служебными свойствами [184]. При этом состав алюминиевого и керамического порошков, параметры их ввода в плазменную струю выбирают таким образом, чтобы максимально снизить в полете дробление наплавленных частиц, а также повысить столкновение и коагуляцию алюминиевых частиц с керамическими.

При напылении формируется плотное с хорошим сцеплением покрытие. Благодаря наличию частиц керамики в мягкой матрице алюминия многократно повышается механическая прочность и износостойкость покрытия. Указанное покрытие обеспечивает более чем двухкратное улучшение коррозионной стойкости по сравнению с алюминиевыми покрытиями, полученными электродуговой металлизацией и газопламенным напылением.

Промышленная технология нанесения алюмокерамических покрытий на трубы диаметром 100–1200 мм внедрена на ряде промышленных предприятий. Плазменное сверхзвуковое напыление используют при изготовлении катализаторов для комплексной очистки отработанных автомобильных газов [184, 243].

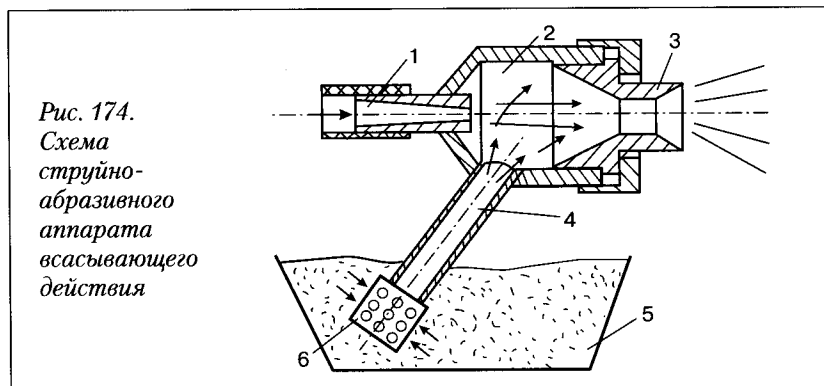
**Оборудование для плазменного напыления деталей.** Плазменное напыление выполняют на рабочих местах и участках, укомплектованных основным и вспомогательным оборудованием. К основному относят оборудование для подготовки поверхностей деталей, установки и камеры для напыления, к вспомогательному — оборудование для подготовки порошков, контроля деталей после напыления, рампы для централизованной подачи газов, накопительное оборудование.

Следует выделить три группы основного оборудования для плазменного напыления: установки и полуавтоматы для струйно-абразивной обработки деталей; установки (аппараты) для плазменного напыления; полуавтоматы для плазменного напыления.

**Установки и полуавтоматы для струйно-абразивной обработки деталей** предназначены для создания шероховатой поверхности деталей для плазменного напыления в условиях мелкосерийного и ремонтного производств [244, 246]. При струйно-абразивной обработке энергия сжатого воздуха преобразуется в кинетическую энергию потока абразивных частиц. Для этого используют аппараты двух типов: нагнетательные и всасывающие.

В аппаратах нагнетательного типа абразив из питательного бункера через клапан периодически подается в камеру, находящуюся под давлением сжатого воздуха. Из камеры абразив поступает в смеситель, где подхватывается потоком воздуха, поступающего из магистрали по трубопроводу. Смесь воздуха с абразивом поступает к соплу и затем в виде струи направляется на обрабатываемую поверхность.

В аппаратах всасывающего типа (рис. 174) струя воздуха, выходящая из сопла 1, создает в камере-смесителе 2 и патрубке 4 разре-



жение, в результате чего в патрубок через отверстие в насадке 6 засасывается атмосферный воздух, перемещающий абразив из бункера 5 в смеситель. Абразив подхватывается потоком воздуха из сопла 1, направляется в сопло 3 и из него в виде воздушно-абразивной струи на обрабатываемую поверхность.

Аппараты всасывающего типа имеют более простую конструкцию, надежны в работе, но несколько менее производительны, чем аппараты нагнетательного типа. Производительность аппаратов всасывающего типа зависит от давления воздуха и величины диаметра проходного отверстия сопла [245].

На рис. 175 показаны кривые зависимости производительности  $\Pi$  и себестоимости  $C$  струйно-абразивной обработки от диаметра  $d_c$  проходного отверстия сопла. Максимальная производительность обеспечивается при диаметре 16 мм проходного отверстия сопла. Однако в связи с увеличением расхода воздуха себестоимость операции увеличивается примерно на 18%. Дальнейшее увеличение диаметра сопла до 22 мм приводит к снижению производительности при существенном росте затрат. Следовательно, если при выборе сопла принять за критерий производительность, то в рассматриваемом случае оптимальным будет диаметр сопла 16 мм, а если принять экономичность — 10 мм.

Установка струйно-абразивной обработки представляет собой камеру, обычно с основными узлами: струйным аппаратом, системой сбора, регенерации и подачи абразива на повторное использование, системой подготовки воздуха (регулирование давления, суш-

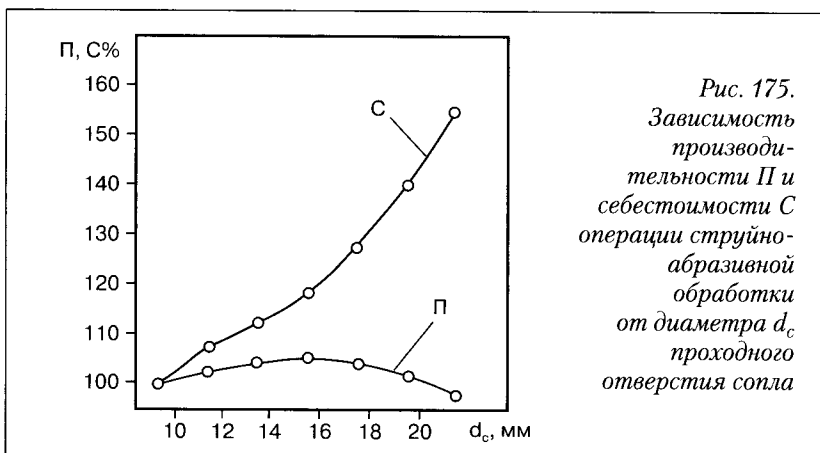


Рис. 175.  
Зависимость  
производи-  
тельности  $\Pi$   
и  
себестоимости  $C$   
операции струйно-  
абразивной  
обработки  
от диаметра  $d_c$   
проходного  
отверстия сопла

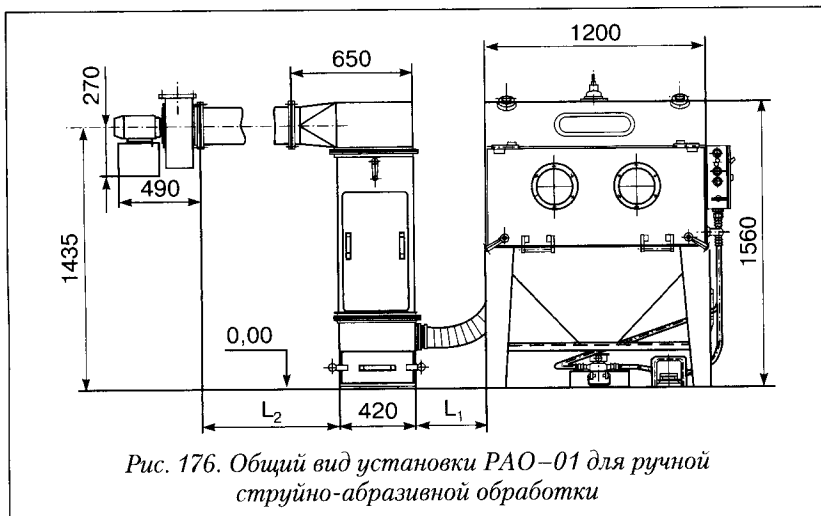


Рис. 176. Общий вид установки РАО-01 для ручной струйно-абразивной обработки

ка и очистка от масла), вентиляцией и средством механизации для подачи и установки очищаемых деталей в требуемое положение.

ОАО «Украинский конструкторско-технологический институт сварочного производства» разработало и изготавливает несколько типов установок для струйно-абразивной обработки, имеющих различный уровень механизации и автоматизации.

Установка РАО-01 для ручной абразивной обработки (рис. 176) представляет собой герметично закрытую камеру с бункером, рабочим столом, струйным аппаратом, вытяжной системой вентиляции и пультом управления. На передней части камеры имеются дверцы для загрузки и выгрузки деталей и пульт управления измерительными приборами. Наблюдение и контроль за струйно-абразивной обработкой осуществляют через застекленное смотровое окно. Внутри камеры расположены поворотный столик и подвеска с абразивным пистолетом.

#### **Техническая характеристика установки РАО-01:**

Потребляемая мощность, кВт, не более .....	1,8
Давление сжатого воздуха на входе, МПа, не менее .....	0,5
Максимальные размеры обрабатываемых деталей, мм .....	1000×600×360
Максимальная масса обрабатываемых деталей, кг .....	60
Габаритные размеры, мм, не более .....	2200×1200×1700
Масса, кг, не более .....	300

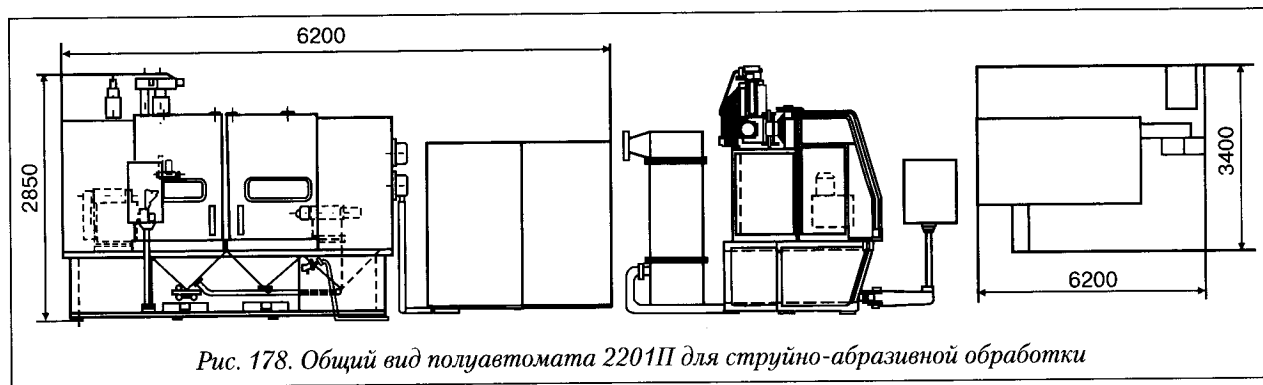
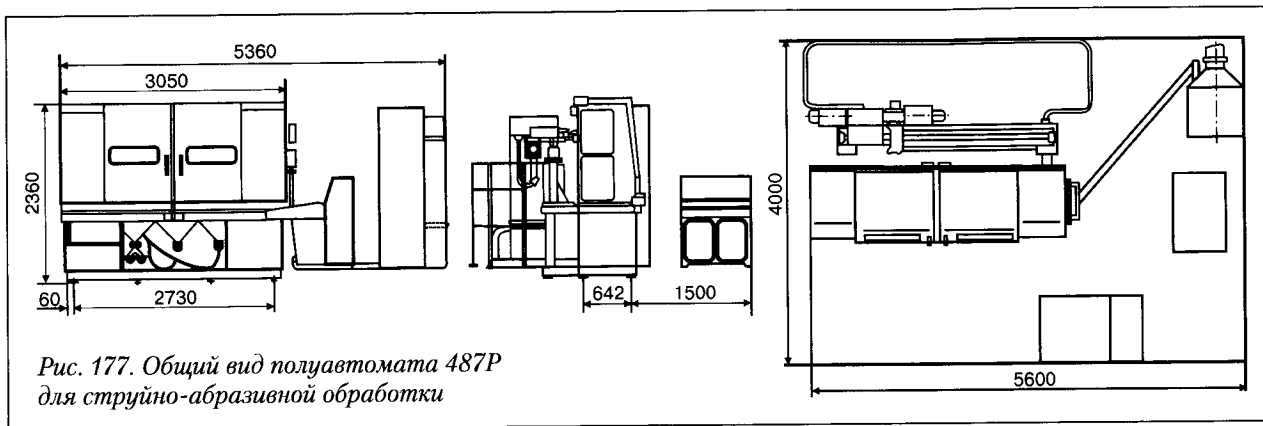
В состав полуавтоматов для струйно-абразивной обработки 487Р (рис. 177) и 2201П (рис. 178) входят струйно-абразивная камера, станина с приемными бункерами, система подачи абразива и подготовки воздуха, а также струйный аппарат. Внутри камеры расположены патрон и задняя бабка с направляющими для крепления обрабатываемой детали, а также два пистолета. Манипулятор перемещения пистолетов и привод вращения детали вынесены за пределы камеры, что повышает надежность оборудования, обеспечивает удобство обслуживания и эксплуатации. Полуавтомат 2201П комплектован системой программного управления.

<b>Техническая характеристика</b>	<b>487Р</b>	<b>2201П</b>
Потребляемая мощность, кВт	6,75	6,75
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,5–0,63	0,5–0,63
Количество струйно-абразивных пистолетов, ед.	2	2
Скорость перемещения пистолетов, мм/с:		
вдоль оси шпинделя	1–50	0,16–140
перпендикулярно к оси шпинделя	4–80	0,1–50
Частота вращения шпинделя, об/мин	6,3–32	4–200
Размеры обрабатываемых деталей диаметром 320/500, мм, не более	1500×180×250	1600×250×150
Масса обрабатываемых деталей, кг:		
цилиндрических	100	500
плоских	250	500
Масса полуавтомата, кг	2900	4250
Габаритные размеры, мм, не более	5600×3500×2360	6200×3800×2850

В комплект поставки входят рукавные фильтры и вентиляторы.

**Установки (аппараты) для плазменного напыления.** К данному оборудованию относятся установки (аппараты), непосредственно генерирующие плазму. Конструктивная схема установки «Киев–7» для плазменного напыления показана на рис. 179. Она включает блок электропитания 1, пульт управления 2, модуль 3 подачи горючего газа, блок 4 подачи порошка, унифицированный плазмотрон 5, комплект 6 кабелей и шлангов, кабель 7 подключения к полуавтомату.

Плазмотрон служит для нанесения керамических и металлических порошков с частицами размером 40–120 мкм. Плазмообразую-





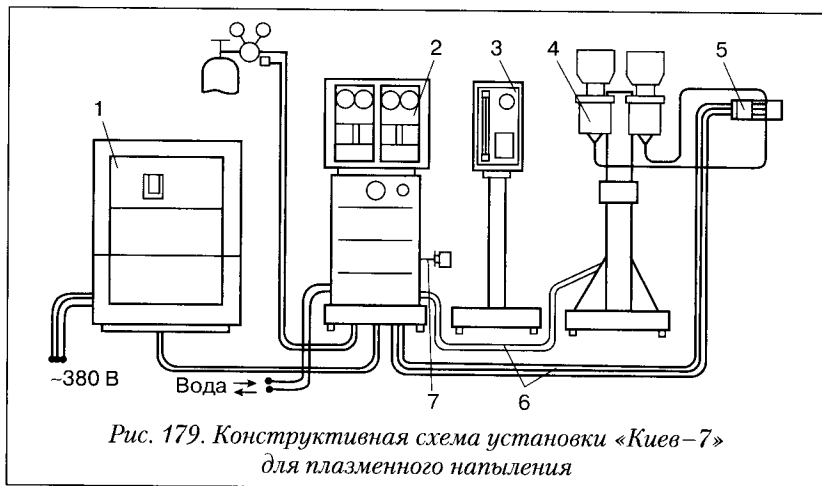


Рис. 179. Конструктивная схема установки «Киев-7» для плазменного напыления

щим газом служит смесь сжатого воздуха с пропаном или природным газом. Наибольшая производительность напыления — 10 кг/ч керамического и 25 кг/ч металлического порошков. Мощность плазмотрона не более 80 кВт. Рабочее напряжение и сила тока соответственно 200–250 В и 100–315 А.

В настоящее время установки «Киев-7» промышленность не выпускает, однако многие предприятия их используют. На рынке предлагают бывшие в употреблении установки этой модели. Установки «Киев-7» являются достаточно надежными.

НПП «ТОПАС» предлагает гамму установок, построенных на блочно-модульном принципе и использующих доступную и дешевую смесь природного газа с воздухом в качестве рабочего газа.

Установку плазменного напыления «ТОПАС-40» мощностью 40 кВт комплектуют плазмотронами для ручного напыления, а также плазмотронами для использования в механизированных и автоматизированных комплексах. Плазмотроны выполнены с одиночной межэлектродной вставкой и рекуперативным охлаждением, могут работать на сверх- и дозвуковом режимах. Установка предназначена для напыления покрытий на наружные и внутренние поверхности. Для напыления можно использовать порошки и проволоку.

**Техническая характеристика установки «ТОПАС-40»:**

Плазмообразующий газ	Воздух+метан
Напряжение питающей сети (х.х), В	3×380 (180)
Рабочее напряжение, В	140–180

Сила рабочего сварочного тока, А.....	100–250
Расход смеси, м <sup>3</sup> /ч.....	3–10
КПД плазмотрона, % .....	90
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы.....	10
керамика (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	5

Установка плазменного напыления «ТОПАС–80» с плазмотроном мощностью 80 кВт, раздельной (или общей по желанию заказчика) подачей газа предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов.

**Техническая характеристика установки «ТОПАС–80»:**

Плазмообразующий газ.....	Воздух+метан (пропан-бутан)
Напряжение питающей сети (х.х), В.....	3×380 (300)
Рабочее напряжение, В.....	200–270
Сила рабочего сварочного тока, А.....	100–300
КПД плазмотрона, % .....	70
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы.....	25
керамика (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	10

Установка плазменного напыления «ТОПАС–180» с плазмотроном мощностью 180 кВт работает на сверх- и дозвуковом режимах. Предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов, можно использовать во всех случаях, где необходимо высококачественное покрытие при высокой производительности.

**Техническая характеристика установки «ТОПАС–180»:**

Плазмообразующий газ.....	Воздух+метан
Напряжение питающей сети (х.х), В.....	3×380 (500)
Рабочее напряжение, В.....	250–450
Сила рабочего сварочного тока, А.....	200–400
Расход смеси, м <sup>3</sup> /ч.....	10–30
КПД плазмотрона, % .....	70
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы.....	50
керамика (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	15

Установки «Киев–7» и «ТОПАС» применяют как для плазменного напыления, так и для упрочнения. В последнем случае блок подачи порошка не используют.

**Полуавтоматы для плазменного напыления**, разработанные ОАО «УкрИСП», представляют собой оборудование камерного типа, состоящее из защитной камеры, плазменной установки в сборе, аспирационной установки. В камере расположены плазмотрон, передняя и задняя бабки для крепления напыляемой детали. Механизмы перемещения плазмотрона и вращения детали вынесены за пределы камеры для удобства обслуживания и эксплуатации оборудования.

Полуавтоматами с программным управлением обрабатывают наружные поверхности цилиндрических деталей и деталей сложной конфигурации (конус, цилиндрические ступенчатые валы и др.). Управление осуществляют с помощью систем ЧПУ или компьютера.

Конструкция полуавтоматов обеспечивает:

- возможность ручного регулирования дистанции напыления и упрочнения;
- ручной поворот и фиксацию плазмотрона относительно продольной оси детали;
- плавное регулирование скоростей вращения изделия, продольного и поперечного перемещений плазмотронов;
- возможность автоматического позиционирования плазмотрона по продольной оси;
- защиту приводов перемещения плазмотрона и вращения детали от попадания напыляемого порошка;
- защиту обслуживающего персонала и окружающей среды от шума, излучения, аэрозолей и других сопровождающих напыление вредных воздействий;
- позиционирование и изменение скорости перемещения плазмотрона по двум координатам с интерполяцией по заданной программе;
- изменение частоты вращения шпинделя по заданной программе;
- поворот плазмотрона в заранее заданную точку; автоматическое регулирование расстояния от плазмотрона до напыляемой детали.

Полуавтоматы комплектуют установками плазменного напыления «Киев-7», разработанной ИЭС им. Е. О. Патона, и «ТОПАС-40», «ТОПАС-80», «ТОПАС-180», разработанными НПП «ТОПАС».

Общий вид полуавтомата 15-ВБ показан на *рис. 180*.

**Техническая характеристика полуавтомата 15ВБ:**

*Потребляемая мощность, кВт, не более*..... 56,52\*

*Скорость перемещения плазмотрона, м/с:*

*вдоль оси шпинделя*..... 0,002–0,1

*перпендикулярно к оси шпинделя* ..... 0,004–0,18

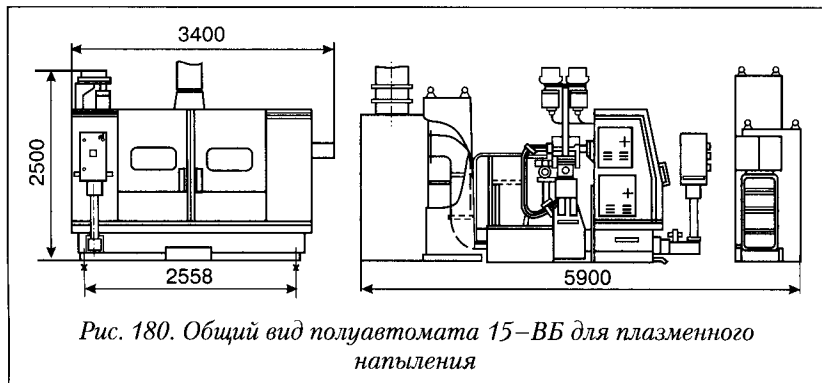


Рис. 180. Общий вид полуавтомата 15–ВВ для плазменного напыления

Частота вращения шпинделя, об/мин ..... 22,5–500

Размеры деталей, мм:

цилиндрических:

длина ..... 63–1500

диаметр ..... 20–320

плоских:

длина ..... 63–1500

диаметр ..... 40–160

Масса деталей, кг, не более:

цилиндрических ..... 100

плоских ..... 250

Габаритные размеры, мм ..... 3850×5900×2500

Масса, кг, не более ..... 4200

\* Для модификации 15-ВВ-01; для 15-ВВ-02 — не более 106,52 кВт.

Разработана модификация этого полуавтомата 15–ВБУ, позволяющая осуществлять процесс плазменного упрочнения. Эта модель при сохранении массово-габаритных характеристик предусматривает вращение деталей на более низких скоростях.

Общий вид полуавтомата 3201П с программным управлением для плазменного напыления показан на рис. 181.

**Техническая характеристика полуавтомата 3201П:**

Потребляемая мощность, кВт, не более ..... 108

Скорость перемещения плазматрона, м/с:

вдоль оси шпинделя ..... 0,0016–1,4

перпендикулярно к оси шпинделя ..... 0,001–0,5

Частота вращения шпинделя, об/мин ..... 20–400

Размеры деталей, мм:

длина.....	63–1600
диаметр.....	25–500
Скорость угла поворота плазмотрона, ...°/с.....	2,5–100
Количество координат перемещения плазмотрона.....	3
Габаритные размеры, мм.....	4850×4850×2400
Масса деталей, кг, не более.....	500
Масса полуавтомата, кг, не более.....	5700

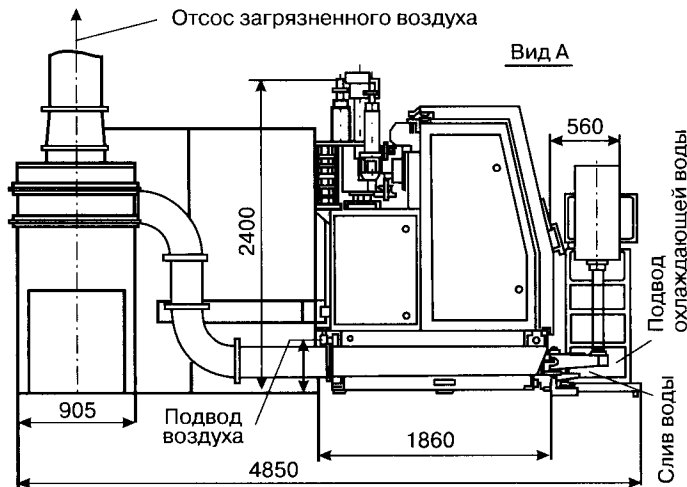
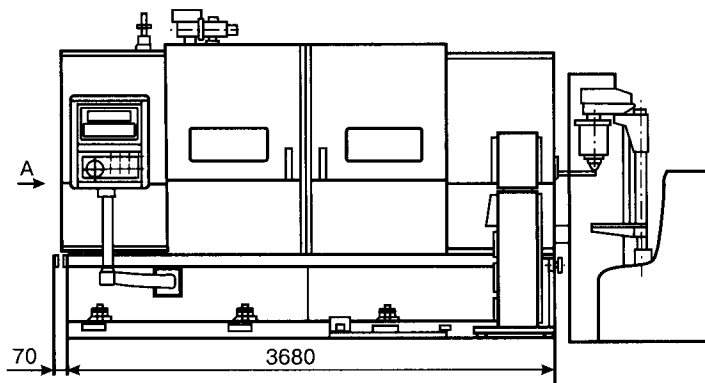


Рис. 181. Общий вид полуавтомата 3201П с программным управлением для плазменного напыления

Современной тенденцией в области разработки оборудования для плазменного напыления, обеспечивающей расширение технологических возможностей процесса, стабильность качества покрытий и улучшение культуры производства, является комплексная автоматизация за счет применения промышленных роботов и персональных компьютеров.

Автоматизация плазменного напыления развивается в двух направлениях — это:

- автоматизация контроля и управления электрической частью установки, расходом газов, подачей напыляемого материала, другими параметрами напыления, которые задают и регулируют в современных установках с единого пульта управления, кроме того, регулирования давления и состава среды в камере напыления, температура подложки и др.;
- автоматизация контроля и управления перемещением детали, горелки и обрабатывающих устройств.

Необходимость автоматизации обусловлена, с одной стороны, особенностями процесса плазменного напыления, связанными с высокой чувствительностью качества и толщины покрытия к колебаниям параметров, с другой — требованиями техники безопасности: необходимость изоляции операторов от рабочей зоны. Степень автоматизации процесса плазменного упрочнения или напыления выбирают на основе анализа технико-экономических показателей.

### **3.4. Плазменная резка**

При изготовлении сварных конструкций различного назначения около 70% применяемого листового металлопроката обрабатывают способами термической резки. Толщина примерно половины листового металлопроката конструкционных сталей до 35 мм. Резка таких толщин наиболее эффективна плазменной дугой. Широко применяют плазменную резку при обработке алюминия, меди, титана и сплавов на их основе. По-видимому, эти обстоятельства, а также универсальность способа плазменной резки способствовали его бурному развитию в последние десятилетия.

В настоящее время накоплен большой опыт использования плазменной резки и средств ее технологического оснащения в виде стационарных машин с числовым программным управлением, переносных машин, поточных линий и различных средств механизации

ции вспомогательных и транспортных операций. На заводах многие годы успешно эксплуатируют комплексно-механизированные линии плазменной резки различной компоновки.

Технология плазменной резки продолжает совершенствоваться. В последние годы получила распространение плазменно-дуговая резка с водяной защитой, микроплазменная резка, резка с использованием кислорода в качестве плазмообразующего газа и др. [247].

При плазменной резке металл проплавляют мощным дуговым разрядом, локализованным на малом участке поверхности разрезаемого металла, а затем удаляют расплавленный металл из зоны реза высокоскоростным газовым потоком.

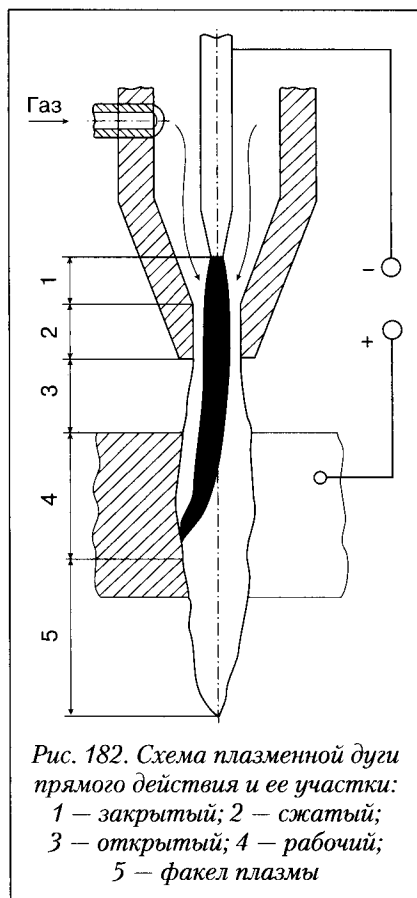


Рис. 182. Схема плазменной дуги прямого действия и ее участки:

- 1 — закрытый;
- 2 — сжатый;
- 3 — открытый;
- 4 — рабочий;
- 5 — факел плазмы

Для термической резки используют так называемые сжатые дуги, отличающиеся интенсивным плазмообразованием в результате обдува дуги соосным или вихревым потоком газа [248, 249, 253, 254]. В связи с этим плазменную дугу формируют в специальном устройстве — плазмотроне, состоящем из двух основных элементов — электрода и формирующего сопла, через канал которого пропускают столб электрической дуги вместе с плазмообразующим газом, подаваемым под определенным давлением.

Плазменную резку выполняют дугой прямого или косвенного действия. Именно по этому признаку различают плазмтроны. Дугу прямого действия используют для обработки электропроводных металлов и сплавов. В дуге прямого действия используют для обработки электропроводных металлов и сплавов. В дуге прямого действия используют для обработки электропроводных металлов и сплавов. В дуге прямого действия используют для обработки электропроводных металлов и сплавов. На поверхности электрода рас-

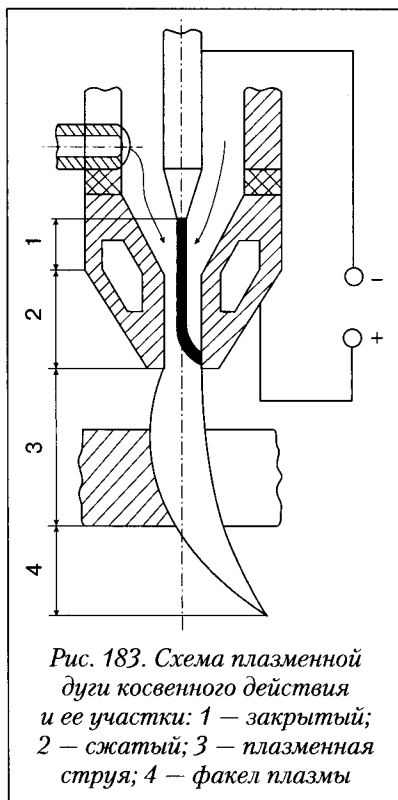
положена катодная область. Между катодной областью и верхним срезом цилиндрической части отверстия сопла расположен участок 1, называемый закрытым столбом. Этот участок находится в относительно спокойном потоке холодного газа. Между входным и выходным срезами внутри сопла расположен участок 2, который подвергается сжатию холодными стенками канала сопла. Между нижним срезом сопла и верхней плоскостью разрезаемого листа находится открытый столб 3 дуги, стабилизированный соосными потоками собственной плазмы и оболочкой более холодного газа. В полости реза (между верхней плоскостью разрезаемого листа и анодной областью) расположены рабочий участок 4 струи и факел 5 плазмы.

В плазменной дуге прямого действия разрезаемый металл, выполняющий функции анода, является токоведущим элементом.

К недостаткам дуги прямого действия относят невозможность обработки не проводящих электрический ток материалов.

Дуга косвенного действия (рис. 183) возбуждается и горит между электродами, которые не связаны с обрабатываемым материалом. Катодом служит электрод плазмотрона, а в качестве анода используют его формирующее сопло. Объект обработки не включен в электрическую цепь. Столб дуги расположен внутри плазмотрона: начинается на электроде и заканчивается анодным пятном на внутренней поверхности канала сопла. Под действием давления плазмообразующего газа, подаваемого в камеру плазмотрона, столб дуги проходит через канал сопла, а анодное пятно перемещается по его внутренней поверхности лишь до выходного среза канала сопла плазмотрона.

В связи с этим плазмообразующий газ и его плазма лишь





на коротком участке контактируют со столбом дуги, а затем существуют независимо от него. Этот вид резки называется резкой плазменной струей. Плазменную струю используют при обработке не проводящих электрический ток материалов и для резки металлов небольших толщин.

Для резки конструкционных сталей используют только плазменную дугу. Плазменно-дуговая резка конструкционных сталей толщиной 35–40 мм, как правило, экономичнее кислородной резки. По сравнению с последней она отличается большей скоростью, меньшими деформациями и минимальным гратом при правильно выбранных режимах резки. Процесс плазменно-дуговой резки легко автоматизировать. Кроме того, плазменно-дуговой резкой можно обрабатывать не только углеродистые и нержавеющие стали, но и алюминий, медь, титан, а также другие металлы и сплавы.

Недостатки плазменно-дуговой резки — интенсивное выделение аэрозолей, повышенный шум, ограниченные возможности резки со скосом кромки.

#### **Характеристика плазменной дуги и плазмообразующих сред.**

Струю плазмы получают путем обжатия столба дуги в канале сопла. Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа столб дуги сжимается, его поперечное сечение уменьшается, а температура в центральной части столба дуги повышается до 10 000–50 000 К. В результате внутренний слой, соприкасающийся со столбом дуги, превращается в плазму, а наружный слой, омывающий стенки канала сопла, остается сравнительно холодным, образуя электрическую и тепловую изоляцию между потоком плазмы и каналом сопла. Этот охлажденный слой газа препятствует отклонению столба дуги от заданного направления и замыканию его на стенку канала сопла.

Напряжение сжатой дуги 60–200 В, что в три-десять раз больше, чем в свободной дуге. Плотность тока сжатой дуги достигает 100 А/мм<sup>2</sup>, т. е. на порядок выше, чем у свободной, а удельная мощность достигает  $2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Плазменная среда оказывает значительное влияние на характеристики плазменной дуги. Условие выбора плазменной среды: она должна обеспечивать наибольшую удельную тепловую мощность при заданном расходе газа и затраченной электрической энергии, а также позволять сконцентрировать полученную энергию в тонкий плазменный шнур и сосредоточить ее на минимальном участке разрезаемого металла. Для плазменной резки применяют как однокомпонентные,

так и многокомпонентные плазмообразующие среды [248, 252, 253].

**Аргон** как плазмообразующий газ обладает недостаточной способностью преобразовывать электрическую энергию в тепловую и передавать ее разрезаемому металлу. Он относится к числу относительно дорогих газов. Для плазменно-дуговой резки аргон применяют в смесях с другими газами (водород, азот).

**Азотная плазма** обеспечивает эффективное преобразование электроэнергии в тепловую и передачу последней разрезаемому металлу, что приводит к существенному увеличению скорости резки по сравнению с резкой аргоновой плазмой. В отличие от аргона азот можно применять при резке в качестве самостоятельного плазмообразующего газа.

**Гелий** не получил распространения в качестве плазмообразующей среды, так как является дорогим и дефицитным газом. В гелиевой плазме более высокая напряженность поля и удельные тепловые потоки в анодной области, что способствует увеличению скорости резки гелиевой плазмой по сравнению со скоростью резки аргоновой плазмой.

**Кислород** применяют самостоятельно и в смесях в качестве плазмообразующего газа. При этом горение железа в кислороде способствует увеличению общей тепловой мощности процесса плазменной резки, а следовательно, и скорости резки. В кислороде напряженность поля дуги ниже, чем в азоте, поэтому он как газ-преобразователь электрической энергии в тепловую менее эффективен.

Анализ рассмотренных выше газов показывает, что ни один из них не может обеспечить самостоятельно весь комплекс положительных свойств идеальной плазмообразующей среды. Поэтому, чтобы обеспечить наиболее полно комплекс свойств плазмообразующей среды, используют смеси из различных газов (аргон+водород, воздух, азот+кислород и др.).

Наиболее широкое распространение для резки конструкционных материалов получил в качестве плазмообразующей среды воздух, содержащий 78% азота и 21% кислорода.

Отмечено уменьшение скорости резки воздушной плазмой основных конструкционных материалов одинаковой толщины. Их можно представить в такой последовательности:

- алюминиевые сплавы;
- углеродистые и низколегированные стали;
- легированные и нержавеющие стали;
- чугун, латунь, медь.

Возможность широкого применения воздуха и кислорода в чистом виде (а также в смеси с другими газами) появилась после разработки катодов из циркония и гафния, на поверхности которых в процессе резки в кислородосодержащих средах образуется окисная пленка. Температура плавления этой пленки выше, чем основного металла. Она предохраняет катод от быстрого разрушения.

Изучение теплового баланса воздушной плазменной дуги с циркониевым катодом показало, что теплота дуги  $P_d$ , затрачиваемая на нагрев анода (разрезаемого металла)  $P_a$ , катода  $P_k$ , сопла  $P_c$  и выделяемая в столбе  $P_{ст}$ , близка по значению к данным, получаемым при использовании сжатой аргоновой дуги [257].

При  $I_d=200...300$  А,  $U_d=80$  В, расходе воздуха 40 л/мин, диаметре сопла 3 мм мощность дуги  $P_d=16...20$  кВт распределяется следующим образом:  $P_a=70...80\%$ ,  $P_k=8...12\%$ ,  $P_c=8...10\%$ ,  $P_{ст}=6...10\%$ . С увеличением расхода воздуха тепловая мощность  $P_c$  быстро падает, а мощность  $P_a$  незначительно возрастает. Эффективный КПД нагрева плазменной дугой, обдуваемой воздушно-углеводородной смесью, составляет 55–72% [258].

**Воду** можно использовать в качестве плазмообразующей среды самостоятельно (водо-электрическая резка) в виде пара или как добавку к рабочему газу. Высокой напряженности поля столба дуги, высокой проникающей способности дуги, большой эффективности использования электрической мощности дуги достигают введением водорода. Качество водо-электрической резки малоуглеродистых сталей, особенно в диапазоне толщин до 20 мм, практически такое же, как при резке в кислородосодержащих смесях благодаря активной роли кислорода в смеси.

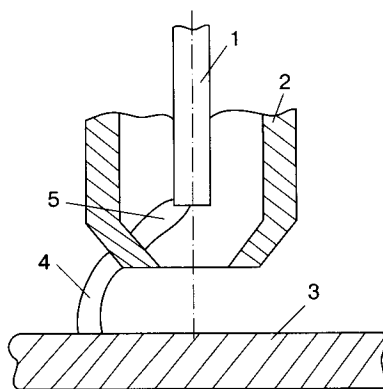
В последние годы широко применяют плазменную резку с «водяной защитой». При этом используют резку листов, уложенных над водной поверхностью с зазором, полупогруженных или погруженных в воду, с подачей небольшого количества воды в столб плазмы и др. [253, 259, 260]. В этих условиях вода улучшает санитарно-гигиенические характеристики процесса, обеспечивает повышение качества кромок вырезаемых деталей, способствует снижению тепловых деформаций деталей.

При резке плазменной дугой может возникнуть аварийный режим работы плазмотрона, так называемое двойное дугообразование [249]. Внешне двойное дугообразование проявляется в том, что при определенных условиях вместо одной дуги, горящей между катодом плазмотрона и разрезаемым листом, горят две дуги: между

Рис. 184.

Схема двойного  
дугообразования:

- 1 — электрод;
- 2 — сопло;
- 3 — разрезаемый лист;
- 4 — дуга сопло-лист;
- 5 — дуга электрод-сопло



катодом и соплом, между соплом и разрезаемым листом (рис. 184). В результате на сопле появляется анодная область первой дуги и катодная область второй дуги.

Двойная дуга может быть кратковременной, когда защитный газовый слой быстро восстанавливается и вновь изолирует стенки от столба плазмы, и длительной, когда образовавшаяся двойная дуга горит устойчиво. Оба вида двойной дуги недопустимы. В первом случае происходит постепенное разрушение стенок сопла. Частицы расплавленного металла уносятся плазмой, а на поверхности сопла образуется небольшой кратер. Во втором случае за несколько секунд сопло оплавляется настолько, что дальнейшая эксплуатация его становится невозможной. При этом обычно получают повреждения и другие детали плазматрона: катод, изолирующие прокладки и др.

Чаще всего двойная дуга возникает при максимальных значениях силы тока при отклонении одного из параметров процесса от оптимального (например, при уменьшении расхода газа, приближении плазматрона к листу, изменении скорости резки, незначительном искажении формы сопла и т. п.).

При резке воздушной плазмой причиной двойного дугообразования является повышенная влажность технического воздуха. Присутствие влаги в катодном пространстве (в полости сопла) вызывает возникновение серии мелких замыканий «электрод-сопло-разрезаемый металл», появление мелких дуговых разрядов, которые происходят чаще всего в момент поджига дуги при выходе на рабочий режим резки. При наличии влажного воздуха не всегда удается поджиг рабочей дуги с первого раза. При этом на наиболее

близко расположенных друг к другу участках электрода и сопла происходит выплавление меди в виде эрозии и образование отдельных наплывов расплавленного металла, которые могут вызвать уменьшение гарантированного зазора между электродом и соплом. В дальнейшем это может привести к полному разрушению последних вследствие возникновения мощной двойной дуги.

**Режимы резки углеродистых и низколегированных сталей.** На процесс плазменной резки оказывает влияние большое количество факторов: сила тока и напряжение дуги, скорость резки, расход плазмообразующего газа, скорость его истечения из сопла, диаметр и длина канала сопла и др. [248, 249, 251, 253, 254].

В общем виде производительность плазменной резки может быть представлена выражением

$$V_p = \eta_u \eta_T P / \gamma \Delta S B_p \delta, \quad (23)$$

где  $V_p$  — максимальная скорость резки, см/с;  $\eta_u$  — эффективный КПД плазменной дуги;  $\eta_T$  — термический КПД плазменной дуги;  $P$  — тепловая мощность источника нагрева, Вт;  $\gamma$  — плотность разрезаемого металла, г/см<sup>3</sup>;  $B_p$  — средняя ширина полости реза, см;  $\delta$  — толщина разрезаемого металла;  $\Delta S$  — теплосодержание расплавленного металла, Дж/см<sup>3</sup>.

Скорость плазменной резки прямо пропорциональна мощности дуги и обратно пропорциональна толщине и плотности разрезаемого металла. Кроме этого, скорость резки зависит от теплофизических характеристик разрезаемого материала: теплопроводности, теплоемкости, скрытой теплоты плавления.

Обычно значение силы тока режущей дуги при резке стали толщиной 6–30 мм выбирают в пределах  $270 \pm 30$  А, исходя из условий нормальной стойкости электродов (около 2 ч горения дуги). Уменьшение силы тока снижает скорость резки, увеличение — заметно ускоряет износ электродов. Обе составляющие мощности режущей дуги (сила тока и напряжение) не равноценны по интенсивности влияния на скорость резки. Экспериментально установлено, что увеличение напряжения более эффективно влияет на скорость резки, чем увеличение силы тока [248].

Величина напряжения зависит от расхода газа, диаметра и длины канала сопла (степени обжаривания режущей дуги).

Если при применении азота допустимо использование плазмотронов с аксиальной подачей газа (струйная стабилизация дуги), то при применении воздуха, и особенно кислорода, процесс плазмен-

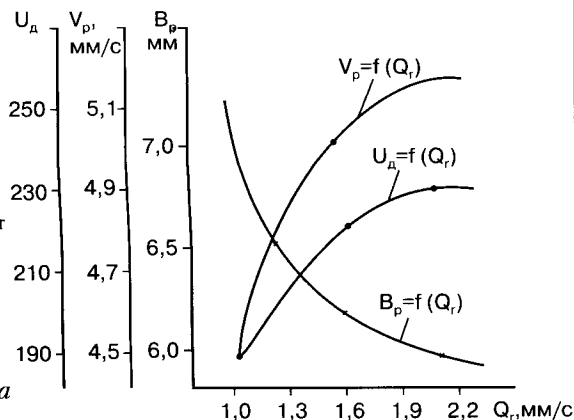
ная резка указанными плазмотронами невозможна из-за ее нестабильности и неустойчивости. Для получения сконцентрированного столба дуги для воздушно- и кислородно-плазменной резки применяют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги [248, 253, 254]. Вихревой плазмообразующий газ обеспечивает надежность работы плазмотрона, повышает стабильность процесса резки, а также улучшает качество кромок реза.

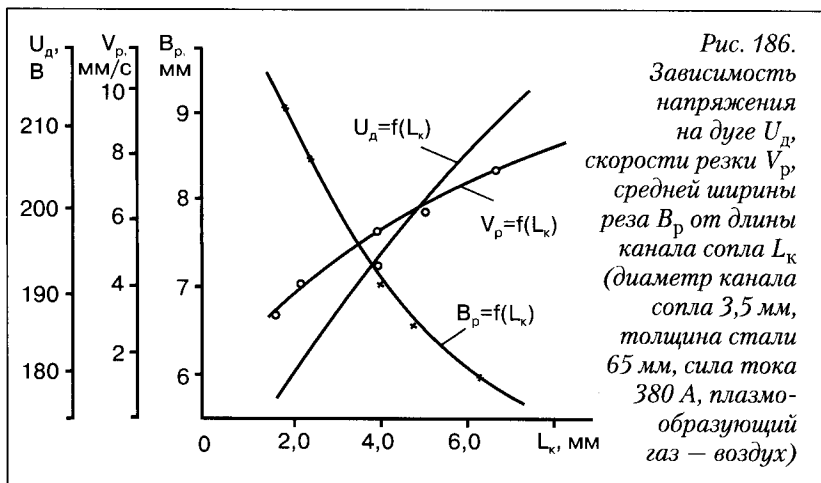
Давление воздуха и кислорода при резке должно быть 0,3–0,5 МПа. Давление газа зависит от сечения каналов завихрителя плазмотрона.

Поджиг дуги происходит в слабом потоке плазмообразующего газа при расходе последнего 3–5 л/мин. Повышение расхода сверх рекомендуемого приводит к обрыву малоамперной вспомогательной дуги, в результате чего не происходит поджига и основной дуги. При слишком малом расходе газа плазменную дугу, горящую внутри резака, не удастся выдуть наружу из сопла или она столь коротка, что ее длины не хватает для создания токопроводящего мостика между электродом и разрезаемым листом. В этом случае режущая дуга также не возникает.

После поджига дуги увеличение расхода плазмообразующей среды (60–90 л/мин) приводит к обжатию плазменного столба дуги, ширина реза уменьшается, скорость резки возрастает, при этом напряжение дуги повышается (рис. 185), что при крутопадающей характеристике источника тока равносильно увеличению мощности дуги [253].

Рис. 185.  
Зависимость  
напряжения  
на дуге  $U_d$ ,  
скорости резки  $V_p$ ,  
средней ширины  
реза  $B_p$  от  
расхода воздуха  $Q_r$   
(толщина угле-  
родистой стали  
65 мм, сила тока  
350 А, диаметр  
сопла 3,5 мм,  
длина канала сопла  
6,5 мм)





Аналогичное влияние на процесс плазменной резки оказывает увеличение длины канала сопла (рис. 186). При увеличении длины канала до 6,5 мм эффективность столба плазменной дуги возрастает, ширина реза по верхней и нижней плоскостям листа примерно одинакова и равна 6–6,5 мм [253]. Длина канала не должна превышать определенных пределов. Чрезмерное увеличение длины канала при заданном оптимальном его диаметре приводит к значительным потерям энергии на нагрев сопла и может вызвать образование двойной дуги. Для канала диаметром 3,5–3,6 мм оптимальная длина 6–7 мм.

Ширину реза устанавливают с учетом суммарного воздействия ряда факторов: диаметра сопла, силы тока, скорости резки, состава и расхода плазмообразующего газа, расстояния от нижнего среза сопла до поверхности разрезаемого металла [250]. Большое влияние оказывает диаметр сопла, определяющий сечение столба режущей дуги. В первом приближении ширину реза по верхней кромке можно принимать равной двум диаметрам сопла.

Для обеспечения надежной работы при силе тока порядка 300 А и толщине разрезаемого металла 10–30 мм целесообразно использовать сопла с диаметром канала 3 мм. Для резки стали толщиной 31–50 мм применяют сопла большего диаметра, а для резки стали толщиной 3–10 мм используют сопла диаметром 1–2 мм.

Важным для процесса плазменной резки является пробивка металла в начальный момент. При резке стали толщиной 6–20 мм выдержка времени на пробивку 2–2,5 с. Максимальная толщина

стали, которую можно пробить без больших затруднений при ручной плазменной резке, 40 мм. При резке на переносных и стационарных машинах максимальная толщина пробиваемого листа установлена равной 30 мм для всех металлов. При необходимости пробивки металла большей толщины в начале реза следует просверлить отверстие диаметром не менее 6 мм.

В табл. 125 приведены рекомендуемые режимы машинной воздушно-плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной 6–30 мм. При этом сила тока равна  $270 \pm 30$  А, расход воздуха 80–90 л/мин, расстояние от резака до поверхности разрезаемого металла 10–12 мм, ширина реза по нижней кромке 3–3,5 мм, а неперпендикулярность реза 0,5–1 мм.

Следует отметить, что машинную воздушно-плазменную резку в широком диапазоне толщин осуществляют при постоянной регулировке аппаратуры. Изменяется только скорость движения плазматрона в зависимости от толщины металла. Напряжение дуги используют для контроля за правильным протеканием процесса. Выход величины напряжения за заданные пределы свидетельствует об отклонении какого-нибудь исходного параметра, например, об изменении расхода воздуха, расстояния от резака до листа, т. е. сигнализирует о необходимости проверки отдельных составляющих процесса. Постоянство регулировки аппаратуры является большим преимуществом плазменной резки углеродистых сталей по сравнению с кислородной, так как эксплуатация оборудования существенно упрощается. Технология плазменной резки малоуглеродистых, низколегированных и легированных конструкционных сталей практически одинакова.

		Таблица 125. Режимы машинной воздушно-плазменной резки малоуглеродистых и низколегированных сталей							
		Толщина разрезаемой стали, мм							
Параметр		6	8	10	12	14	16	20	30
Скорость резки, см/с	5–5,1	4–4,1	3,15–3,3	2,8–3,0	2,5–2,65	2,16–2,33	1,66–1,83	1,0–1,1	
Напряжение дуги, В	140–145	145–150	150–155	155–160	160–165	160–165	165–170	170–175	



Доступность и экономичность сжатого воздуха как плазмообразующей среды способствовали интенсивному развитию плазменной резки. В то же время воздух, содержащий 78% азота и примерно 21% кислорода, не является идеальной плазмообразующей средой с точки зрения обеспечения максимальной скорости резки и качества реза. Рядом исследователей было установлено, что увеличение содержания кислорода в плазмообразующей азотно-кислородной смеси по отношению к воздуху дает возможность существенно (на 40–50%) повысить скорость резки и уменьшить ширину зоны термического влияния [248, 251, 261]. При этом было также обнаружено, что в отличие от хромоникелевых сталей, скорость резки которых возрастает с повышением концентрации кислорода до 100%, резка углеродистых сталей ускоряется только при повышении его концентрации до 60–70% (рис. 187). Дальнейшее увеличение концентрации кислорода до 100% обеспечивает некоторый рост скорости резки по сравнению со скоростью воздушно-плазменной резки. Однако достигнутая скорость резки ниже приведенного на рис. 187 максимума.

Этот феномен автор [283] объясняет особенностями окисления металла при плазменной резке в азотно-кислородных смесях. В отличие от газопламенной кислородной резки (при которой разбавление кислорода азотом сильно уменьшает количество необходимых для реакции столкновений частиц кислорода и железа, а при значительном разбавлении и вовсе исключает их) при плазменно-дуговой резке в азотно-кислородных смесях эффективны столкновения с частицами железа не только частиц кислорода, но (в боль-

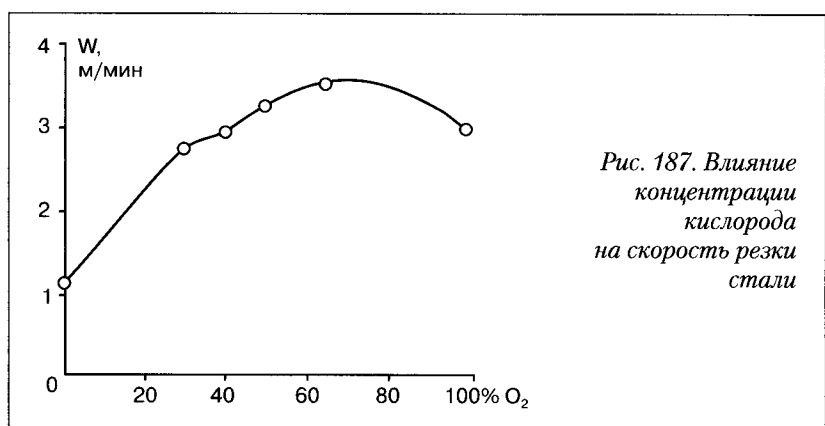


Рис. 187. Влияние концентрации кислорода на скорость резки стали

шей степени) и частиц оксида азота NO, что делает более интенсивным окисление железа даже при малом содержании кислорода в плазме. Повышение концентрации кислорода в плазме усиливает этот эффект за счет образования частиц оксида азота. При обогащении плазмы кислородом содержание активно окисляющих частиц возрастает и экзотермическая реакция образования оксида азота развивается, пока выход оксида азота не достигнет максимума при содержании 60–70% кислорода. В дальнейшем количество оксида азота не прибавляется из-за недостатка в плазме азота; нитрооксидный эффект уступает место традиционному кислородному механизму окисления. Поэтому оптимальная скорость резки достигается при содержании 60–70% кислорода в плазме.

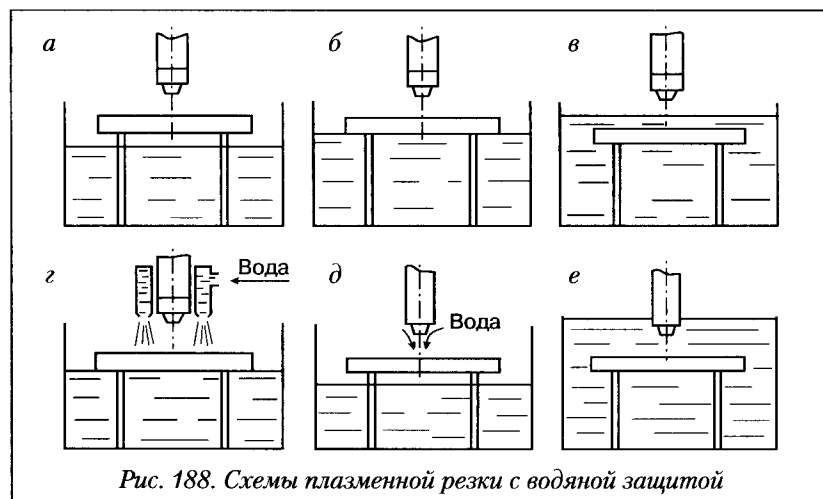
В 1980–1982 гг. впервые было осуществлено промышленное применение резки воздушной плазмой, обогащенной кислородом с помощью селективно-диффузионного устройства, которое показало, что производительность резки повышается на 20–30% с обогащением воздуха кислородом до 40%. Однако наличие ряда специфических требований к сжатому воздуху и несовершенство селективно-диффузионных устройств ограничивало интерес к применению богатых кислородом смесей. Ориентировочные режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в обогащенных кислородом плазмообразующих средах приведены в *табл. 126*.

В последнее десятилетие значительно вырос интерес к технологии плазменной резки с использованием водяной защиты. Как отмечалось выше, эта технология радикально улучшает санитарно-гигиенические условия, способствует снижению остаточных деформаций и др. Основные способы воздушно-плазменной резки с водяной защитой приведены на *рис. 188*. Резку можно выполнять с воздушным зазором между разрезаемым листом и поверхностью воды (*рис. 188, а*), с касанием листа водной поверхности (*рис. 188, б*), с погружением листа в воду (*рис. 188, в*), с дополнительной водяной завесой вокруг плазмотрона (*рис. 188, г*) и плазменной дуги (*рис. 188, д*), с погружением листа и плазмотрона в воду (*рис. 188, е*). При всех вариантах резки вредные выделения поглощаются водой. Наибольшее промышленное применение получили способы резки, показанные на *рис. 188, б, в*. Режимы обычной воздушно-плазменной резки и резки с водяной защитой малоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в *табл. 127*.

Резка с водяной защитой отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной

**Таблица 126. Режимы машинной резки углеродистой и низколегированной сталей в кислородсодержащих плазмообразующих средах**

Расход рабочего газа, л/мин			Толщина металла, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, см/с	Средняя ширина реза, мм
воздух	кислород	азот						
80	—	—	6	270–290	3	140–145	5,0–5,1	2,5–3,0
			10			145–150	3,7–4,2	2,5–3,0
			20			165–170	1,7–2,0	2,5–3,0
90	—	—	30	290–310	3	175–180	1,0–1,1	3,0–4,0
			40			190–195	0,5–0,66	4,0–6,0
—	70–80	—	6	260–280	3	120–130	6,0–6,4	2,5–3,0
			10			125–135	4,0–4,5	2,5–3,0
			20	280–300		135–145	1,83–2,16	2,5–3,0
			30			150–160	1,0–1,25	3,0–3,5
			40			170–180	0,5–0,66	3,5–5,0
—	60–75	20–25	10	500	5	70–75	4,16–4,5	4,0
			20			75–80	1,66–1,83	5,0
	45–60	15–20	30			80–85	0,83–1,16	6,0
			40			85–95	0,58–0,66	7,0



*Рис. 188. Схемы плазменной резки с водяной защитой*

**Таблица 127. Режимы машинной воздушно-плазменной резки с водяной защитой малоуглеродистых и низколегированных сталей**

Толщина металла, мм	Напряжение дуги, В	Сила тока, А	Скорость резки, см/с		
			обычной	над водой	над водой с водяной защитой
10	155–160	200	4,0	3,8	3,6
	165–170	300	6,8	6,5	6,1
	175–180	400	8,2	7,8	7,4
20	155–160	200	1,9	1,7	1,6
	165–170	300	3,4	3,1	2,9
	175–180	400	4,1	3,7	3,5
30	155–160	200	1,0	0,85	0,8
	165–170	300	2,0	1,7	1,6
	175–180	400	2,6	2,2	2,0
40	155–160	200	0,7	0,6	0,56
	165–170	300	1,2	1,0	0,95
	175–180	400	1,4	1,2	1,1
50	155–160	200	0,5	0,42	0,4
	165–170	300	0,7	0,6	0,56
	175–180	400	1,0	0,85	0,8

воздушно-плазменной резкой (кроме способа, показанного на *рис. 188, а*). Для подавления процесса образования грата скорость резки с использованием водяной защиты снижается. При резке с водяной защитой на 10–20% сокращается ширина реза.

На *рис. 189* приведена схема так называемой плазменной водоинжекционной резки, запатентованной в 1968 г. Ричардом В. Кочем, президентом компании Hypertherm [284].

В процессе водоинжекционной плазменной резки вода радиально вводится в дугу. Радиальное давление воды (до 1,5 МПа) обеспечивает более высокую степень сжатия дуги, чем та, что может быть достигнута за счет конструкции медного сопла. При этом температура дуги приближается к 50 000 К. При резке такой дугой уменьшается скос кромки, увеличивается скорость резки, уменьшается грат и оплавление верхней кромки.

Обычно в качестве плазмообразующего газа при водоинжекционной резке используют азот.

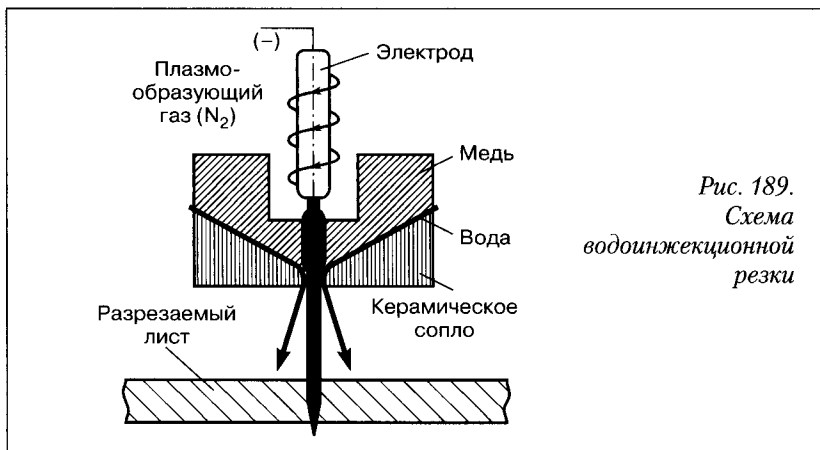


Рис. 189.  
Схема  
водоинжекционной  
резки

Подача воды под давлением в дугу значительно увеличивает ресурс керамического сопла. Это происходит благодаря тому, что паровой пограничный слой изолирует сопло от теплоты дуги и, охлаждая водой, защищает сопло в точке максимального сжатия и максимальной температуры дуги. Керамическое сопло позволяет практически исключить двойное дугообразование и не разрушается.

Компания Hypertherm занимает лидирующие позиции в мире по выпуску современных систем для водоинжекционной резки. Режимы резки материалов по системе HT 4001 этой фирмы приведены в *табл. 128*.

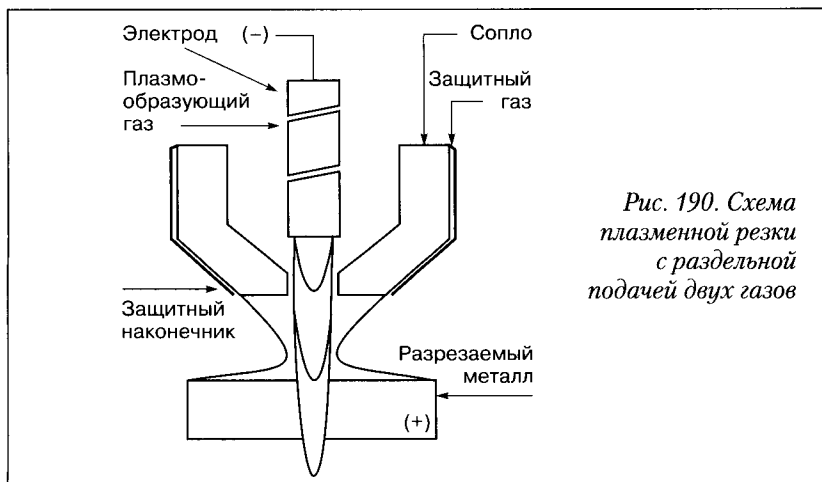
В мировой практике широко используют плазменную резку с раздельной подачей двух газов — плазмообразующего и защитного (*рис. 190*) [285]. При этом имеется возможность перемещения сопла внутри керамического защитного наконечника, что предотвращает короткое замыкание сопла с разрезаемой заготовкой и, кроме того, уменьшает опасность двойного дугообразования. Защитный газ закрывает зону резки, улучшая качество реза, несколько увеличивает скорость резки, а также охлаждает сопло и защитный наконечник. Комбинация плазмообразующего и защитного газов позволяет обеспечить нужную стойкость расходных материалов, скорость резки и возможную толщину разрезаемых материалов, а также дает желаемое качество реза.

Комбинации плазмообразующего и защитного газов:

- плазмообразующий газ — воздух, защитный газ — воздух. Обеспечивают удовлетворительное качество резки, хотя наблюдается

**Таблица 128. Режимы водоструйной резки**

<i>Металл</i>	<i>Толщина металла, мм</i>	<i>Сопло, типоразмер</i>	<i>Напряжение дуги, В</i>	<i>Сила тока дуги, А</i>	<i>Скорость резки, мм/мин</i>
Нержавеющая сталь	1	.120	125	250	11430
	6	.120	145	260	3810
	10	.166	150	380	3175
	19	.166	160	400	1270
	25	.187	165	550	1525
	33	.187	170	580	760
	50	.220	190	700	635
	75	.220	200	750	305
	100	.250	225	1000	255
	130	.250	235	1000	150
Низкоуглеродистая сталь	1	.120	125	250	11430
	6	.120	145	260	3810
	10	.166	150	380	3175
	13	.166	155	400	2540
	19	.187	165	500	1905
	25	.187	165	600	1525
	32	.187	175	600	1145
	44	.220	200	725	890
	50	.220	205	725	760
	60	.220	210	760	510
Алюминий	1	.120	125	250	13715
	6	.120	145	260	4570
	10	.166	150	350	3810
	19	.166	160	400	1525
	25	.187	165	500	1830
	38	.187	170	550	915
	50	.220	190	700	760
	75	.220	200	750	355
	100	.250	210	900	305
	130	.250	210	1000	200
150	.250	210	1000	180	



*Рис. 190. Схема плазменной резки с раздельной подачей двух газов*

некоторое азотирование поверхности углеродистой стали, а также окисление поверхности алюминия и нержавеющей стали;

- плазмообразующий газ — кислород, защитный газ — воздух. Обеспечивают наибольшую скорость и высокое качество резки углеродистой стали. Кромки реза не азотированы, а грат практически отсутствует. Диапазон силы тока дуги от 1,5 до 260 А;
- плазмообразующий газ — азот, защитный газ — воздух. Рекомендуют для резки нержавеющей сталей и алюминия толщиной до 100 мм при силе тока дуги 20–750 А;
- плазмообразующий газ — смесь Н35 (аргон — 35%, водород — 65%), защитный газ — азот. Используют при силе тока дуги от 750 до 1000 А для резки нержавеющей стали и алюминия толщиной до 150 мм.

Возможны и другие комбинации плазмообразующего и защитного газов. Взамен защитного газа можно использовать и воду.

Для выполнения плазменной резки с раздельной подачей плазмообразующего и защитного газов компания Hypertherm выпускает системы МАХ-200 и НТ-2000. Эти системы обеспечивают двухступенчатую стабилизацию расстояния между плазмотроном и разрезаемым листом: начальную (установочную) — индуктивными датчиками, выдвигающимися с помощью пневмоцилиндра; рабочую (основную) — напряжением дуги. В механизированной системе, основанной на модели НТ-2000, может быть применена Long-Life-технология, предусматривающая использование микропроцес-

сора в источнике питания, а также особое крепление и охлаждение катодного узла плазмотрона, что дает возможность одному катоду выдержать более 1200 стартов, прежде чем возникнет потребность в его замене.

Оборудование для плазменной резки с отдельной подачей плазмообразующего и защитного газов обычно ориентировано на применение как при сухой резке, так и при резке под слоем воды толщиной 80–100 мм (с погружением плазмотрона в воду), что значительно снижает шум и кардинально улучшает санитарно-гигиенические условия резки.

Фирмой Kjellberg разработана технология Ni-Focus плазменной резки. Благодаря особой конструкции плазмотрона струя плазмы сжимается до диаметра 1,2 мм с допуском  $\pm 0,1-0,2$  мм и позволяет резать металл толщиной до 30 мм. Неперпендикулярность реза не превышает 0,025–0,05 мм. Рез свободен от грата.

Фирма SMB (Германия) разработала установку для плазменной обрезки кромок листов высокопрочной стали длиной 5–15 м и шириной 1,5–3,4 м. Установка укомплектована водоохлаждаемыми плазмотронами Kjellberg PB–375W2/O<sub>2</sub>, которые генерируют очень тонкую струю плазмы. Два плазмотрона обрезают кромки листа, а третий разделяет обрезки на куски, удобные для транспортировки. При зажигании вспомогательной дуги системой XL–Life-Time используют воздух, плазмообразующим газом при резке служит кислород. Зажигание вспомогательной дуги происходит по получении сигнала датчика о нахождении листа на позиции резки, а после попадания вспомогательной дуги на листе с помощью электромагнитного клапана подается вместо воздуха кислород. Сила тока резки при ПВ 100% 250 А, скорость резки при толщине листа 2,8–12,5 мм находится в пределах 10–3 м/мин, цикл обрезки листа длиной 13 м и толщиной 5 мм длится 140 с. Обеспечивается допуск на точность обрезки кромок  $\pm 0,4$  мм по всей длине листа. Расплавленный металл, выдуваемого из реза струей плазмы, приобретает форму гранул в ванне с водой. В установке предусмотрена система диагностики.

Механические способы резки тонколистовой низкоуглеродистой стали, особенно по криволинейному контуру, достаточно трудоемки и требуют специального оборудования, а газокислородная резка вызывает значительные деформации. Для этих целей достаточно эффективной является микроплазменная резка с использованием воздуха или кислорода. При этом используют специальные плазмотроны, обеспечивающие устойчивое горение малоамперной



**Таблица 129. Режимы микроплазменной резки малоуглеродистой стали**

<i>Толщина металла, мм</i>	<i>Расход воздуха, л/мин</i>	<i>Диаметр сопла, мм</i>	<i>Сила тока, А</i>	<i>Напряжение дуги, В</i>	<i>Скорость резки, см/с</i>	<i>Ширина реза, мм</i>
1–3	10	0,8	30	130	5,0–8,3	1,0–1,5
3–5	12	1,0	50	110	3,4–5,0	1,6–1,8
5–7	15	1,4	75	110	2,5–3,3	1,8–2,0
7–10	15	1,4	100	120	1,7–2,5	2,0–2,5

дуги. Рекомендуемые режимы микроплазменной резки малоуглеродистой стали приведены в *табл. 129*. Резку стали толщиной, указанной в *табл. 129*, можно выполнять на большей силе тока с более высокими скоростями, используя сопла диаметром 1,5–2 мм, но при этом ширина реза несколько возрастает.

Перспективным направлением совершенствования микроплазменной резки считается использование плазмотронов с диаметром канала сопла 0,3 мм, имеющих вихревую и магнитную стабилизацию и использующих в качестве плазмообразующего газа чистый кислород [256].

**Режимы резки нержавеющей стали, цветных металлов и их сплавов.** Как отмечалось выше, скорость резки и качество реза зависят прежде всего от мощности дуги и состава плазмообразующего газа. В то же время производительность и качество реза плазменной дугой во многом определяются плотностью, скрытой теплотой плавления, теплопроводностью и теплоемкостью разрезаемого материала. Последние две характеристики косвенно учитываются в формуле (23) полным тепловым КПД  $\eta_{\text{пр}}$ , представляющим произведение эффективного  $\eta_{\text{и}}$  и термического  $\eta_{\text{т}}$  КПД.

По некоторым данным, при воздушно-плазменной резке металла толщиной 6–40 мм полный тепловой КПД составляет при обработке углеродистой и низколегированной стали 0,207–0,272, нержавеющей стали – 0,122–0,168, алюминия и его сплавов – 0,084–0,142, меди и медных сплавов – 0,037–0,100. Поэтому при назначении режимов резки необходимо учитывать следующее.

**Резку нержавеющей стали** следует выполнять с использованием в качестве плазмообразующих газов воздуха, воздуха, обогащенного кислородом, аргоно-водородных и азотно-водородных смесей, а также чистого азота.

**Воздушно-плазменную резку** нержавеющей сталей следует производить на режимах, близких к режимам резки низкоуглеродистых и низколегированных сталей [249, 253]. Наименьшей шероховатости поверхности реза коррозионностойкой стали достигают при резке в азотно-водородных смесях. Хорошие результаты получают при резке в среде «воздух-вода» [253]. В канале сопла под воздействием высоких температур происходит интенсивное испарение воды и ее диссоциация. Плазменная дуга при этом уплотняется, улучшается перенос энергии, удаление расплавленного металла и шлака из полости реза происходит с большей интенсивностью. Режимы машинной резки коррозионностойких, жаростойких и плакированных сталей в среде воздуха с водой (см. рис. 188, д) представлены в табл. 130.

Резы хромоникелевых сталей, выполненные воздушно-плазменной резкой, в том числе с добавкой воды, можно в большинстве слу-

**Таблица 130. Режимы воздушно-плазменной машинной резки коррозионностойких, жаростойких и плакированных сталей, в среде «воздух-вода»**

Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с	
4	270–290	160–165	50–59	
6			42–50	
8		165–170	34–42	
10			29–34	
12		170–175	25–29	
14			24–25	
16		175–180	22–24	
18			20–22	
20	290–310	180–185	17–20	
24		185–190	13–15	
30		190–195	9–10	
40		195–200		5–7

*Примечания:* 1. Расход воздуха на поджиг дуги 0,25–0,33 л/с; на резку — 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 2,5–3,5 мм. 4. При резке в среде воздуха или азота скорость резки должна быть снижена на 15–20%.

чаев сваривать после зачистки металлической щеткой без дополнительной механической обработки. В тех случаях, когда кромки реза будут работать в особо агрессивных средах или при повышенных температурах, провоцирующих коррозию, предпочтительно использовать в качестве плазмообразующего газа аргоно-водородные или азотно-водородные смеси, а также чистый азот. Если такой возможности нет, то кромки подвергают механической обработке.

**Алюминий и его сплавы** относятся к материалам, для которых применение плазменной резки наиболее эффективно, так как высокая скорость резки сочетается с хорошим качеством реза [248, 249, 252]. Они склонны к образованию тугоплавких окислов. Поэтому при резке необходимо обеспечить как можно более полное удаление окисленного металла из полости реза. Кроме того, алюминий в расплавленном состоянии активно поглощает водород. Важно, чтобы литой участок на кромке реза алюминия был минимальных размеров.

Наиболее высокой защиты расплавленного алюминия от окисления и наводороживания достигают при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона. Преимуществом аргона является также способность поддерживать плазменную дугу при небольших напряжениях и малой силе тока. Аргоновую плазму обычно применяют при ручной резке листов из алюминиевых сплавов сравнительно небольшой толщины (до 12–20 мм). Недостаток аргоновой плазмы — относительно малая проплавливающая способность дуги и, как следствие, наименьшая по сравнению со всеми другими плазмообразующими газами скорость резки.

Скорость резки можно существенно повысить за счет добавки водорода к аргону. Аргоно-водородные смеси, содержащие 35–50% водорода, обеспечивают минимальную шероховатость реза. По мере увеличения толщины разрезаемого металла рекомендуют увеличивать содержание водорода в смеси, доводя его при толщине 80–100 мм до 60–80%.

В оплавленном слое алюминиево-магниевого сплава наблюдается равномерное по толщине реза выгорание магния. Внешний признак выгорания — интенсивное выделение белого дыма. При резке этих сплавов необходимо точное соблюдение режимов резки. Резы высокого качества получают при максимально возможной скорости резки и содержании в аргоновой смеси 50% водорода. Для резки алюминиево-марганцевых сплавов и сплавов типа дуралюмина используют смеси с меньшим содержанием водорода, а также азотно-водородные смеси.

**Таблица 131. Ориентировочные режимы плазменной резки  
алюминиевых сплавов**

Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напряже- ние дуги, В	Мощ- ность, кВт	Расход газа, л/с		Скорость резки, мм/с
					аргона/ азота	водо- рода	
15	3	250	140–160	40	0,2/0,4	0,14	17
30	5		180–200			0,3	10
50	5	450	160–180	50	0,4/0,5	0,3	7,5
80						0,4	7,0

Ориентировочные режимы плазменной резки алюминиевых сплавов с применением в качестве плазмообразующих газов аргона, азота и водорода приведены в *табл. 131*.

При воздушно-плазменной резке алюминиевых сплавов толщиной 30 мм шероховатость поверхности достигает  $Ra=150...180$  мкм. При воздушно-плазменной резке сплава такой же толщины с водяной защитой шероховатость существенно ниже ( $Ra=80...90$  мкм). Налипания частиц на поверхности реза в отличие от обычной воздушно-плазменной резки не наблюдается. С уменьшением толщины алюминиевого сплава шероховатость реза снижается. Например, при резке алюминиевого сплава толщиной 8 мм она находится в пределах  $Ra=40...50$  мкм.

Режимы плазменной машинной резки алюминиевых сплавов с использованием в качестве плазмообразующего газа воздуха с добавкой воды приведены в *табл. 132*. Для улучшения санитарно-гигиенических характеристик процесс рекомендуют вести с применением водяной защиты (*рис. 188, д*).

**Медь и медные сплавы** характеризуются высокой теплоемкостью и теплопроводностью, поэтому при их резке следует использовать дуги с большей мощностью, чем при резке стали. В качестве плазмообразующего газа применяют воздух и азотно-водородные смеси с высоким содержанием водорода. Качество резов при этом примерно одинаково. При воздушно-плазменной резке меди на поверхности реза образуется легкоудаляемый стекловидный грат.

При резке латуни используют те же рабочие газы, что и при резке меди. По сравнению с медью скорость резки латуни может быть увеличена на 25–30% (*табл. 133, 134*). В целях улучшения санитарно-гигиенических характеристик резку меди и ее сплавов предпочтительно вести с водяной защитой (*см. рис. 188, д*).

**Таблица 132. Режимы воздушно-плазменной машинной резки  
алюминиевых сплавов в среде «воздух-вода»**

Толщина металла, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с
4	270–290	140–145	84–100
6			67–84
8	145–150	145–150	59–67
10			50–59
12	150–155	150–155	47–50
14			42–45
16	270–290	155–160	39–42
18			34–37
20	290–310	160–165	30–34
24		165–170	24–27
30		170–175	17–20
40		180–185	10–12

Примечания: 1. Расход воздуха на поджиг дуги 0,25–0,33 л/с; на резку – 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку – 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 3,5–4,0 мм. 4. При резке в среде воздуха или азота скорость резки должна быть снижена на 25–30%.

**Таблица 133. Ориентировочные режимы плазменной резки меди  
и латуни**

Металл	Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Напря- жение дуги, В	Мощ- ность дуги, кВт	Расход газа, л/с				Ско- рость резки, мм/с
						ар- гона	азо- та	водо- рода	воз- духа	
Медь	5	3	300	75	22	–	0,6	–	–	25
	15	4	300	92	25	–	0,53	–	–	11
	25		350	90	31	0,28	–	0,14	–	4
	40	7	700	120	84	0,1	–	1,1	2,8	10
	100			145	101		–			3
Латунь	6	3	260	70	18	–	1,17	–	–	29
	30	4	350	85	30	–	1,0	–	–	4
	90	5	500	140	70	–	0,56	0,28	–	3,4

**Таблица 134. Режимы воздушно-плазменной резки меди и сплавов на медной основе в среде «воздух-вода»**

Толщина металла, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с
4	270–290	140–145	118–126
6			50–59
8			44–50
10		145–150	34–42
12			30–37
14		150–155	27–30
16		155–160	24–27
18	290–310	160–165	20–24
20		165–170	17–20
24		170–175	13–17
30		180–185	10–12

*Примечания: 1. Расход воздуха на поджиг дуги 0,25–0,33 л/с; на резку — 1,33–1,5 л/с. 2. Расход воды на резку 0,005–0,06 л/с. 3. Ширина реза по нижней кромке 2,5–3,0 мм. 4. При резке в среде воздуха или азота скорость резки должна быть снижена на 10–15%.*

**Титан и сплавы на его основе** хорошо режет плазменная дуга. Наибольшей производительности достигают при использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха и кислорода. При резке воздушной плазмой кромки реза на глубине 0,1–0,2 мм содержат по сравнению с основным металлом в 1,5 раза больше кислорода, в 7–10 раз — азота, в 4–8 раз — водорода. Поэтому кромки титановых заготовок после плазменной резки подлежат механической обработке.

**Режимы резки толстолистового металла.** При резке конструкционных сталей толщиной более 40 мм обычно используют кислородную резку, так как для таких толщин она является энергетически более выгодным способом [255]. Кроме того, качество реза сталей больших толщин, выполненного плазменной дугой, в ряде случаев уступает качеству реза при кислородной резке. Возникают также сложности с пробивкой листа плазменной дугой в произвольном месте на его поверхности.

В настоящее время воздушно-плазменную резку толстолистовых конструкционных сталей обычно применяют как разделительную, когда к качеству реза не предъявляют высоких требований. Тем не менее, с потребительской точки зрения задача использова-

ния плазменной дуги для резки толстолистового черного и цветного металлов является достаточно актуальной [281].

С увеличением толщины разрезаемого металла необходимо увеличивать мощность плазменной дуги и расход плазмообразующего газа. Мощность плазменной дуги увеличивают как за счет повышения силы тока, так и напряжения. При этом возрастает тепловая нагрузка на катод, и он может быстро выйти из строя.

Существует несколько направлений, которые обеспечивают повышение мощности плазменной дуги.

1. Использование плазмотронов с вольфрамовыми электродами, в которых в качестве плазмообразующих газов применяют аргоно-водородные, азотно-водородные и аргоно-азотно-водородные сме-

**Таблица 135. Режимы воздушно-плазменной резки в аргоно-водородной смеси**

Металл	Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока дуги, А	Напряжение дуги, В	Мощность дуги, кВт	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч		Скорость резки, см/с
						аргона	водорода	
Сталь	24	5	700	130	91	0,63	3,5	2,66
	30	6	700	140	98	1,2	3,5	2,36
	36	6	700	150	105	1,2	3,5	2,02
	40	5	700	165	115,5	0,63	3,5	1,91
	70	6	700	150	105	1,7	3,5	0,72
	80	6	700	135	94,5	1,0	3,5	0,47
	120	6	800	160	128	1,5	4,0	0,29
Медь	20	4	600	120	72	1,5	3,0	2,50
	40	6	700	120	84	0,8	3,5	0,94
	50	6	700	125	87,5	0,8	3,5	0,55
	60	6	700	123	86,1	0,8	3,5	0,42
	80	6	700	135	94,5	1,0	3,5	0,23
	80	7	1100	142	156	1,0	5,0	0,66
	100	4	700	150	105	1,5	3,5	0,30
	120	6	700	160	102	0,8	3,5	0,10
Алюминий	40	6	700	125	86	1,0	3,5	2,77
	50	3	800	135	108	1,5	2,5	3,33
	70	4	800	140	72	1,5	2,5	1,94
	100	6	900	155	139,5	1,0	4,5	1,38

си [248]. В этом случае устойчивую работу плазмотронов обеспечивает сила тока до 800 А и напряжение дуги 120–160 В.

Режимы плазменной резки в аргоно-водородной смеси различных материалов толщиной от 20 до 120 мм приведены в *табл. 135*.

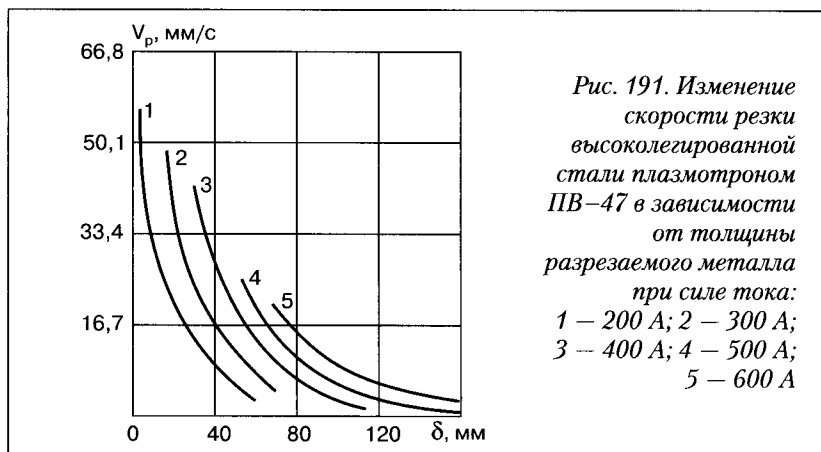
2. Использование обратной полярности: «плюс» подводят к электроду, а «минус» — к разрезаемому металлу [253]. При этом катодное пятно более глубоко проникает в полость реза. При применении двухатомных газов или их смесей, например, азота или воздуха, область существования катодного пятна расширяется и смещается в нижнюю часть фронтальной поверхности реза, эффект усиливается с ростом напряжения дуги.

Резку металлов толщиной 30–60 мм рекомендуют выполнять, используя в качестве плазмообразующего газа воздух, при силе тока дуги 360–400 А, размере канала сопла  $3,5 \pm 1$  мм при длине 6–8 мм, расходе воздуха 1,7–2,0 л/с. При указанных силе тока и расходе воздуха стандартный гафниевый электрод работоспособен в течение 1,5–2 ч, что соответствует 60 м реза при толщине металла 50 мм. Режимы резки приведены в *табл. 136*.

**Таблица 136. Режимы воздушно-плазменной машинной резки металлов больших толщин**

Металл	Толщина металла, мм	Сила тока, А	Расход воздуха на резку, л/с	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/с	Ширина реза, мм
Сталь конструкционная	30	360–400	1,7–2,0	190–195	25	4–5
		850–620		200–205	40	5–6
	40	360–400	2,16–2,5	190–200	14	5–6
				200–205	29	6–6,5
	50	580–620		200–210	9	6–7
				205–210	21	7–7,5
	60	360–400	1,7–2,0	205–215	6	7–7,5
	65	580–620	2,16–2,5	210–220	15	7,5–8,5
				9		
Сталь коррозионно-стойкая	30	350	1,7–1,8	180–190	24	4–5
		500		190–195	30	5–6
Латунь	30	350	1,7–1,83	180–190	19	5–6
	50			200–205	11	7,5–8
Алюминий	55			200–205	12	6–7





*Рис. 191. Изменение скорости резки высоколегированной стали плазмотроном ПВ-47 в зависимости от толщины разрезаемого металла при силе тока: 1 – 200 А; 2 – 300 А; 3 – 400 А; 4 – 500 А; 5 – 600 А*

3. Использование расщепленной и вращающейся дуги. При расщеплении дуги происходит перераспределение токовой и тепловой нагрузок на большую часть поверхности за счет установки в катододержателе нескольких гафниевых или циркониевых вставок [253, 280]. Эти вставки включаются в работу по мере повышения силы тока примерно через каждые 200 А.

Вращающуюся дугу применяют в плазмотронах с медными полами электродами [253]. Отличительной особенностью таких электродов является интенсивное перемещение опорного пятна дуги по сильно охлаждаемой внутренней поверхности под действием газового вихря, создаваемого отверстиями в завихрителе. При этом не происходит сильного локального нагрева и в сочетании с интенсивным наружным охлаждением обеспечивается длительный срок службы электродов (примерно 40 ч). На *рис. 191* показаны кривые изменения скорости резки высоколегированной стали различной толщины в зависимости от силы сварочного тока.

Как отмечалось выше, пробивка толстого листа в начальной стадии резки является довольно серьезной задачей. Обычно пробивку стальных листов толщиной свыше 30 мм при резке на стационарных машинах производят в процессе перемещения резака над поверхностью листа с одновременным его опусканием с высоты 20–25 мм до рабочей высоты 10–12 мм. При этом выплавленная масса выбрасывается в сторону, противоположную движению резака.

Удовлетворительную пробивку получают, если мощность дуги достаточна для надежного прорезания металла данной толщины, си-

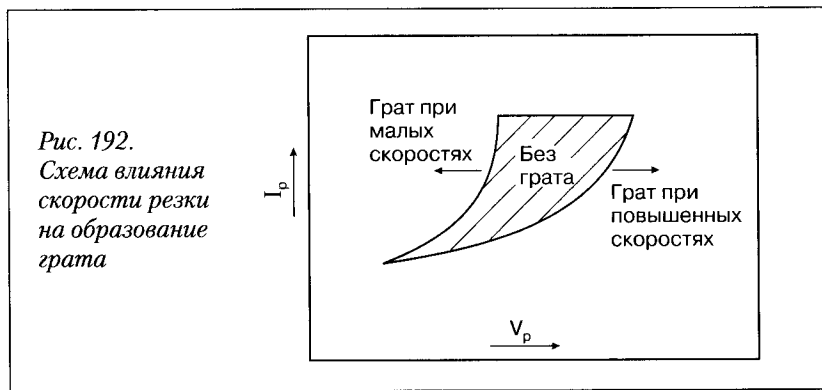
стема регулирования и исполнительные устройства обеспечивают плавное нарастание силы тока и подачи плазмообразующего газа, скорость перемещения плазмотрона в 1,5–2 раза меньше рабочей.

При резке листов свыше 70 мм пробивка металла затруднена, в этом случае необходимо предварительно просверливать отверстие диаметром, не превышающим ширины реза (до 10–12 мм).

**Качество реза.** Качество реза, выполненного плазменно-дуговой резкой, характеризуется размерами образующегося грата, отклонениями перпендикулярности реза, шероховатостью, протяженностью зоны термического влияния и газонасыщенностью кромок.

При плазменно-дуговой резке углеродистой стали размеры грата, как правило, значительно меньше, чем при газокислородной резке углеродистой стали той же толщины. В то же время на размеры грата при плазменно-дуговой резке оказывает влияние ряд факторов: скорость резки, расход плазмообразующего газа, расстояние между плазмотроном и поверхностью разрезаемых листов и др. [253, 263, 264, 265].

Для заданной силы тока существует диапазон скоростей резки, при которых образование грата минимально. Схематически это показано на *рис. 192* [263]. Грат образуется как при малых, так и при повышенных скоростях резки. На рисунке заштрихована зона, в которой размеры грата минимальны. Грат, образующийся при пониженных скоростях резки, легко удаляется с кромок реза. Удаление грата, образующегося при повышенных скоростях, является более трудоемкой операцией. На практике сталкиваются с проблемой удаления грата при работе на максимальных скоростях резки. Существует зависимость размеров грата от скорости резки



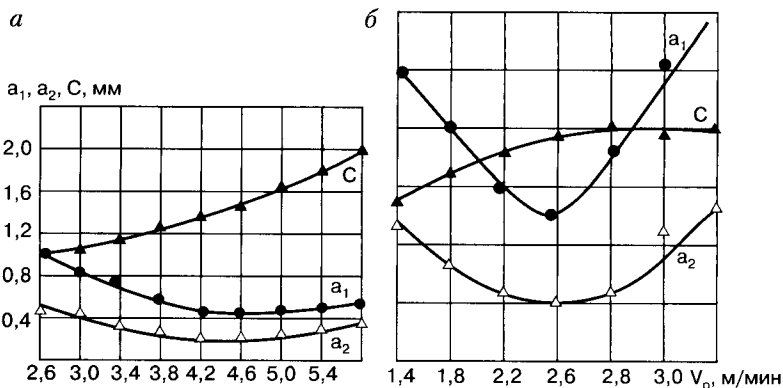


Рис. 193. Зависимость размеров грата  $a_1$ ,  $a_2$  и неперпендикулярности поверхности реза  $C$  от скорости резки металла толщиной  $\delta$  и 10 мм

(рис. 193). Причем с увеличением толщины металла скорость резки, при которой величина грата минимальна, уменьшается. Минимальный размер грата отмечается при расходе плазмообразующего воздуха 70–80 л/мин [265]. С уменьшением расхода воздуха величина грата возрастает, что можно объяснить ослаблением механического воздействия плазменного потока на нижнюю кромку листа.

Повышенное графообразование наблюдают и при увеличении расстояния от плазмотрона до поверхности листа, особенно когда резку осуществляют на скоростях, близких к предельно допустимым. Это происходит при резке листов либо не подвергнутых предварительной правке, либо имеющих остаточные деформации, возникшие в процессе обработки. В таких случаях применение автоматических устройств, поддерживающих расстояние между плазмотроном и разрезаемым листом, является обязательным.

Использование в качестве плазмообразующего газа кислорода взамен воздуха способствует уменьшению размеров грата [253, 263]. Это подтверждают данные, приведенные в табл. 137.

При резке с водяной защитой на кромках заготовок образуется большее количество грата, чем при обычной воздушно-плазменной резке [259, 260]. Для подавления процесса образования грата скорость резки при использовании водяной защиты снижают на 5–20% (см. рис. 188, б, в), а в отдельных случаях — до 40–50% (см. рис. 188, г).

**Таблица 137. Режимы резки и качество реза при воздушно-плазменной и кислородно-плазменной резке углеродистой стали**

Способ резки	Толщина металла, мм	Сила тока резки, А	Напряжение дуги, В	Диаметр сопла, мм	Скорость резки, см/с	Ширина реза, мм		Неперпендикулярность, мм	Высота графа, мм
						верхняя кромка	нижняя кромка		
Воздушно-плазменная	3	60-65	110-115	1,2	3,33	1,8	1,5	0,15	1,1
					4,16	1,8	1,4	0,20	0,9
					5,00	1,6	1,1	0,30	0,3
					5,83	1,6	1,0	0,30	0,5
Воздушно-плазменная с погружением листа в воду					3,33	1,7	1,4	0,15	1,6
					4,16	1,7	1,4	0,15	0,8
					5,00	1,5	1,2	0,15	0,5
					5,83	1,3	1,0	0,15	0,9
Кислородно-плазменная					3,33	2,0	1,8	0,10	0,6
					4,16	1,8	1,5	0,15	0,5
					5,00	1,7	1,4	0,15	0,2
					5,83	1,6	1,3	0,15	0,2
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	6,66	1,3	1,0	0,15	0,3				
	3,33	1,8	1,6	0,10	0,8				
	4,16	1,4	1,2	0,10	0,5				
	5,00	1,4	1,1	0,15	0,3				
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	5,83	1,3	1,0	0,15	0,6				
	6	90-100	120-130	1,5	2,50	2,6	1,7	0,45	1,0
					3,33	2,5	1,5	0,50	0,2
					4,16	2,4	1,2	0,60	0,8
2,50					2,2	1,5	0,35	0,3	
3,33					2,1	1,3	0,40	0,5	
4,16					2,0	1,1	0,45	1,0	

Продолжение таблицы 137

Способ резки	Толщина металла, мм	Сила тока резки, А	Напряжение дуги, В	Диаметр сопла, мм	Скорость резки, см/с	Ширина реза, мм		Неперпендикулярность, мм	Высота грат, мм
						верхняя кромка	нижняя кромка		
Кислородно-плазменная	6	90-100	120-130	1,5	2,50	2,8	2,5	0,15	0,6
					3,33	2,8	2,2	0,30	0,3
					4,16	2,6	1,6	0,50	0,2
					5,00	2,5	1,3	0,60	0,3
					2,50	2,3	2,0	0,15	0,4
					3,33	2,2	1,8	0,20	0,3
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	6	90-100	120-130	1,5	4,16	2,1	1,3	0,40	0,3
					2,50	2,3	2,0	0,15	0,4
					3,33	2,2	1,8	0,20	0,3
					4,16	2,1	1,3	0,40	0,3
					2,50	2,3	2,0	0,15	0,4
					3,33	2,2	1,8	0,20	0,3
Воздушно-плазменная	10	270-280	135-140	3,0	2,50	5,2	2,2	1,5	1,0
					3,33	5,2	1,8	2,6	0,5
					4,16	5,1	1,1	2,0	0,4
					5,00	5,0	0,8	2,2	0,5
					5,83	4,9	0,7	2,1	1,2
					2,50	4,6	2,0	1,3	1,2
					3,33	4,5	1,7	1,4	0,6
					4,16	4,5	1,1	1,7	0,5
					5,00	4,3	0,7	1,8	1,1
					5,83	4,3	0,7	1,8	1,2
					2,50	9,3	3,0	1,1	0,5
					3,33	9,2	2,6	1,3	0,4
Кислородно-плазменная с погружением листа в воду	10	270-280	135-140	3,0	4,16	5,0	2,2	1,4	0,2
					5,00	5,0	1,8	1,6	0,2
					5,83	5,0	1,6	1,7	0,6
					2,50	4,7	2,9	0,9	0,5
					3,33	4,6	2,8	0,9	0,4
					4,16	4,5	2,1	1,2	0,4
					5,00	4,5	2,1	1,2	0,5
					5,83	4,5	1,9	1,3	0,7

При плазменной резке ширина реза у верхних кромок больше, чем у нижних. С увеличением степени сжатия плазмы и уменьшением диаметра сопла плазмотрона уменьшается разница между шириной реза по толщине металла и неперпендикулярностью кромок. Величина неперпендикулярности кромок при плазменной резке представляет собой половину разницы ширины реза в верхней и нижней плоскостях разрезаемого листа. Наибольшее отклонение поверхности реза от перпендикулярности регламентировано ГОСТ 14792–80 в зависимости от толщины разрезаемого металла (*табл. 138*).

Скорость воздушно-плазменной резки при прочих равных условиях оказывает существенное влияние на ширину реза и неперпендикулярность кромок. На *рис. 193* показано, что с увеличением скорости резки неперпендикулярность возрастает [265].

При увеличении скорости резки до 9,6 см/с (толщина листа 6 мм) и 6,3 см/с (толщина листа 10 мм) величина неперпендикулярности поверхности реза соответственно 2 и 1,6 мм, что находится в пределах третьего класса (*см. табл. 138*). С увеличением расстояния от среза сопла до плоскости листа неперпендикулярность также возрастает. Неперпендикулярность реза заметно ниже при кислородно-плазменной резке, в том числе с погружением листов в воду (*см. табл. 137*). Сравнение воздушно-плазменной резки листов толщиной 6–10 мм с кислородно-плазменной в варианте использования водяной защиты позволяет сделать вывод о том, что в последнем случае неперпендикулярность соответствует первому и второму классам по ГОСТ 14792–80.

Положительное влияние на качество реза оказывают добавки воды в небольших количествах к плазмообразующему газу [253].

**Таблица 138. Допускаемые отклонения, мм, перпендикулярности реза по ГОСТ 14792–80**

Класс	Способ резки	Толщина разрезаемого металла, мм			
		5–12	13–30	31–60	61–100
I	Кислородная	0,2	0,3	0,4	0,5
	Плазменно-дуговая	0,4	0,5	0,7	—
II	Кислородная	0,5	0,7	1,0	1,5
	Плазменно-дуговая	1,0	1,2	1,6	—
III	Кислородная	1,0	1,5	2,0	2,5
	Плазменно-дуговая	2,3	3,0	4,0	—

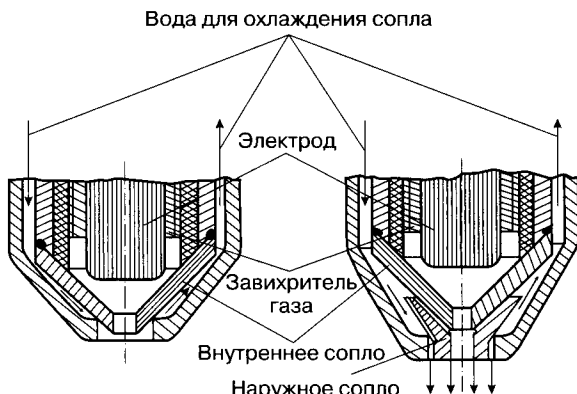


Рис. 194. Схема головки плазмотрона: а — для обычной плазменной резки; б — для плазменной резки с добавкой воды

При этом используют специальное сопло, которое сопряжено с основным соплом (рис. 194).

Вода, поступающая внутрь канала сопла, частично испаряется, диссоциируя на водород и кислород, которые, смешиваясь с основным плазмообразующим газом, создают комбинированную высокоэффективную газовую среду. При этом проникающая способность дуги заметно увеличивается, а качество реза улучшается. Данные, приведенные в табл. 139, получены при резке углеродистой стали толщиной 7 мм.

На поверхности реза обычно образуются штрихи (бороздки), что является следствием непостоянства мгновенной скорости резки при средней определенной скорости резки. При одной и той же амплитуде скорости и частоте глубина бороздок при плазменной резке значительно меньше, чем при газокислородной.

Установлено, что при плазменной резке амплитуда скорости ниже 10 мм/с не оказывает заметного влияния на образование бороздок. При амплитуде скоростей, которые приблизительно на порядок выше указанной характеристики кислородной резки, при плазменной резке появляются бороздки. Неровность (волнистость) поверхности при плазменной резке значительно больше, чем при кислородной. Шероховатость поверхности реза (высота неровностей) после машинной термической резки регламентирует ГОСТ 14792–80 (табл. 140).

**Таблица 139. Зависимость ширины реза и величины скоса кромок при плазменной резке  
от скорости резки, расхода газа и воды**

Вариант	Плазмообразующая среда	Расход газа, л/с	Расход воды, л/с	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, мм/с	Ширина реза, мм		Средняя величина скоса, мм	Наличие грата
							по верхней кромке	по нижней кромке		
I	Воздух + вода	1,3	0,005–0,0057	280	160	16,7	6,0	4,0	1,0	Легкий грат
					155	33,0	5,2	2,6	1,3	Отдельные капли
					150	50,0	5,0	2,0	1,5	Грат средней величины
	Кислород + вода	1,50	0,003–0,0033	270	150	16,7	8,0	6,2	0,9	Следы грата
					145	33,0	6,1	4,0	1,05	
					140	50,0	6,1	3,0	1,55	
II	Воздух + вода	0,83	0,005–0,0057	280	145	36,7	5,5	2,5	1,5	Легкий грат
		1,33			150		5,3	2,5	1,4	Отдельные капли
		2,0			155		5,0	2,6	1,2	
	Кислород + вода	0,92	0,003–0,0033	270	135	36,7	6,1	2,6	1,75	Следы грата
		1,50			140		6,0	3,5	1,25	
		2,20			150		5,5	3,1	1,2	
III	Воздух + вода	1,33	0,0017	280	150	36,7	5,2	2,5	1,35	Грат средней величины
			0,005		150		5,0		1,25	
			0,0083		155		5,0		1,25	
	Кислород + вода	1,50	0,0017	270	145	36,7	6,1	3,1	1,5	Следы грата
			0,0033		148		6,0	3,0	1,5	
			0,0047		150		6,0	3,2	1,4	



<b>Таблица 140. Допускаемые значения шероховатости поверхности реза, мм, по ГОСТ 14792–80</b>					
<i>Класс</i>	<i>Способ резки</i>	<i>Толщина разрезаемого металла, мм</i>			
		<i>5–12</i>	<i>13–30</i>	<i>31–60</i>	<i>61–100</i>
I	Кислородная	0,050	0,060	0,070	0,085
	Плазменно-дуговая	0,050	0,060	0,070	—
II	Кислородная	0,080	0,160	0,250	0,500
	Плазменно-дуговая	0,100	0,200	0,320	—
III	Кислородная	1,160	0,250	0,500	1,00
	Плазменно-дуговая	0,200	0,320	0,630	—

На кромках, подлежащих сварке и механической обработке, а также на поверхности фасок допускается шероховатость не ниже третьего класса. Для свободных кромок (не подлежащих сварке) деталей большинства металлоконструкций устанавливается второй класс шероховатости. Измерения шероховатости поверхности реза  $R_z$  показали, что в диапазоне исследованных режимов и разрезаемых толщин (см. табл. 140) она изменяется незначительно и составляет 20–70 мкм, а для оптимальных режимов не выходит за пределы 50 мкм, что соответствует I классу по ГОСТ 14792–80. При кислородно-плазменной резке шероховатость ниже, чем при воздушно-плазменной.

Общим для плазменной резки в различных плазмообразующих средах является образование у кромки реза зоны термического влияния (ЗТВ) с участками оплавления и структурных изменений в твердом металле. Допускаемые значения протяженности зоны термического влияния для углеродистых сталей, отвечающие ГОСТ 14792–80, приведены в табл. 141.

<b>Таблица 141. Допускаемые значения протяженности зоны термического влияния, мм, для углеродистых сталей по ГОСТ 14792–80</b>			
<i>Класс</i>	<i>Толщина разрезаемой углеродистой стали, мм</i>		
	<i>5–12</i>	<i>13–30</i>	<i>31–60</i>
I	0,2	0,4	0,8
II	0,8	1,6	3,2
III	1,6	3,2	6,4

В зоне термического влияния сталей с низким содержанием углерода изменения металла похожи на изменения, происходящие при кислородной резке с использованием горючих газов. Доля литого участка в низкоуглеродистых сталях составляет обычно 20–30% и более от общей протяженности ЗТВ. В углеродистых сталях следует участок крупного зерна, затем участки полной и неполной перекристаллизации и исходная структура металла.

Глубина зоны термического влияния и, соответственно, отдельных ее участков при резке стали выбранной марки и толщины изменяется в зависимости от условий резки. С увеличением расхода газа, а также с уменьшением силы тока зона уменьшается. Большую роль играет состав рабочей среды, стабилизирующий режущую дугу. При резке сталей воздушно- и кислородно-плазменной дугой ЗТВ обычно меньше, чем при резке с использованием неактивных газов. В табл. 142 приведены данные о величине литой зоны и зоны термического влияния в зависимости от режимов резки стали марки ВСтЗсп толщиной 9 мм и состава плазмообразующей среды (диаметр сопла 3 мм) [253].

**Таблица 142. Изменение размера литой зоны и ширины зоны термического влияния в зависимости от состава плазмообразующей среды**

Плазмообразующий газ	Режим резки					Размер литой зоны, мм	Ширина ЗТВ, мм	
	Защитный газ	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость резки, м/мин			
Воздух	—	80–90	300	130	2,5	0,030	0,54	
	Кислород					0,020	0,45	
Воздух + вода	—	80		150	1,5	0,014	Нет светлой полосы	0,50
	—			130				
Кислород	—	150	140	2,7	Нет светлой полосы	0,3–0,45		
	—	75	200				150	2,2
Кислород + вода	—	80–90	290	120	2,5	Нет светлой полосы		
	Углерод	Углерод					80	0,60–0,90

Существенное влияние на размеры ЗТВ оказывает водяная защита [259, 266]. Ширина, тип структуры, а также твердость ЗТВ при воздушно-плазменной резке зависят от скорости охлаждения. При резке листов, касающихся водной поверхности (см. рис. 188, б), а также погруженных в воду (см. рис. 188, в) скорость охлаждения при прочих равных условиях заметно возрастает. При резке конструкционной углеродистой стали ВСтЗсп с погружением в воду ширина зоны термического влияния примерно в 2 раза, а при резке с касанием поверхности воды — в 1,5 раза меньше, чем при резке на воздухе. Независимо от среды, в которой осуществляют резку металла толщиной 10–20 мм, происходит образование мартенситно-бейнитных структур твердостью 330–400 HV<sub>0,2</sub>. Нижние значения — это ширина ЗТВ при резке на воздухе, а верхние — ширина ЗТВ при резке водяной защитой.

Структуры ЗТВ стали ВСтЗсп и низколегированной стали 09Г2С при воздушно-плазменной резке на воздухе и с водяной защитой имеют незначительные отличия. При резке низколегированной стали 18Г2А повышенной прочности наблюдается значительное повышение твердости приповерхностных слоев до 850 HV<sub>0,2</sub>. Ширина ЗТВ — 0,8 мм.

Ощутима разница и в структуре ЗТВ при резке среднеуглеродистой стали 45. При резке этой стали на воздухе ширина полосы высокоуглеродистого мартенсита равна 0,03–0,04 мм, выявлен также участок крупноигльчатого мартенсита и область шириной 0,22–0,24 мм мелкоигльчатого мартенсита. При резке с водяной защитой ширина полосы высокоуглеродистого мартенсита значительно меньше и равна 0,006–0,01 мм, крупноигльчатый мартенсит отсутствует, а область мелкоигльчатого мартенсита равна 0,26–0,28 мм. Твердость при этом достигает 1000 HV<sub>0,2</sub>, а наличие закалочных структур может привести к образованию холодных трещин.

При воздушно-плазменной резке низкоуглеродистых и низколегированных сталей в твердых наазотированных и науглероженных зонах могут также возникать микротрещины. Под воздействием плазменной дуги может происходить выгорание включений серы либо их подплавление, что является причиной образования трещин по границам частиц. В процессе дальнейшей сварки листов с мелкими горячими трещинами под воздействием термомодеформационного цикла возможно увеличение количества трещин и образование ламинарных трещин. Все эти обстоятельства должны быть учтены при разработке технологии резки конкретной марки стали.

Выплавление металла мощным электродуговым разрядом при плазменной резке вызывает насыщение кромок реза газами из атмосферы плазмы. При воздушно-плазменной резке насыщение кромок происходит в основном азотом и кислородом. Наибольшую опасность для сварных соединений, выполненных по кромкам после воздушно-плазменного реза, представляет азот. При воздушно-плазменной резке в кромки детали азот может попадать из плазмообразующей среды (в случае применения азота, воздуха или газовых смесей, содержащих азот) либо из окружающей среды за счет инжекции в столб дуги атмосферного воздуха.

В зоне дугового разряда происходит диссоциация и ионизация азота. Атомарный азот в момент своего выделения может растворяться в жидком металле. Установлено, что введение кислорода или кислородосодержащих газов при постоянной концентрации азота в атмосфере дуги приводит к увеличению содержания азота в наплавленном металле [267]. Экспериментально установлено, что максимальное содержание азота в кромке после воздушно-плазменного реза в 50 раз больше, чем в исходном металле, и почти в 10 раз превышает растворимость азота в стали Ст3 [268].

Максимально насыщается газами литой участок зоны термического влияния. Поэтому снижения количества азота в кромках после воздушно-плазменного реза достигают уменьшением глубины литого участка за счет снижения скорости резки, повышением напряжения дуги, изменением направления резки и др. [268].

Использование кислорода в качестве плазмообразующего газа позволяет уменьшить насыщение кромок азотом. Это происходит за счет уменьшения литого слоя на поверхности реза и образования шлаковой пленки на поверхности жидкого металла, которая уменьшает скорость поглощения азота [253].

Однако получить минимальное содержание азота (не превышающее предельной растворимости в сталях 09Г2 и ВСт3сп) при кислородно-плазменной резке удастся только при условии использования дополнительной концентричной кислородной завесы для окружения дуги [269].

Применяя водяную защиту, можно также существенно ограничить насыщение кромок азотом. Автор выполнил плазменно-дуговую резку стали ВСт3сп толщиной 10 мм ( $I_p = 200$  А,  $U_d = 180$  В,  $V_p = 4$  см/с) тремя способами: обычная воздушно-плазменная, воздушно-плазменная и кислородно-плазменная с погружением листов в воду.

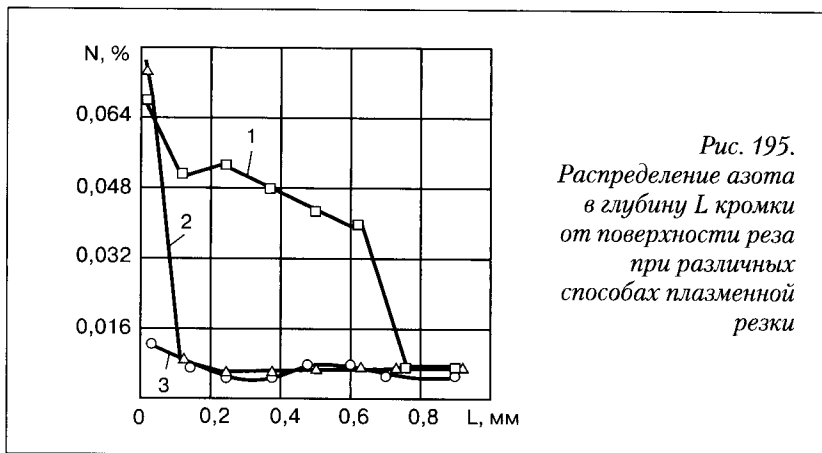


Рис. 195.  
*Распределение азота  
 в глубину L кромки  
 от поверхности реза  
 при различных  
 способах плазменной  
 резки*

Содержание азота и распределение его по поверхности реза и в глубину металла от нее определяли методом локального масс-спектрального анализа. Результаты исследования распределения азота показаны на рис. 195. При различных способах воздушно-плазменной резки содержание азота на поверхности реза примерно одинаково. В то же время на расстоянии 0,1 мм от поверхности реза содержание азота при воздушно-плазменной резке с водяной защитой (кривая 2) снижается практически до уровня, имеющегося в основном металле (0,0064%). Аналогичное снижение содержания азота при обычной воздушно-плазменной резке (кривая 1) наблюдают только на расстоянии 0,8 мм. Такой характер распределения азота можно объяснить уменьшением литого участка и ограничением возможности диффузии азота в глубь металла. При этом водород, получаемый путем разложения воды в столбе дуги, положительно влияет на десорбцию азота. Можно предположить, что благодаря высокой подвижности и проникающей способности водорода в процессе воздействия на металл плазменной дуги дефектные участки металла (дислокации, микронеровности, трещины и др.) на поверхности реза заполняются атомами водорода, что препятствует проникновению менее подвижных атомов азота.

В процессе кислородно-плазменной резки с водяной защитой практически исключается всасывание окружающего воздуха в зону дуги, и поэтому содержание азота на поверхности реза близко к его содержанию в основном металле (кривая 3). Минимальное содержание кислорода на поверхности реза обеспечивается при исполь-

зовании азота в качестве плазмообразующего газа, а максимальное — при использовании кислородной плазмы [253].

**Точность вырезки деталей.** Точность и качество механизированной кислородной и плазменной резки регламентированы ГОСТ 14792–80. Классы точности и предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от номинальных значений должны соответствовать данным *табл. 143*. Предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от прямолинейности усугубляются в половинном размере от норм, указанных в *табл. 143*.

Классы вырезаемой детали или заготовки должны быть указаны в технологической документации и в нормативной документации на машины для кислородной и плазменной резки металлов и обозначены четырехзначным числом. Это число указывает класс точности вырезаемой детали или заготовки и классы в зависимости от отклонения поверхности реза от норм перпендикулярности, шероховатости и протяженности ЗТВ. Если какой-либо показатель не определяют, то его обозначают нулем. Перед четырехзначным числом должно быть указано обозначение способа резки: К — кислородная, П — плазменно-дуговая.

Основными факторами, определяющими форму и размеры деталей при термической резке, являются следующие: состояние исходного (разрезаемого) металла (чистота поверхности, химический

**Таблица 143. Допускаемые отклонения размеров деталей от номинальных, мм, по ГОСТ 14792-80**

Класс точности	Способ резки	Толщина листа, мм	Допускаемые отклонения деталей или заготовок, мм			
			До 500	Свыше 500 до 1500	Свыше 1500 до 2500	Свыше 2500 до 5000
1	Плазменная и кислородная	5–30, 31–60	± 1	±1,5	±2,0	±2,5
	Кислородная	61–100	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0
2	Плазменная и кислородная	5–30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
		31–60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
	Кислородная	61–100	±3,0	±3,5	±4,0	±4,5
3	Плазменная и кислородная	5–30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
		31–60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0
	Кислородная	61–100	±4,5	±4,5	±5,0	±5,5

состав, наличие расслоений, качество правки, размеры исходного листа); качество разметки, изготовления копир-чертежей и подготовки числовых программ; конструктивные особенности и состояние машины для термической резки (прямолинейность направляющих путей, погрешность изготовления зубчатых колес, опорных катков, люфты в передачах, статические и динамические ошибки в системе управления); конструкция раскроечного стола для термической резки, форма и размеры детали (толщина, габаритные размеры, отношение длины к ширине, наличие или отсутствие вырезов); технология вырезки деталей, определяющая термические деформации (способ и режим резки, использование водяной защиты, последовательность резки, наличие перемычек) [252, 253].

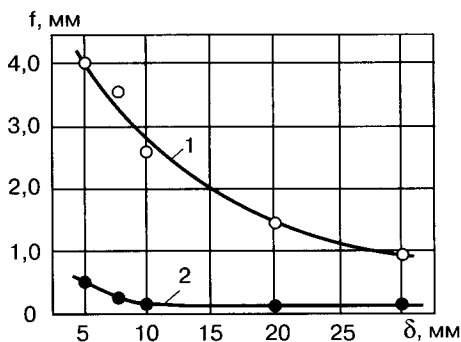
Как показывает практика, требования первого и второго классов точности обеспечиваются при использовании портальных машин с числовым программным управлением при условии принятия мер для поддержания точности их работы на уровне, указанном в паспорте машины. Точность второго и третьего классов обеспечивается машинами с фотоэлектронным управлением при условии обеспечения требуемой точности изготовления копир-чертежей не менее  $\pm 1,0$  мм. Третий класс точности возможен для деталей, вырезаемых переносными машинами и ручными резаками.

Технологические факторы при резке влияют на величину остаточных деформаций. При термической резке возникают следующие виды остаточных деформаций: продольная деформация удлинения или укорочения; изгиб в плоскости вырезаемой детали [252]. Наибольшее влияние на точность вырезки деталей оказывает изгиб детали в плоскости и ее продольное укорочение. Изгиб детали особенно сильно проявляется при вырезке деталей большой длины, так как стрелка прогиба пропорциональна квадрату длины детали.

На *рис. 196* показаны кривые деформации полос из стали ВСтЗсп шириной 150 мм и длиной 1000 мм различной толщины, вырезанных воздушно-плазменной резкой в обычных условиях и при частичном погружении листа в воду. В последнем случае деформации значительно меньше.

Снижение деформаций при резке с водяной защитой подтверждается также следующим опытом. Пластины из стали ВСтЗсп размером 14×100×500 мм вырезали плазменной дугой вдоль по центру длиной 250 мм ( $I_p=280$  А,  $U_d=180$  В,  $V_p=3,6$  см/с). После этого измеряли расхождение кромок в начале реза. При обычной воздушно-плазменной резке кромки расходились на 8,0–8,2 мм, а при рез-

Рис. 196.  
Деформация  $f$  полос  
при воздушно-  
плазменной резке  
металла различной  
толщины  $\delta$  в обычных  
условиях (1)  
и с погружением  
в воду (2)



ке с частичным погружением пластины в воду — на 4,0–4,5 мм. При всех способах плазменной резки увеличение скорости благоприятно влияет на снижение деформаций.

Для снижения деформаций при термической резке следует придерживаться следующих рекомендаций: резку каждой детали начинать с кромки, имеющей наибольшую длину реза и расположенной у края листа, а заканчивать по короткой кромке или кромке с припуском; первыми вырезать, начиная от края листа, детали максимальных габаритов и требующие наиболее точного изготовления, а затем последующие ряды деталей в направлении противоположной кромки с сохранением принципа наибольшей жесткости для вырезаемой детали и исходного листа; при формировании карт раскроя (программы раскроя) стремиться размещать узкие и длинные детали вдоль продольной кромки листа, а короткие — в середине листа и у противоположной кромки, обеспечивая по возможности совмещение резов; отверстия в деталях выполнять до резки основного контура детали; при вырезке круглых деталей (фланцы, диски, наварыши) закреплять вырезаемые детали электромагнитными прижимами или заклинивать рез по мере выполнения резки для того, чтобы устранить смещение начала и конца ступеньки.

С целью уменьшения деформаций при резке деталей со сложным контуром, узких деталей большой протяженности, а также деталей, требующих высокой точности резки, желательно оставлять в листе непрорезанные участки (перемычки) с целью создания жесткого контура. Такие перемычки обычно оставляют при вырезке деталей из листов толщиной до 12–14 мм, с отношением длины к ширине 10:1 и более.



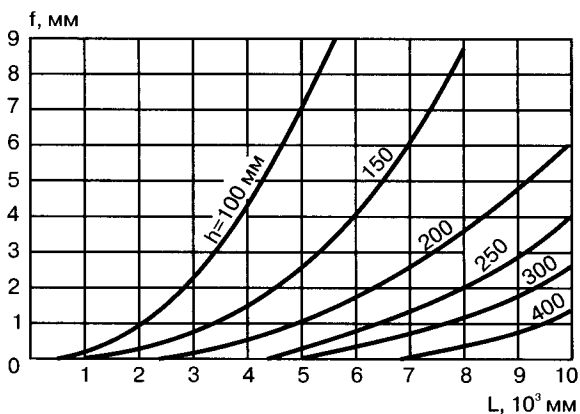


Рис. 197. График для определения стрелки прогиба  $f$  при воздушно-плазменной резке с перемычками из углеродистой стали шириной  $h$  и длиной  $L$

Длина перемычки примерно равна толщине разрезаемого листа, но не более 10 мм. При вырезке прямоугольных деталей расстояние между перемычками может быть принято равным 6–8 ширины вырезаемой детали, но не более 2500 мм. На каждой детали оставляют не менее двух перемычек.

При вырезке деталей с перемычками, которые выполняют роль закрепления, частично предупреждающего прогиб детали, остаточная стрелка прогиба вырезанной детали может быть определена по кривым на рис. 197 [252]. Влияние толщины детали на ее прогиб в плоскости листа невелико, поэтому данные рис. 197 касаются деталей всех толщин.

Если деталь имеет сложную форму, то количество перемычек определяют приблизительно по эквивалентному прямоугольнику, построенному на базе данной детали.

Перемычки разрезают после вырезки всех деталей. Перемычки обычно удаляют вручную после снятия деталей с раскроечного стола машины.

**Санитарно-гигиенические характеристики процесса.** Плазменная резка металлов имеет ряд недостатков: выделение аэрозоля, высокочастотный шум в комбинации с ультразвуком, электромагнитное излучение оптического диапазона (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного) и ионизация воздуха [252, 259, 270–274].

**Таблица 144. Содержание вредных веществ в воздухе при воздушно-плазменной резке**

Способ резки	Режим резки		Концентрация, мг/м <sup>3</sup>		
	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	аэрозоля	оксида азота	озона
Обычная воздушно-плазменная резка	300	180	3,0–5,5	1,8–3,4	0,15–0,25
Воздушно-плазменная резка с водяной защитой	300	180	1,2–2,5	0,5–1,5	0,05–0,07

*Примечание. Предельно допустимая концентрация аэрозоля, оксида азота и озона соответственно 4; 2 и 0,1 мг/м<sup>3</sup>.*

Особую опасность представляет аэрозоль, твердая составляющая которого состоит из соединений обрабатываемых металлов, а газовая — в основном из оксидов азота и озона (в зависимости от вида плазмообразующего газа). Для удаления выделяющегося при резке аэрозоля плазменные установки оборудуют мощными вентиляционными системами, которые, как правило, имеют большие габариты, высокую стоимость и не всегда удобны и эффективны в работе.

Применение водяной защиты позволяет радикально улучшить санитарно-гигиенические характеристики плазменной резки [253, 259, 272, 274]. Содержание вредных веществ в воздухе в зоне дыхания резчика при воздушно-плазменной резке с водяной защитой в несколько раз ниже, чем при обычной, и находится в пределах допустимых норм (табл. 144).

При резке с водяной защитой нет необходимости в использовании дополнительных вентиляционных систем.

Основным источником шума и ультразвука при плазменной резке является плазмотрон. Установлено, что суммарные уровни шума и ультразвука на расстоянии 0,25 м от плазмотрона составляют 105–115 дБ·А, на расстоянии 1 м уменьшаются на 8–10, на расстоянии 2 м — на 13 и на расстоянии 3 м — на 15–16 дБ·А. Уровень шума зависит от конструкции плазмотрона, давления плазмообразующего газа и других факторов, но практически всегда выходит за пределы допустимых норм (80 дБ).

Спектрограммы уровней звуковой мощности показывают, что шум имеет широкополосный характер с концентрацией основной энергии в области высокочастотных звуковых и низкочастотных ультразвуковых колебаний (4000–40 000 Гц), т. е. включает весь слышимый диапазон частот и переходит в ультразвуковую область.

Измерения показали, что суммарный уровень шума при обычной воздушно-плазменной резке превышает норму на 25–30 дБ·А, при резке листов, лежащих на поверхности воды, — на 19–20 дБ·А, а при дополнительном использовании водяной завесы — на 10–12 дБ·А [259]. Только при резке с погружением плазмотрона и разрезаемого листа в воду на глубину 30–50 мм суммарный уровень шума находится в пределах допустимых норм — 80–82 дБ·А [273].

В спектре электромагнитных излучений плазменной дуги преобладают ультрафиолетовые (0,2–0,4 мкм) и инфракрасные (0,76–3,50 мкм) диапазоны. Наибольшую интенсивность ультрафиолетового излучения 7,5 Вт/м<sup>2</sup> отмечают при 0,22–0,29 мкм, что превышает допустимый уровень оптического облучения рабочего места в этом диапазоне частот на несколько порядков. Интенсивность инфракрасного излучения плазмы на расстоянии 0,5 м от среза сопла плазмотрона не превышает 1,4 кВт/м<sup>2</sup>, однако тепловое излучение от нагретого металла равно 3,5 кВт/м<sup>2</sup>.

Ионизирующий эффект плазмы и ультрафиолетового излучения определяет высокие концентрации аэроионов:  $1,1 \cdot 10^8$  эл. заряд./см<sup>3</sup> тяжелых положительно заряженных ионов и  $6,0 \cdot 10^8$  — отрицательных.

Использование водяной защиты, особенно технологии резки с погружением листов и плазмотрона в воду, позволяет практически полностью устранить вредное влияние электромагнитных излучений, ионизирующего эффекта и ультрафиолетового излучения плазмы на обслуживающий персонал. Когда использование по какой-то причине водяной защиты невозможно, должны быть выполнены требования к организации и оснащению рабочих мест для плазменной резки [274].

**Установки и рабочие места для плазменной резки.** Установка для плазменной резки состоит из источника питания с аппаратурой управления процессом резки и плазмотрона, основными элементами которого являются электрод (катод) и сопло.

С точки зрения стабильности горения дуги и стабильности технологического процесса оптимальными внешними характеристиками источников питания плазмотронов являются крутопадающие или вертикальные [254]. Чем более пологой будет внешняя статическая характеристика, тем рез получается более узким книзу. Это объясняется тем, что углубление плазменной дуги в металл сопровождается увеличением напряжения и уменьшением силы тока, вследствие чего в нижних участках реза выделяется меньше теплоты.

Требуемые внешние статические характеристики могут быть обеспечены различными типами источников питания: выпрямителями, управляемыми дросселями насыщения, тиристорными выпрямителями с обратной связью по току, источниками питания на базе индуктивно-емкостных преобразователей, транзисторными источниками питания и др. [254].

Схемы управления установок автоматически осуществляют поджиг дуги, плавное нарастание силы рабочего тока, снятие напряжения с плазмотрона при нарушениях в его системе охлаждения, выключение установки при выходе из строя вентиляции.

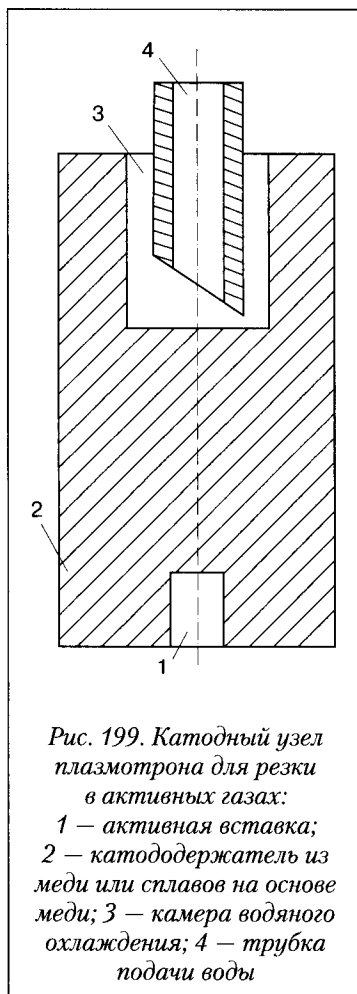
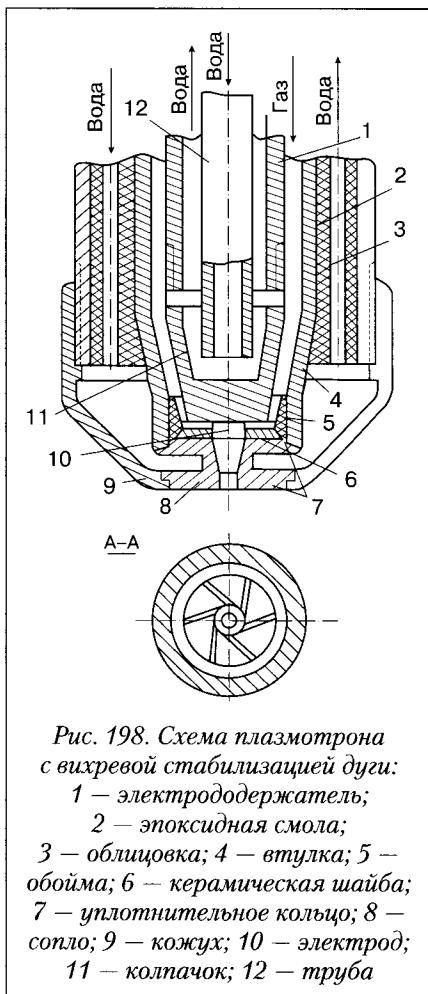
Плазмотрон должен обеспечивать многократное надежное зажигание и стабильное горение плазменной дуги в диапазоне рабочих токов и напряжений. Элементы плазмотрона, наиболее подверженные действию теплоты (электрод, сопло), должны выдерживать длительную тепловую нагрузку при максимальной мощности плазмотрона. Электрическая изоляция между электродами и соплом должна быть рассчитана на максимальное напряжение, возникающее в дуговом промежутке при поджиге дуги и ее обрыве. Водяные и газовые коммуникации плазмотрона (шланги, уплотнения, прокладки и пр.) должны выдерживать давление не ниже 1 МПа. Для обеспечения маневренности плазмотрона присоединяемые к нему шланги и электрические провода должны быть гибкими и прочными. Плазмотрон должен быть прост в изготовлении, ремонте и удобным в эксплуатации.

Для плазменной резки в кислородосодержащих средах используют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги [253, 254]. Схема такого плазмотрона показана на *рис. 198* [252].

Катодный узел (*рис. 199*) представляет собой катододержатель из меди или сплавов на основе меди с запрессованной заподлицо активной вставкой.

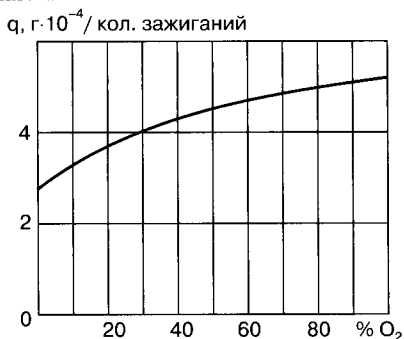
В качестве активных вставок используют стержни диаметром 2 мм из циркония или гафния. Считается, что при относительно малой силе тока и низких плотностях тока применение катодов из циркония предпочтительнее в связи с более низкой стоимостью циркония [248]. Катоды из гафния имеют более высокую стойкость при повышенной силе тока и более высокой плотности тока. На предельной для циркония силе тока (300–320 А) ресурс работы гафния при прочих равных условиях почти в два раза выше.

Следует, однако, подчеркнуть, что стойкость электродов при резке в производственных условиях колеблется в широких пределах — от



15 мин до 4 ч. Это связано с интенсивностью охлаждения. При плохой работе системы охлаждения электроды работают очень недолго. Но и при нормальном охлаждении некоторые электроды быстро выходят из строя. Этому в значительной степени способствует плохое натяжение при запрессовке электрода. Устраняют указанный недостаток различными путями: соответствующей точностью механической обработки электрода и отверстия в колпачке, обработкой колпачка после запрессовки в него электрода (совместное сжатие) и др.

*Рис. 200. Влияние содержания кислорода в азотосодержащих смесях на расход  $q$  термохимических катодов*



В последние годы разработан способ ударной сварки в вакууме, совмещающий сварку и формовку электродов с термохимическими катодами из циркония и гафния [275]. При этом ресурс катодов стабилен и в 1,5–2,0 раза выше у всех испытанных образцов по сравнению с ресурсом запрессованных электродов из циркония и гафния.

На срок службы электрода влияет также количество поджигов дуги. Принято считать, что по величине износа каждый поджиг дуги соответствует одной минуте ее горения.

По данным К. В. Васильева, увеличение содержания кислорода в плазме также сопровождается некоторой интенсивностью расхода катодов (рис. 200).

В западных странах для резки в кислородосодержащих средах используют катоды повышенной стойкости системы LongLife [276]. В таких катодах гафниевый стержень закреплен во втулке из серебросодержащего материала с высокой тепло- и электропроводностью и малым переходным сопротивлением. По сравнению с традиционными такие катоды имеют в 2–3 раза более высокую стойкость.

Сопло наряду с катодом является основным элементом плазмотрона. К главным характеристикам сопла относят диаметр отверстия, его высоту, геометрию теплопроводящей поверхности. Теплофизический анализ работы различных материалов показал, что наилучшим материалом для сопла является медь. Иногда используют сопла с внутренним покрытием из вольфрама или других металлов. Диаметр отверстия сопла для данной силы тока должен иметь такое минимальное значение, при котором обеспечивается надежная работа плазмотрона.

Оптимальные характеристики работы плазмотрона получают при длине канала формирующего сопла, равной его диаметру. При

дальнейшем увеличении длины канала увеличивается вероятность двойного дугообразования.

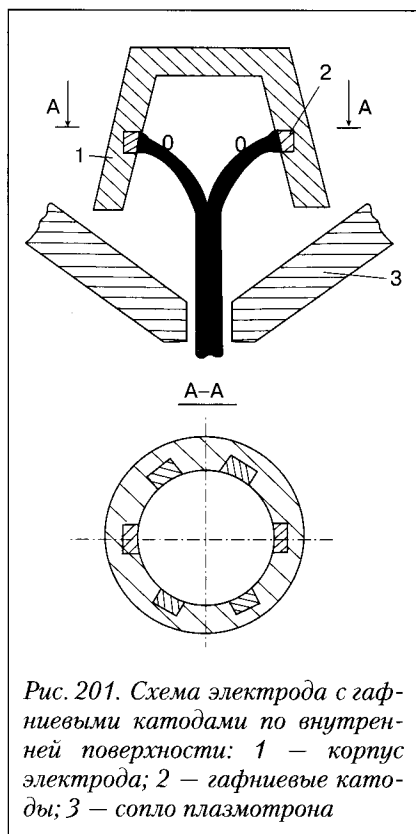
Использование сопла в качестве промежуточного электрода для поджига дежурной дуги вызывает необходимость его изоляции от основного электрода (катода) плазматрона. В качестве изоляционных материалов применяют фторопласт Ф-4, капролон, эбонит, эпоксидную смолу ЭД-5 холодного отверждения с кремнийорганическим наполнителем, стеклонанполненные пресс-материалы, высокоглиноземистые керамические материалы и др.

В последние годы получают распространение плазматроны, специально предназначенные для резки толстолистового металла. В плазматронах с расщеплением дуги используют электроды с несколькими термохимическими вставками (рис. 201). На термохимических вставках фиксируются опорные пятна дуги, и при большой суммарной силе тока вставка работает при относительно небольшой силе тока. Это обеспечивает увеличение стойкости электрода.

Плазматрон РПТ-1, имеющий электрод с шестью гафниевыми вставками, работает на максимальной силе рабочего тока 1000 А и позволяет резать сталь толщиной до 150 мм, а медь — до 80 мм [253].

Плазматрон П-23 с четырьмя термохимическими вставками работает на номинальной силе тока 500 А и позволяет резать металл толщиной 100 мм со скоростью 0,5 м/мин [280].

Отличительной особенностью плазматрона с медным полым электродом является вращение дуги (рис. 202). Интенсивное перемещение опорного пятна дуги по сильно охлаждаемой внутренней поверхности



электрода происходит под действием газового вихря, создаваемого отверстиями в завихрителе.

Плазматрон ПВ-47 с медным полым катодом работает при силе тока 200–600 А, напряжении дуги 200–350 В и позволяет резать металлы и сплавы толщиной до 160 мм [253].

В плазматроне ПР-24 также используют медный полый электрод, разрядный канал которого выполнен ступенчатым с расширением в сторону выхода дуги [280]. В плазматроне есть резьбовая нарезка и торцевое отверстие для подачи дополнительного газа, расход которого составляет 10% от расхода основного плазмообразующего газа. Подача дополнительного газа необходима для локализации катодной привязки дуги в области расширения канала. Посредством резьбовой нарезки расщепляют катодные пятна, предотвращая тем самым локальный нагрев и увеличивая ресурс работы электрода на силе тока до 600–1000 А. Медный полый электрод позволяет плазматрону надежно работать как на нейтральных, так и на кислородосодержащих газах и резать металл толщиной до 200 мм.

Плазматрон ПР-1 позволяет резать металлы толщиной до 400 мм. Мощность дуги в плазматроне ПР-1 повышается до 300 кВт за счет увеличения не только силы тока, но и напряжения, которое обеспечивает электроизолированная межэлектродная вставка [280]. Конструкция катодного узла предусматривает расщепление прикатодного участка дуги с помощью теплоэмиссионных вольфрамовых вставок, расположенных в цилиндрической

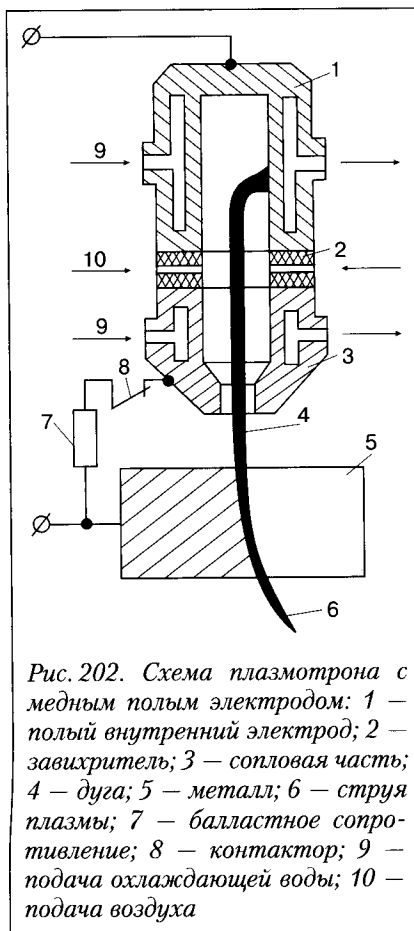


Рис. 202. Схема плазматрона с медным полым электродом: 1 — полый внутренний электрод; 2 — завихритель; 3 — сопловая часть; 4 — дуга; 5 — металл; 6 — струя плазмы; 7 — балластное сопротивление; 8 — контактор; 9 — подача охлаждающей воды; 10 — подача воздуха



полости медного катододержателя. Вставки от окисления плазмообразующим воздухом защищает поддуваемый в катодную зону аргон (2–3% от расхода рабочего газа).

В настоящее время на рынках Украины и России предлагают довольно обширную номенклатуру отечественного оборудования для плазменной резки [247, 286]. Характеристики оборудования предыдущих поколений освещены в литературе [252–254].

Среди зарубежных поставщиков оборудования для плазменной резки следует выделить ESAB, Hypertherm, Kjellberg и др. Высокое качество реза, отвечающее европейским и мировым стандартам, было достигнуто благодаря новым конструкциям плазмотронов и источников питания, применяемым газовым средам (смеси газов), где наряду с воздухом в различных вариантах используют кислород, водород, азот и аргон. В диапазоне толщин до 12 мм точность и перпендикулярность реза идентична этим же показателям при лазерной резке. Разрезаемые кромки не требуют последующей механической обработки.

Фирма Kjellberg резку на своем оборудовании разделяет на три области:

- «Hi Focus–Quality» — область выполнения резки высочайшего качества, соперничающего по качеству с лазерной резкой. Разрезаемые материалы — стали и алюминий толщиной от 0,5 до 8 мм, сила рабочего тока от 20 до 50 А, давление плазмообразующего газа до 0,5 МПа;
- «Hi Focus–Speed» — область скоростной механизированной резки. Толщина разрезаемых листов от 4 до 10 мм, сила рабочего тока от 50 до 100 А, давление плазмообразующего газа до 0,8 МПа;
- «Fine–Focus» — область качественной разделительной резки. Толщина разрезаемого материала от 6 до 30 мм, сила рабочего тока от 40 до 130 А, давление плазмообразующего газа 0,6 МПа.

Сравнительные характеристики свидетельствуют об увеличении стойкости катодов с гафниевой вставкой. Количество включений в области «Hi Focus–Quality» составляет 2000, а в области «Fine–Focus» — 1000, причем обеспечивается высокая повторяемость результатов.

На базе установок для плазменной резки организуют рабочие места плазменной резки [274].

Рабочие места для ручной плазменной резки комплектуют установками с напряжением холостого хода дуги не более 180 В, силой рабочего тока до 250 А и мощностью дуги до 30 кВт.

Электробезопасность оборудования для плазменной резки должна отвечать требованиям ГОСТ 12.2.007–75 и ГОСТ 12.2.007.3–75. При эксплуатации электроустановок необходимо соблюдать требования Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителем и Правил устройства электроустановок.

Требования к технологическим процессам и оборудованию для плазменной резки металлов регламентированы ГОСТ 12.3.002–75, ГОСТ 12.3.00–80 и ГОСТ 12.3.004–75.

Рабочие места плазменной резки размещают в специальных помещениях или на капитально изолированных площадях, расположенных у наружных стен здания. Стены, потолки и внутренние конструкции помещений необходимо покрывать звукопоглощающей облицовкой с защитной отделкой, окрашенной в белый или желтый цвет для поглощения ультрафиолетового излучения. Постоянное рабочее место должно быть защищено от излучения плазменной дуги (СН № 4557–88, ОСТ 21–6–87) и от шума (ГОСТ 23499–79).

Производственные помещения оборудуют системами вентиляции и отопления в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88, СНиП 2.04.05–91 и СН № 1009–73. Для вентиляции стационарных рабочих мест резчиков применяют подъемно-поворотные и консольно-поворотные устройства для местного отсоса с системами очистки, а на нестационарных местах — автономные передвижные фильтровентиляционные агрегаты. Освещение рабочих мест для плазменной резки должно соответствовать СНиПП–4–79.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) при плазменной резке необходимо применять в соответствии с ГОСТ 12.4.011–75. Если водяную защиту не используют, а системы местной или общеобменной вентиляции не могут обеспечить очистку воздуха от вредных веществ в рабочей зоне (при резке на нестационарных местах, в замкнутых и полужамкнутых пространствах и т. п.), предусматривают принудительную подачу чистого воздуха в зону дыхания (под защитную маску) рабочего с объемной скоростью 6–8 м<sup>3</sup>/ч, нагретого в холодный период года до температуры не ниже 18°С в соответствии с СН № 4088. Средства индивидуальной защиты органов дыхания выбирают в соответствии с требованиями ГОСТ 12.4.034–85.

Для защиты от действия высокочастотного шума применяют средства индивидуальной защиты органов слуха (ГОСТ 12.4.051–78), в частности, антифоны ВЦНИИОТ–2М или противошумные каски ВЦНИИОТ–2.

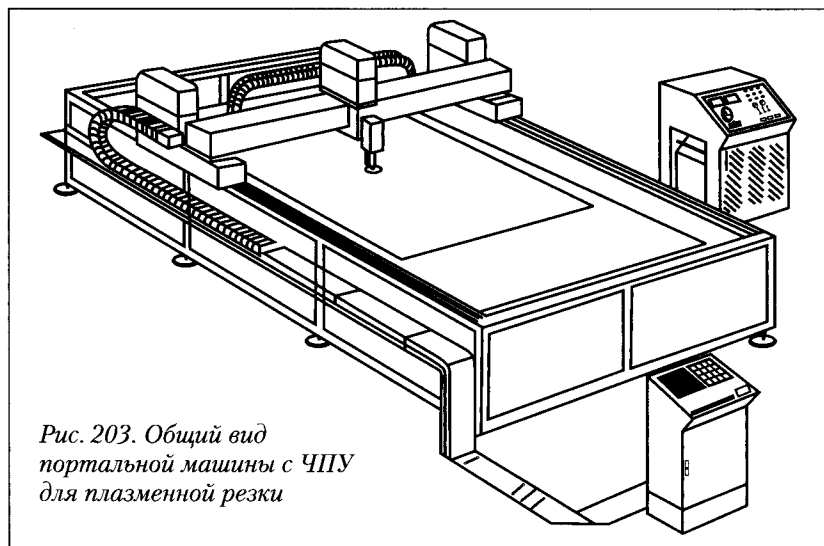
Для защиты лица и глаз от излучения плазмы используют щиток или маску по (ГОСТ 12.4.035–78) с защитными светофильтрами типа С (ОСТ–21–6–87).

Рабочие, выполняющие плазменную резку, должны пользоваться костюмами для сварщиков (ТУ 17 Украины 14–15–94 и ТУ 17 Украины 14–16–94), рукавицами (ГОСТ 12.4.010–75) и спецобувью (ГОСТ 12.4.017–76).

**Стационарные машины для термической резки.** Машины для термической резки согласно ГОСТ 5614-74 подразделяют на стационарные и переносные; по конструкции – на порталные П, портално-консольные  $П_k$ , шарнирные Ш; по способу резки – на кислородные К, кислородно-флюсовые  $К_f$ , плазменные  $П_p$ , газолазерные  $Г_l$ ; по системе контурного управления или способу движения – линейные Л, магнитные для фигурной резки М, фотокопировальные для фигурной резки Ф; по способу движения переносных установок: по разметке – Р, по циркулю – Ц, по направляющим – Н, по гибкому копиру – Г.

Наиболее высокую точность обеспечивают порталные машины с программным управлением (рис. 203).

Современные машины для термической резки металлов должны обеспечивать высокую производительность и качество вырезанных деталей при минимальных простоях.



*Рис. 203. Общий вид порталной машины с ЧПУ для плазменной резки*

Для удовлетворения вышеуказанных требований необходимо высококачественное изготовление механических узлов машины; точность изготовления основных деталей должна быть на порядок выше, чем допуск, гарантируемый при прочерчивании контура вырезаемой детали. Особые требования предъявляют к координатной системе электропривода. Электродвигатель должен иметь достаточный запас мощности, координатный редуктор — не иметь люфтов во время всего срока эксплуатации. Сервоусилитель должен иметь достаточный диапазон регулирования. Вся система должна обеспечивать плавность хода во всем диапазоне скоростей. На современных машинах скорость перегона между контурами для резки (маршевая) составляет 12–40 м/мин, контурная скорость (рабочая) плазменной резки — до 12 м/мин.

Резаки должны быть снабжены устройствами защиты от столкновения и системами электродугового либо емкостного сканирования, обеспечивающими поиск листа и поддержание рабочего зазора.

Новые системы программного управления способны контролировать весь процесс резки, оптимизировать его, автоматически вводя нужные параметры, такие как скорость резки, расход газов, расстояние от резака до поверхности листа при пробивке и во время резки, торможение на острых углах, автоматическое изменение силы тока дуги и расхода газов.

Системы управления современных машин для резки оснащены пакетами прикладных программ, которые позволяют разрабатывать специальные программы раскроя листов и иметь связь с программным комплексом, расположенным вне машины.

*Современная аппаратура и машины для плазменной резки* — это дорогое оборудование, которое должно быть максимально загруженным и работать без простоев.

Срок службы электродов плазмотронов зависит от количества пробивок, длины реза и толщины разрезаемого металла. В современных плазмотронах при цикле резки до 30 с количество пробивок достигает более 1000.

Машины часто используют также для маркировки или разметки листов металла. Сегодня в мире существует несколько способов разметки и маркировки: порошковая, плазменная и струйная.

С помощью струйной маркировки стало возможно наносить линии различного типа или буквенно-цифровую маркировку, что облегчает определение потоков заготовок и логистику. Скорость струйной маркировки достигает 20 м/мин (как при нанесении ли-

ний, так и при начертании знаков). Маркировки отличаются четкостью линий и букв и позволяют быстро находить необходимые заготовки и детали.

Современные машины для термической резки металлов с оборудованием для разметки либо маркировки расширяют технологические возможности всего цикла раскроя, а также улучшают последующие технологические операции.

Основными изготовителями машин для термической резки в Украине являются АО «Техмаш» и ОАО «Зонт» (г. Одесса). Характеристики некоторых машин для плазменной резки, выпускаемых этими и другими изготовителями, приведены в [247, 286].

Как на отечественных, так и на зарубежных машинах может быть выполнена плазменная резка с водяной защитой, в том числе с использованием так называемых «водяных столов» (раскроечная рама, погруженная в воду).

Применяют также столы, снабженные системой удаления шлака и поддержания уровня воды. Сущность последней состоит в том, что имеется емкость, из которой вода может выдавливаться сжатым воздухом. Уровень воды опускается после окончания резки, чтобы выполнить операции маркировки деталей. Шлак удаляют во встроенный бункер, наклоняя верхнюю часть стола при помощи гидравлической системы.

Можно также применять систему удаления вредностей с нижним расположением отсоса (под раскроечной рамой) на двухкоординатной тележке, управляемой системой ЧПУ машины.

Имея перед собой большой выбор машин для термической резки, потребитель должен учитывать не только технические, но и ценовые характеристики. При таком всестороннем анализе зачастую он отдает предпочтение отечественному производителю.

**Комплексы для термической резки.** При выборе технологического процесса термической резки, основного и вспомогательного оборудования, схемы организации производства определяющими в основном являются производственная программа (объем перерабатываемого металла, размеры и конфигурация вырезаемых заготовок) и имеющиеся производственные площади.

Существуют реальные схемы организации рабочих мест для плазменной резки; их делят на две основные группы. К первой относят механизированные рабочие места в виде отдельно работающей порталной машины с раскроечным столом, а ко второй — поточные линии. Объединенные со средствами подачи листов для резки, рас-

кроечными рамами и средствами перегрузки деталей, поточная линия или рабочее место образуют комплекс для выполнения резки.

При плазменной резке листового металлопроката на механизированном рабочем месте обычно выполняют собственно резку по предварительно выполненной разметке или без разметки по копирам или машиной с ЧПУ; маркировку деталей вручную либо с помощью технических средств, имеющихся в составе портальной машины с ЧПУ; резку и удаление отходов; удаление с рабочего места вырезанных деталей.

При плазменной резке с водяной защитой в состав рабочего места входит раскроечный стол-ванна, на который укладываются разрезаемый лист.

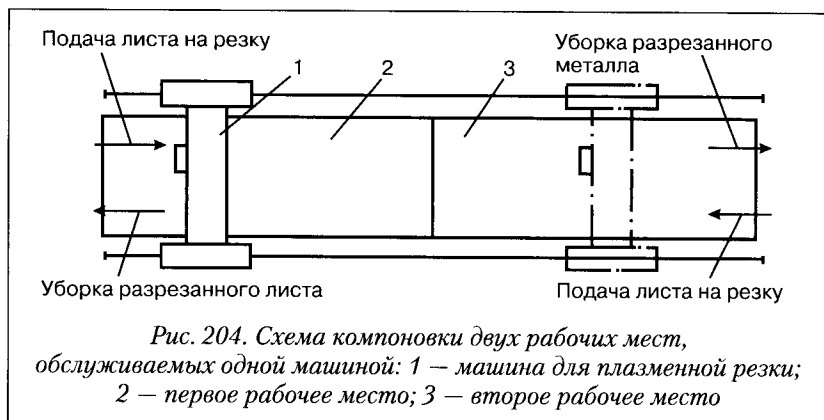
При обычной плазменной резке расплавленный металл, выбрасываемый из зоны реза, накапливается в раскроечной раме, образуя спеченную массу больших размеров. Она прочно сцепляется с элементами конструкции, и ее трудно удалить. Кроме того, высокая температура этих отходов вызывает неконтролируемые термические деформации раскроечных рам, осложняющие их эксплуатацию, и приводит к повышенному износу.

При резке листов, касающихся поверхности воды или погруженных в воду, жидкий металл, выбрасываемый плазменной дугой, гранулируется в воде, образуя гранулы шарообразной формы, преимущественно размером 1–10 мм. Находясь в воде 1–2 месяца, шарики распадаются на мелкие частицы.

Как показывает практика, очистку раскроечного стола-ванны от грата нужно производить один раз в месяц. Процесс очистки не вызывает больших затруднений и при необходимости может быть легко механизирован.

При резке с водяной защитой практически полностью исключаются деформации раскроечных рам и существенно повышается срок их службы. Портальные машины и раскроечные столы-ванны экономически целесообразно использовать при резке листовых заготовок в объеме 800–1000 т/год.

Следует отметить, что одна машина для термической резки, как правило, обслуживает не одно, а два рабочих места, расположенных рядом (рис. 204). В этом случае машину перемещают от одного рабочего места к другому. При наличии машины с порталом достаточно большой ширины и с несколькими резаками на каждом рабочем месте можно одновременно вырезать одинаковые детали из двух или большего количества листов как в прямом, так и в зер-



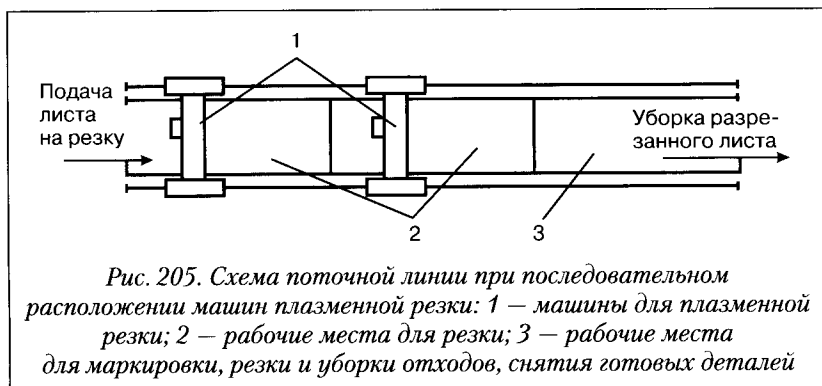
кально отраженном виде. После окончания вырезки деталей из листа, находящегося на первом рабочем месте, машину перемещают на второе рабочее место для резки следующего листа. На первом рабочем месте в это время маркируют детали, снимают их при помощи цехового крана, режут и удаляют отходы. Коэффициент загрузки машины для термической резки увеличивается.

Комплексы для термической резки в составе одной порталной машины и двух рабочих мест целесообразно использовать при объемах резки листа 1500–2000 т/год.

Поточные линии имеют различные компоновочные и конструкторские решения. При большом объеме плазменной резки, когда для выполнения программы требуется более одной машины, применяется компоновка в поточной линии.

Линия с последовательным расположением 2–3 машин для плазменной резки, обслуживаемая цеховым краном, может обеспечить резку листов в объеме 2000–5000 т/год.

Наилучшие условия для непрерывной работы машин при наименьшей площади для размещения поточных линий обеспечивает последовательное расположение машин и использование двухъярусной транспортной системы подачи листов к машинам и удаления их после резки (рис. 205). Наиболее часто встречаются поточные линии с подачей листов к машинам на специальных раскроечных рамах. Раскроечная рама с листом поступает по рольгангу первого яруса транспортной системы к любой свободной в данный момент машине для плазменной резки, специальным подъемником ее передают на второй ярус, где выполняют вырезку деталей. Поднятая



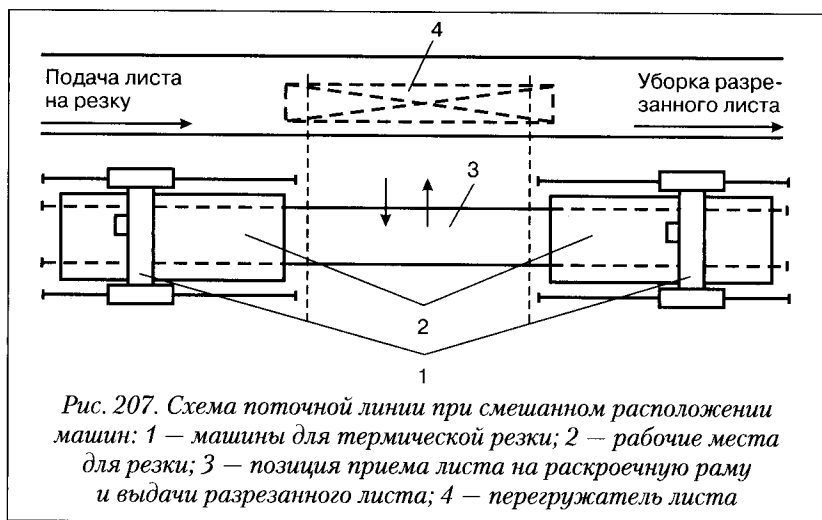
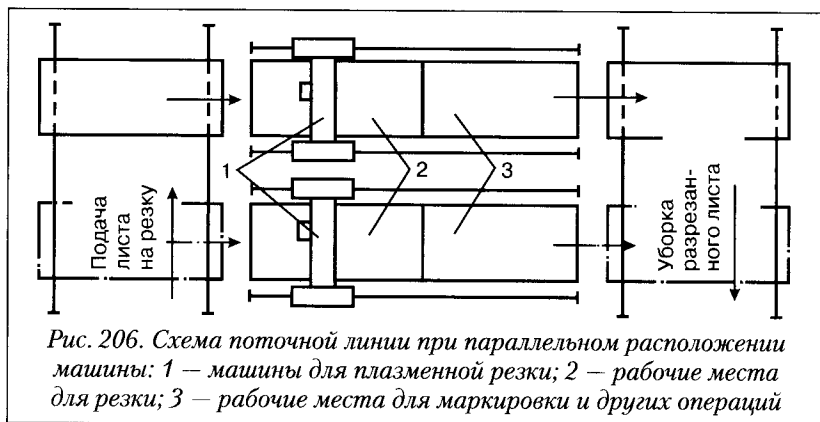
раскроечная рама не мешает перемещению по рольгангу первого яруса других раскроечных рам к свободным машинам. После завершения резки раскроечную раму опускают на рольганг первого яруса, перемещают на специальное место, с которого передают на второй ярус для маркировки, резки и удаления отходов, перемычек, снятия и сортировки деталей. Освободившаяся раскроечная рама опускается на рольганг первого яруса, по которому направляется за очередным листом.

Применяют также двухъярусные поточные линии, на которых подачу листов к машинам и удаление их после резки производят по рольгангу без раскроечных рам. Однако в этом случае необходимо в процессе резки оставлять перемычки между контуром детали и основным металлом, в противном случае мелкие детали и отходы будут при транспортировке проваливаться между роликами рольганга. После завершения резки лист опускают на отдельную позицию, где кроме маркировки, резки, удаления отходов и снятия деталей вручную разрезают перемычки.

Объем резки листов линии, включающей четыре последовательно расположенные машины для термической резки с загрузкой листов и сортировкой вырезанных деталей, 10 000–15 000 т/год.

Существуют и другие компоновки поточных линий, имеющие определенные достоинства и недостатки. При параллельном расположении машин для термической резки (рис. 206) используют более простые транспортные механизмы, но при этом требуются производственные площади больших размеров. Находит применение и смешанное расположение машин (рис. 207). Отсутствие в этих двух вариантах двухъярусной транспортной системы не позволяет обес-





печь бесперебойное снабжение машин из-за встречных перемещений раскроечных рам с листами до и после выполнения резки.

Если объем резки свыше 20 000 т/год, целесообразно создавать гибкое автоматизированное производство для термической резки [253, 279]. При рациональном планировании и организации автоматизированных производств, соответствующем оборудовании, гибкой системе управления можно добиться высокой технико-экономической эффективности, улучшить качество заготовок и окупить затраты в течение 4–5 лет эксплуатации.

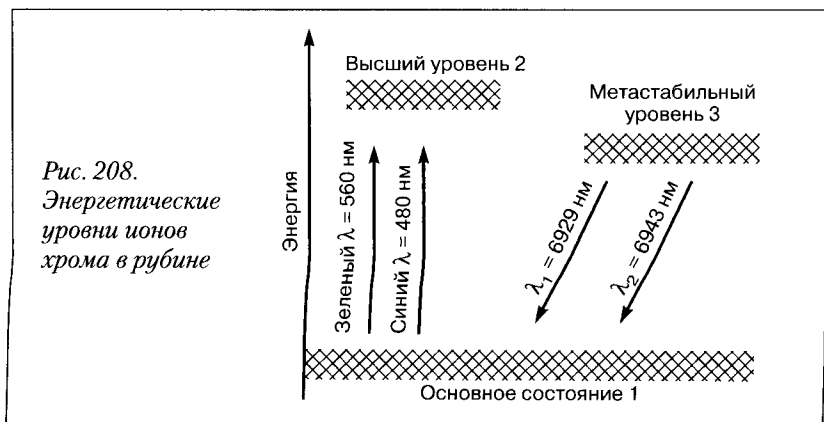
## Глава 4. Лазерные технологии

Лазер представляет собой генератор электромагнитных волн в диапазоне ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений, характеризующихся высокой степенью монохроматичности и высокой когерентностью [287, 288]. Благодаря этим качествам лазерное излучение можно сфокусировать на чрезвычайно малую площадь, теоретически соизмеримую с квадратом длины излучения. Создаваемая лазерами плотность мощности в зоне облучения достаточна для расплавления (и испарения) всех известных материалов.

По виду активного вещества излучателя лазеры разделяют на твердотельные и газовые.

Для перевода активных частиц в возбужденное состояние служат источники возбуждения. Они могут воздействовать на активное вещество световым потоком, потоком электронов, потоком радиоактивных частиц и т. п.

Схема формирования светового луча на примере простейшего твердотельного рубинового лазера представлена на *рис. 208*. При освещении рубина зеленым светом ионы хрома возбуждаются и



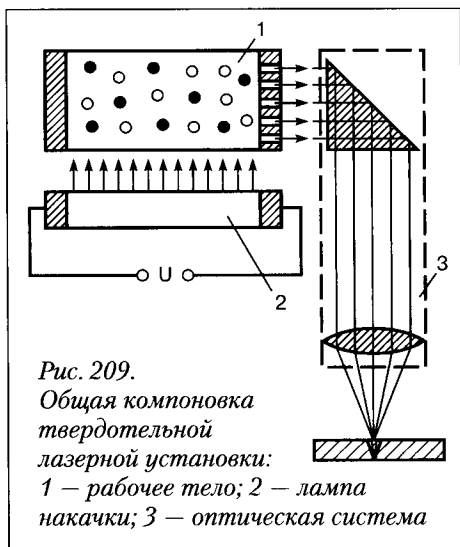


Рис. 209.  
Общая компоновка  
твердотельной  
лазерной установки:  
1 — рабочее тело; 2 — лампа  
накачки; 3 — оптическая система

переходят на более высокий уровень 2. Этот уровень нестабилен, и частицы быстро совершают безызлучательный переход на промежуточный метастабильный уровень 3. При достаточной заселенности уровня 3 переход хотя бы одной из частиц на низший уровень вызывает лавинообразный переход и других частиц. Это создает когерентное излучение с определенной длиной волны.

В современных твердотельных лазерных установках (рис. 209) в качестве

активного элемента используют оптическое стекло с примесью неодима или других редкоземельных элементов. Это позволяет повысить выходную мощность излучения.

В газовых лазерах (рис. 210) активный элемент заполняют углекислым газом с добавками азота. Достаточной заселенности достигают за счет резонансной передачи энергии молекул азота молеку-

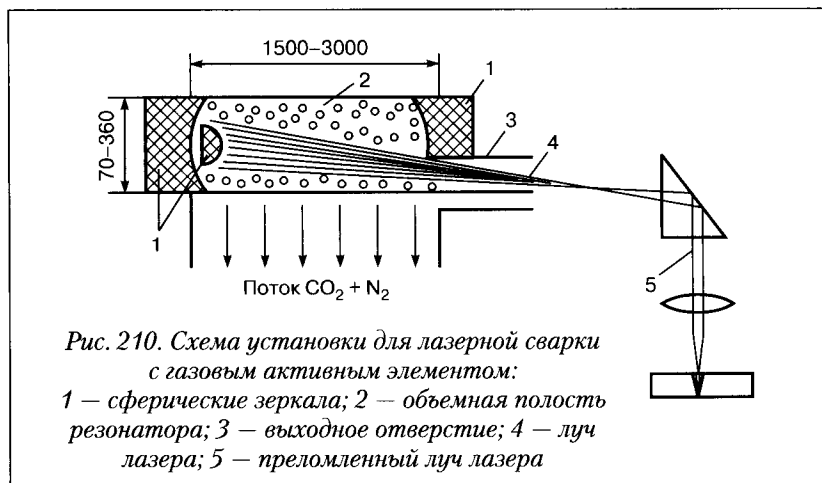


Рис. 210. Схема установки для лазерной сварки  
с газовым активным элементом:  
1 — сферические зеркала; 2 — объемная полость  
резонатора; 3 — выходное отверстие; 4 — луч  
лазера; 5 — преломленный луч лазера

лам углекислого газа. Активную среду возбуждают тлеющим разрядом или другими способами. Благоприятные условия для охлаждения активного элемента позволяют получать непрерывное излучение. Газовые лазеры обладают более высокой выходной мощностью, чем твердотельные.

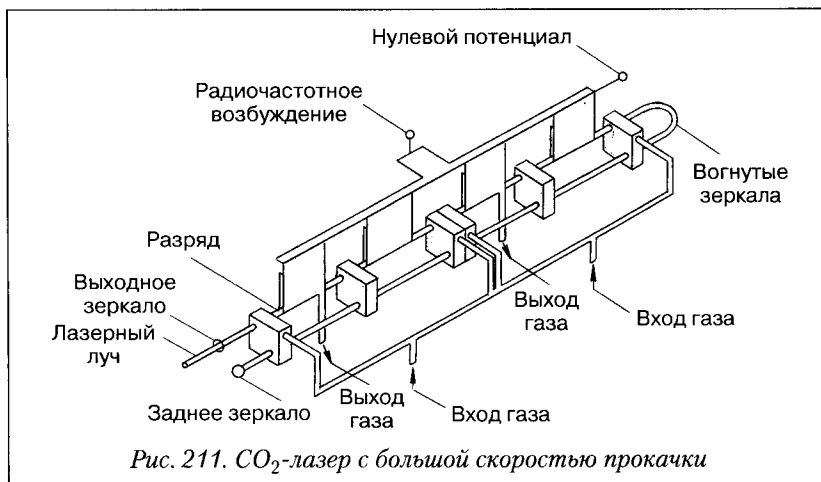
Принцип работы лазеров подробно рассмотрен в [288, 289].

Применение лазеров для обработки конструкционных материалов оказалось возможным после создания лазеров с большими значениями средней мощности в непрерывном или импульсно-периодическом режиме генерации.

В настоящее время в промышленности в основном используют газовые  $\text{CO}_2$ -лазеры и твердотельные Nd:YAG-лазеры (алюмоиттриевый гранат с неодимом), работающие в инфракрасном и ближних к инфракрасному диапазонах спектра [290, 291]. Однако мощные диодные лазеры и Nd:YAG-лазеры с диодной накачкой становятся все более эффективными.

В  $\text{CO}_2$ -лазерах рабочая среда состоит из смеси углекислого газа, азота и гелия. Наиболее распространено соотношение газов в смеси:  $\text{CO}_2$  — 5%,  $\text{N}_2$  — 10%, остальное — гелий. Принцип работы всех  $\text{CO}_2$ -лазеров одинаков, однако в их конструкции есть различия в зависимости от методов возбуждения и охлаждения газовой смеси в резонаторе. Активной средой в этих лазерах является углекислый газ. Азот способствует повышению мощности лазера, передавая энергию молекул  $\text{CO}_2$  и позволяя ей оставаться на верхнем уровне лазерного излучения, гелий ускоряет отвод теплоты от газовой смеси.  $\text{CO}_2$ -лазеры имеют мощность от десятков ватт до 50–70 кВт при КПД до 10%. Эти лазеры наиболее широко используют для резки, сварки и поверхностной обработки.

$\text{CO}_2$ -лазеры могут быть с продольной или поперечной прокачкой и отпаянные [291]. В лазерах с медленной продольной прокачкой газ движется соосно с лазерным лучом в стеклянной трубке (обычно диаметром от 10 до 14 мм), которая окружена другой стеклянной трубкой, расположенной коаксиально. В зазор между трубками подается вода или масло для охлаждения. С одной лазерной разрядной трубки длиной 1 м может быть получена мощность от 50 до 70 Вт. Преимущества этого типа  $\text{CO}_2$ -лазера — хорошая фокусировка луча, относительная простота конструкции и сравнительно невысокая стоимость. Основной недостаток — значительное увеличение габаритов лазера при необходимости получения большой мощности. Максимальная мощность таких лазеров 2 кВт и может

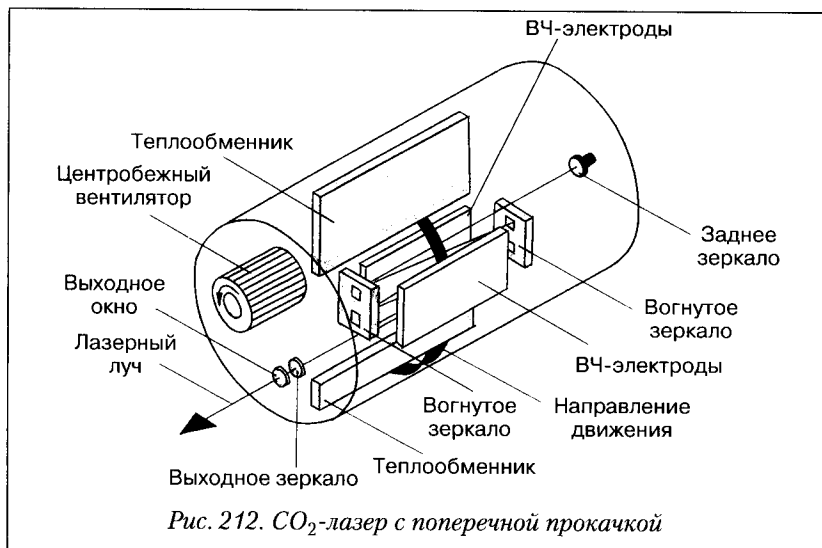


быть получена примерно от 20 лазерных разрядных трубок, помещенных последовательно.

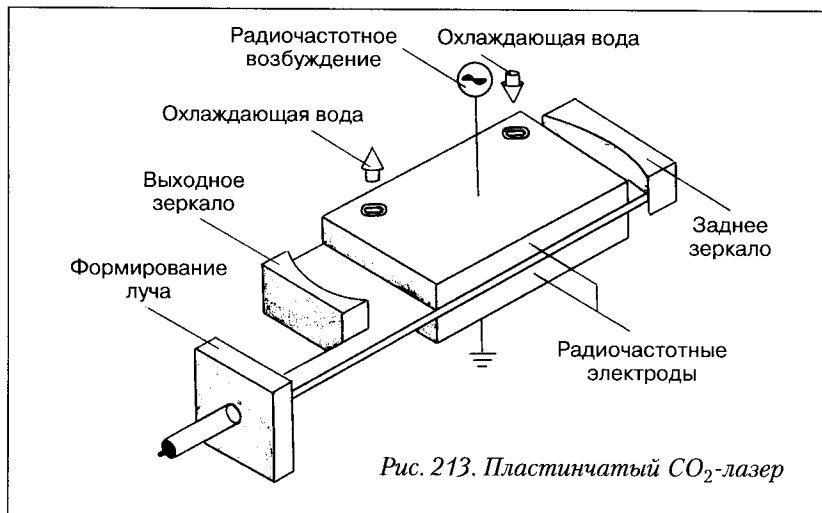
В CO<sub>2</sub>-лазерах с быстрой продольной прокачкой (рис. 211) высокие параметры достигаются за счет прокачки газа через разрядную трубку со скоростью, близкой к скорости звука [291]. При этом, прежде чем повторно использовать газ в лазерной трубке, его охлаждают в теплообменнике. Длина лазерной разрядной трубки в этом случае может быть значительно уменьшена. Кроме компактного размера, CO<sub>2</sub>-лазеры этого типа имеют высокую выходную мощность (до 20 кВт). Такие лазеры наиболее пригодны для сварки.

В CO<sub>2</sub>-лазерах с поперечной прокачкой (рис. 212) поток газа с высокой скоростью прокачивают поперек оптической оси и через теплообменник многократно используют снова [291]. В сравнении с предыдущими двумя конструкциями в CO<sub>2</sub>-лазерах с поперечной прокачкой газ находится в активной области меньшее время и вследствие этого не перегревается. Это позволяет получить очень высокие выходные мощности при компактной конструкции. Мощность промышленных лазеров этого типа 45–50 кВт, их используют для сварки, наплавки и поверхностной обработки.

В отпаянном CO<sub>2</sub>-лазере основным элементом конструкции является стеклянная трубка, по торцам которой расположены зеркала резонатора и блок питания. Трубку заполняют активной газовой средой и запаивают. После определенного срока службы трубку заменяют другой.



Разработан также новый тип CO<sub>2</sub>-лазера (слаб-лазер) с диффузионным охлаждением (рис. 213) [291]. В конструкцию этого лазера входят две плоские медные пластины, расположенные близко друг к другу. Эти пластины выполняют роль электродов и радиаторов охлаждения. Таким образом, нет необходимости в газовой



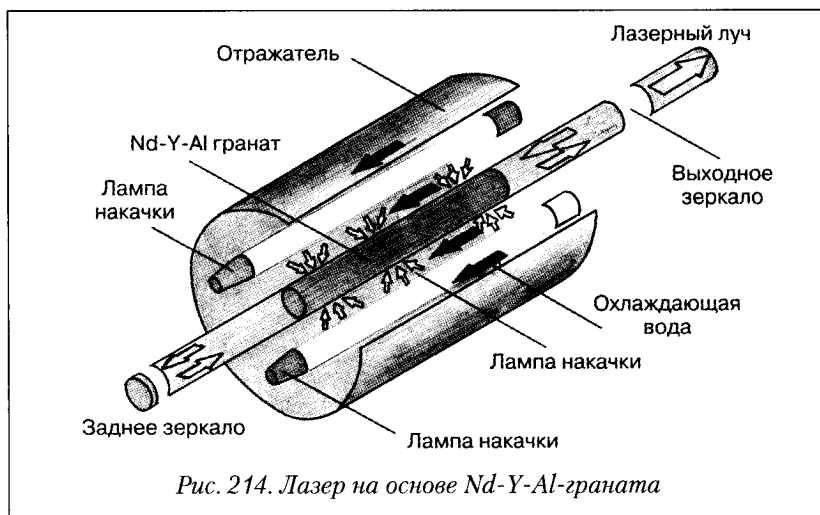


Рис. 214. Лазер на основе Nd-Y-Al-граната

транспортной системе, и конструкция получается компактной. Эти лазеры пока имеют мощность от 1 до 3,5 кВт.

К недостаткам  $\text{CO}_2$ -лазеров обычно относят их громоздкость, необходимость использования гелия в относительно больших количествах и невозможность транспортировки излучения с помощью оптических волокон.

Nd:YAG-лазер — твердотельный лазер (рис. 214), в котором в качестве активного элемента используют аломоиттриевый гранат с неодимом. Активный элемент имеет форму цилиндра с отполированными плоскими параллельными торцами [291]. Эти лазеры работают в импульсном и непрерывном режимах при КПД от 3 до 5% и отличаются высокой эффективностью и надежностью. Стержни Nd:YAG-лазеров обычно имеют диаметр 6 мм и длину 100 мм, иногда используют стержни диаметром 10 мм и длиной 200 мм. Небольшие размеры активного стержня делают Nd:YAG-лазеры намного более компактными, чем  $\text{CO}_2$ -лазеры. В этом случае лазерное излучение получают, возбуждая активный элемент лампами накачки, помещенными в непосредственной близости от него. Чтобы направить максимальное количество света от лампы накачки в стержень и получить максимальную мощность лазера, активный стержень и лампу помещают в специальный резонатор.

Максимальная мощность единичного Nd:YAG-лазера 500–600 Вт. Для получения более высокой мощности необходимо ис-

пользовать несколько активных элементов, расположенных последовательно. Nd:YAG-лазеры с восемью активными элементами мощностью до 5 кВт, передающие луч по оптическим волокнам, получили достаточно широкое применение в автомобилестроении.

Специалисты считают, что из-за своей относительно низкой цены Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой в настоящее время и, по-видимому, в ближайшем будущем будут широко применять в промышленности. Однако на смену им уже приходят Nd:YAG-лазеры большой мощности с диодной накачкой. Эти лазеры имеют намного лучшие энергетические характеристики, они более компактны, проще в обслуживании и имеют значительно большие сроки службы в сравнении с Nd:YAG-лазерами с ламповой накачкой. Nd:YAG-лазеры с диодной накачкой с выходной мощностью более 4 кВт и гарантированным сроком службы 15000 ч используют для сварки, нанесения покрытий и поверхностной обработки.

В диодных лазерах единичный излучательный элемент — собственно лазерный диод с мощностью излучения около 5 мВт. Для получения большей мощности излучения набирают пакет из лазерных диодов.

К числу преимуществ диодных лазеров следует отнести высокий КПД (до 50%), что ведет к более низким эксплуатационным расходам, а также небольшие размеры, что позволяет легко встраивать их в существующие производственные системы.

На рынке предлагают диодные лазеры мощностью 3–5 кВт. Хотя стоимость мощных диодных лазеров в настоящее время достаточно высока, но их считают весьма перспективными для промышленного использования.

В *табл. 145* приведены параметры различных лазеров высокой мощности, применяемых для сварки, наплавки, резки.

На мировом рынке промышленных лазеров в настоящее время отмечен значительный рост производства волоконных лазеров (*табл. 146*) [2]. Волоконные лазеры в секторе технологических лазеров малой мощности в настоящее время составляют серьезную конкуренцию твердотельным лазерам с оптической накачкой, а волоконные лазеры большой мощности — это уже реальная альтернатива СО<sub>2</sub>-лазерам. Основными преимуществами волоконных лазеров являются более высокий КПД, стабильная выходная мощность, малая занимаемая площадь, возможность транспортировки лазерного луча по оптическому световоду на расстояние до 300 м и более.



**Таблица 145. Параметры различных типов лазеров высокой мощности, используемых для сварки, наплавки, резки, упрочнения и нанесения покрытий**

Параметры лазера	CO <sub>2</sub> -лазер	Nd:YAG-лазер с накачкой		Диодный лазер
		ламповой	диодной	
Длина волны, мкм	10,6	1,06	1,06	0,8...0,94
КПД, %	5...10	1...3	10...12	30...50
Максимальная мощность, кВт	40	4	4	6
Средняя плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	1·10 <sup>6</sup> ...1·10 <sup>8</sup>	1·10 <sup>5</sup> ...1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>6</sup> ...1·10 <sup>9</sup>	1·10 <sup>3</sup> ...1·10 <sup>5</sup>
Сервисное обслуживание, через, ч	2000	200	10000	10000
Передача излучения по оптическому волокну	Нет	Есть	Есть	Есть
Качество излучения, мм-рад	12	23...45	12	100...1000

**Таблица 146. Мировое производство промышленных лазеров, шт.**

Лазер	2005	2006	Отношение 06/05, %	2007	Отношение 07/06, %
CO <sub>2</sub> -лазеры	16940	21800	9	23320	7
Твердотельные	11275	9725	-14	9285	-4
Волоконные	3475	5450	57	6750	31
Другие	475	550	16	600	9
Всего	35165	37525	7	39955	6

Чтобы получить максимальную выгоду от лазерной обработки, необходимо знание параметров лазерного луча и свойств обрабатываемого материала. Параметры лазерного луча, от которых зависит эффективность нагрева обрабатываемого материала, — это мощность луча, его диаметр, фокусировка и пространственное расположение, время обработки, длина волны, угол падения луча на обрабатываемую поверхность и его поляризационные характеристики [287, 288, 291].

Длина волны лазерного излучения — главный фактор в определении возможности применения лазера для того или иного вида

работ. Поглощения энергии и нагрева не будет, если длина волны лазерного излучения выбрана неправильно. Угол падения луча на обрабатываемую поверхность и его поляризационные характеристики определяют, какое количество лазерного излучения будет отражено от обрабатываемой поверхности.

Отражательная способность, теплопроводность, теплоемкость, скрытая теплота плавления и плотность материала определяют эффективность лазерной обработки.

Отражательная способность поверхности диктует наиболее подходящую длину волны лазера для обработки конкретного материала. Отражательная способность металлов уменьшается с уменьшением длины волны, поэтому эффективность нагрева металлов увеличивается при использовании лазера с меньшей длиной волны. Следовательно, обработка металлов с использованием Nd:YAG-лазера, имеющего меньшую длину волны, более эффективна в сравнении с обработкой CO<sub>2</sub>-лазером, имеющим большую длину волны. Отражательная способность неметаллов, наоборот, уменьшается с увеличением длины волны, и в этом случае предпочтительнее использовать CO<sub>2</sub>-лазер. Отражательная способность металлов зависит от чистоты обработки и степени окисления поверхности. Грубо обработанные (шероховатые) или окисленные поверхности имеют более низкую отражательную способность и, следовательно, способствуют поглощению энергии. Чистота поверхности может изменять отражательную способность на 50%. Следует отметить, что окисление поверхности металла не всегда выгодно, потому что оксид может иметь температуру плавления намного выше, чем сам металл. Например, оксид алюминия значительно снижает эффективность обработки алюминиевых поверхностей.

Отражательная способность металлических поверхностей уменьшается с увеличением температуры, что способствует поглощению энергии обрабатываемой поверхностью. Для преодоления начальной отражательной способности металла требуются лазеры с выходной мощностью по крайней мере в несколько сотен ватт. Обычно, чтобы увеличить производительность и понизить издержки производства, используют лазеры с выходной мощностью более киловатта. Напротив, поскольку большинство неметаллов хорошо поглощают излучение CO<sub>2</sub>-лазеров, для их обработки можно использовать лазеры мощностью в несколько сотен ватт.

Распространение теплоты в материале определяется его теплоемкостью и теплопроводностью. От этих показателей зависит, как

быстро и на какую глубину прогреется обрабатываемый материал, и сама высокая теплопроводность в совокупности с большой отражательной способностью значительно затрудняет лазерную обработку меди и алюминия.

В настоящее время лазер стал промышленным инструментом при выполнении многих технологических операций (микрообработка, сварка, наплавка, упрочняющая поверхностная обработка, маркирование, гравирование, нанесение и считывание информационных знаков. поверхностная очистка материалов, выращивание трехмерных объектов, формирование изделий сложной пространственной формы из листовых материалов и др.) [287, 290].

При микрообработке получают микроотверстия диаметром до нескольких микрометров в разных материалах независимо от их свойств, поэтому с ее помощью получают прецизионные отверстия приборных камней, диафрагм, топливных форсунок, разных фильтров, специальных инструментов типа алмазных волок, фильер для получения искусственного волокна и др. Производительность изготовления таких отверстий в зависимости от толщины материала может достигать нескольких тысяч отверстий за секунду.

С помощью сканирующего лазерного излучения с большой скоростью можно выполнять сложные профильные пазы в различных деталях микроэлектроники, осуществлять прецизионную подгонку резисторов и другие операции.

Среди способов поверхностной очистки материалов наиболее распространен способ лазерного удаления изоляции с концов проводов перед их соединением с соответствующими элементами. Лазерное удаление изоляции происходит с большой скоростью, этот процесс бесконтактный и легко контролируемый. Высокого качества очистки главным образом достигают благодаря значительной поглощающей способности разных органических материалов (в частности, полимерных изолирующих покрытий) в условиях их облучения инфракрасным лучом лазеров с длиной волны 10,6 или 1,06 мкм. Такую технологию также используют для очистки поверхностей ответственных деталей от промышленной грязи, разного рода включений в материале и пр. вместо традиционных химических способов очистки.

Ведутся работы по скоростной очистке лазерным излучением железнодорожных рельсов. Необходимость их очистки связана с тем, что тонкие слои оксидов в соединении с водой и смазочными материалами образуют на поверхности катания пленку, ухудшаю-

щую сцепление колес с рельсами, удлиняющую тормозной путь и увеличивающую электрическое сопротивление между колесом и рельсом. Компания Rofin (Германия) совместно с компанией Laserthor (Великобритания) разработали соответствующую систему лазерной очистки, которая была смонтирована на поезде. Во время испытаний системы лазерной очистки рельсов рабочая скорость превышала 64 км/ч. Для систем очистки водой под давлением 100 МПа типичная рабочая скорость составляет 35 км/ч. Установка работает в автоматическом режиме.

Лазерное излучение позволяет также удалять устаревшую краску и грунт с поверхности детали без повреждения материала основы.

Лазерная технология «выращивания» трехмерных объектов (стереолитографическое изготовление) позволяет создавать высокоточные трехмерные объекты-модели из полимерных веществ, бумажной или картонной ленты и других материалов. При этом деталь (объект) сложной пространственной формы создают из материала поэлементно, слой за слоем соответственно образу в памяти компьютера. Этот способ особенно актуален для таких динамичных областей производства, как авиа- и автомобилестроение, электронное машиностроение, инструментальная промышленность, изготовление космической техники и т. п. Так, в сравнении с традиционными способами моделирования деталей и узлов новый способ «выращивания» объектов в американской компании General Motors позволяет сэкономить до 60–80% времени и средств.

Объемы применения стереолитографического изготовления моделей увеличиваются с каждым годом. Благодаря возможности очень точно контролировать подачу тепловой энергии в зону лазерного действия и ее перемещение по поверхности обрабатываемого материала появилась технология программируемого изменения формы листового металла за счет термических деформаций, генерируемых лазерным лучом. По новой технологии без использования традиционных дорогих деформирующих инструментов (пуансонов, матриц, штампов) можно изготавливать трубчатые детали, создавать волнистые поверхности, сгибать и править металлический материал согласно заданной программе.

Для сварочного производства наибольший интерес представляют сварка, наплавка, резка и различные технологии поверхностной упрочняющей обработки с использованием лазерного луча.

## 4.1. Лазерная сварка

В качестве достоинств лазерной сварки металлов обычно выделяют:

- высокую концентрацию энергии, обеспечивающую малый объем расплавленного металла, незначительные размеры околошовной зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения шва и околошовной зоны;
- низкие деформации сварных конструкций;
- легкую транспортировку лазерного луча с помощью зеркал и волоконной оптики в труднодоступные места сварной конструкции;
- отсутствие необходимости в вакуумной защите зоны сварки (по сравнению с электронно-лучевой);
- неподверженность лазерного луча влиянию магнитного поля свариваемых деталей и технологической оснастки.

Лазерную сварку осуществляют в широком диапазоне режимов, обеспечивающих высокопроизводительный процесс соединения различных металлов толщиной от нескольких микрон до десятков миллиметров.

Основными признаками, характеризующими лазерную сварку, являются плотность мощности лазерного воздействия  $E$  и длительность воздействия  $\tau$ .

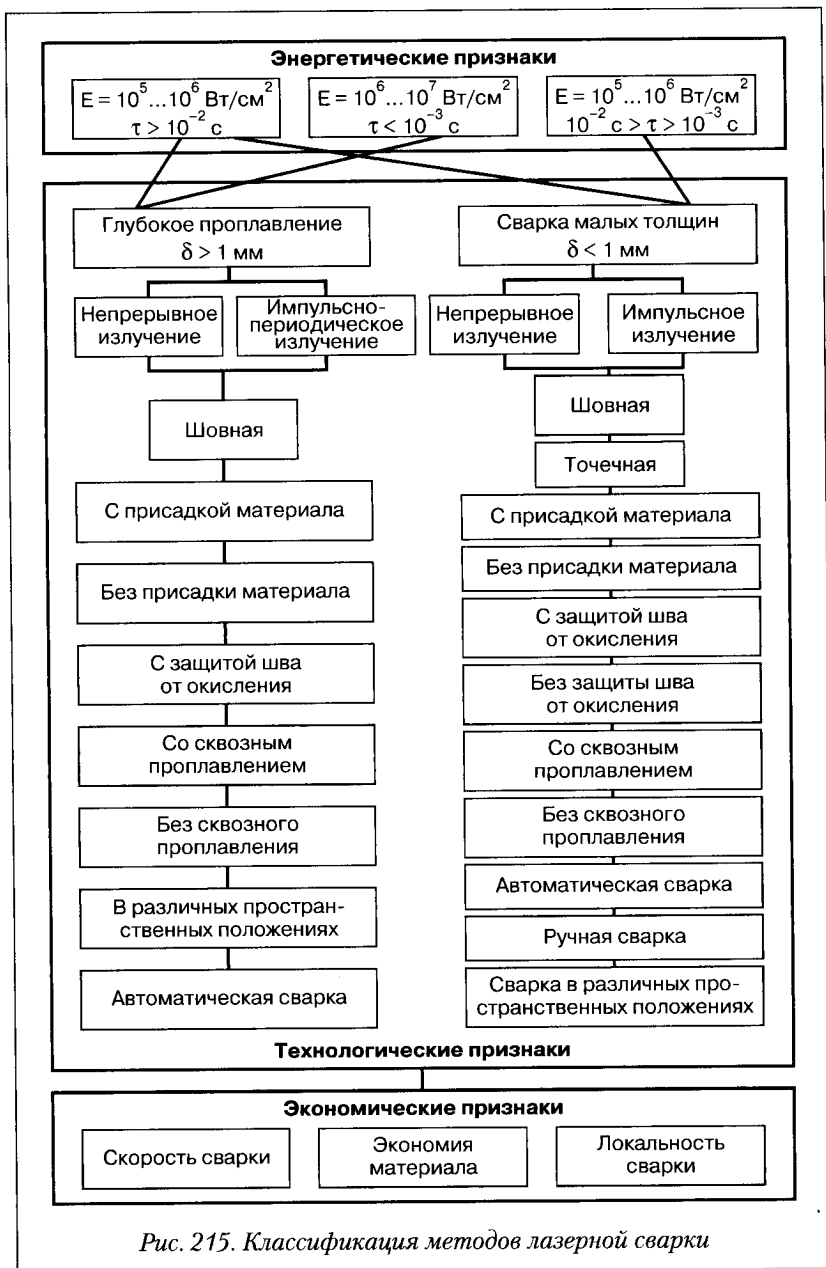
Классификация способов лазерной сварки представлена на *рис. 215* [287].

В первую группу входят способы сварки непрерывным лазерным излучением ( $E = 10^5 - 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 10^{-2}$  с). При этом длительность воздействия определяют отношением  $d$  сфокусированного излучения к скорости сварки  $v_{св}$

$$\tau = d / v_{св}. \quad (24)$$

Изменение  $E$  и  $\tau$  в указанных пределах позволяет осуществлять сварку плавлением разнообразных конструкционных материалов малых и больших толщин.

Способы сварки импульсно-периодическим лазерным излучением ( $E = 10^{-6} - 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>;  $\tau < 10^{-3}$  с) характеризуются высокой плотностью мощности и кратковременным (повторяющимся) воздействием, обеспечивающим большую эффективность проплавления. Частота следования импульсов составляет десятки и сотни герц, а длительность импульсов значительно ниже значений, опре-



*Рис. 215. Классификация методов лазерной сварки*

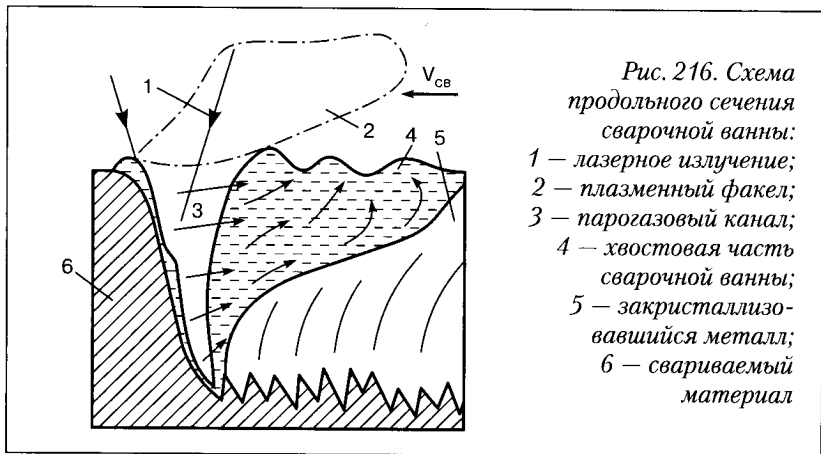
деляемых по приведенной выше формуле (24). Суммарное воздействие импульсов достаточно для получения глубокого проплавления. Режимы этой группы способов можно использовать для сварки материалов различных толщин при значительно меньших энергозатратах, чем при сварке непрерывным излучением.

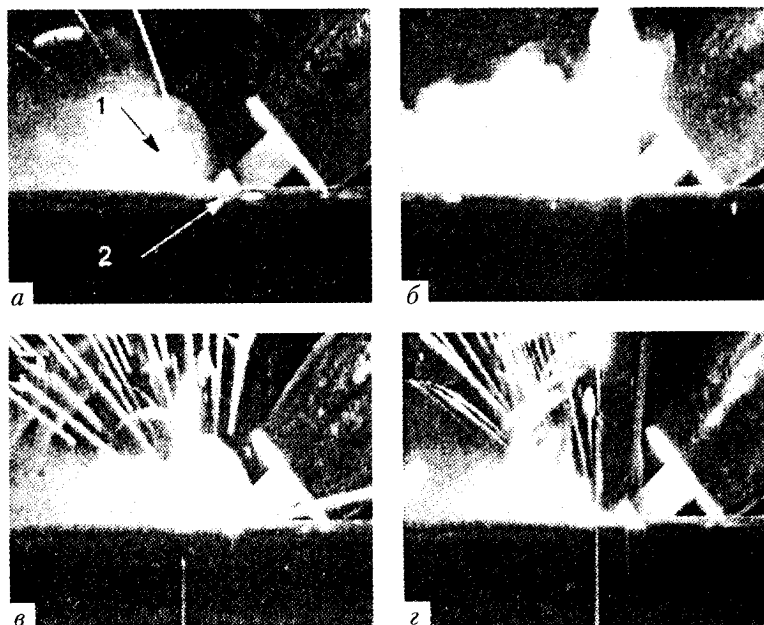
При способах сварки импульсным лазерным излучением ( $E = 10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$ ;  $10^{-3} < \tau < 10^{-2} \text{ с}$ ) длительность импульса выше, чем при импульсно-периодическом излучении. Под действием импульса формируется точечное сварное соединение.

В соответствии с принятой классификацией (см. рис. 215) рассматривают два основных типа проплавления при лазерной сварке: глубокое проплавление при сварке материала толщиной  $d > 1 \text{ мм}$  и незначительное проплавление при сварке материала толщиной  $d < 1 \text{ мм}$ .

Сварка с глубоким проплавлением может быть выполнена как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения. При сварке малых толщин, выполняемой непрерывным и импульсным излучением, используют более мягкие режимы, обеспечивающие лишь расплавление металла в шве без перегрева, не достигая высоких температур интенсивного испарения.

Схема формирования сварного соединения при лазерной сварке представлена на рис. 216. В головной части ванны расположен канал (каверна) 3, заполненный парами. В процессе лазерной сварки над поверхностью сварочной ванны наблюдается плазменный факел 2, размеры и яркость которого периодически изменяются с час-





*Рис. 217. Эрозионный факел при лазерной сварке углеродистой стали  
 ( $P = 5 \text{ кВт}$ ;  $v_{\text{св}} = 2 \text{ м/мин}$ , расход He 17 л/мин):  
 а, г — плазма каверны не закрыта приповерхностной плазмой;  
 б, в — плазма каверны закрыта приповерхностной плазмой  
 (1 — приповерхностная плазма; 2 — плазма каверны)*

тотой от нескольких герц до сотен герц. При значительных скоростях лазерной сварки факел отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки, на 20–60 градусов.

В [292] исследовали поведение плазмы при различной мощности излучения, разных скоростях сварки, толщинах свариваемого металла, защитных газах и т. п. Исследования проводили на углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталях толщиной 0,15–10 мм с использованием для защиты зоны плавления He, Ar, CO<sub>2</sub>.

Установлено, что при лазерной сварке в He, Ar, CO<sub>2</sub> образуется плазма двух видов: приповерхностная и плазма каверны (рис. 217). Хотя приповерхностная плазма и не обладает стабильностью в процессе сварки, она не оказывает экранирующего действия на лазер-



ное излучение при небольшой его мощности (до 2 кВт). Однако при повышении мощности излучения с 2 до 8 кВт с шагом 1 кВт растет интенсивность излучения, что вызывает увеличение концентрации электронов в плазме и ее расширение, а также увеличение яркостной температуры. В свою очередь, это приводит к повышению коэффициента поглощения плазмой лазерного излучения и увеличению угла отклонения лучей из-за рефракции.

Приповерхностная плазма отличается следующими свойствами:

- прозрачна для лазерного излучения при условии обеспечения режима светового горения плазменного фронта при плотности излучения  $(0,1-6) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>;
- частично поглощает лазерное излучение в режиме дозвуковой радиационной волны (ДРВ) при интенсивности излучения от  $(4-10) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>;
- полностью поглощает лазерное излучение в режиме сверхдетонационных волн (СДВ) при интенсивности излучения, превышающей  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>;
- при работе в режимах ДРВ и СДВ наблюдается рефракция лазерного излучения.

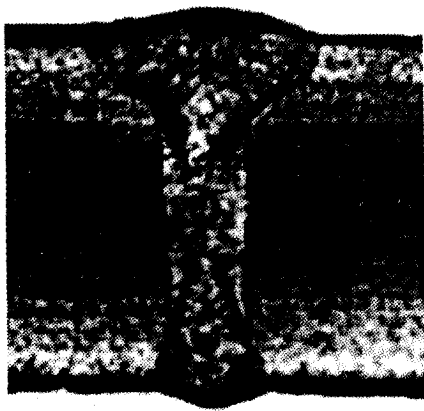
Приповерхностная плазма имеет недостаточную энергетическую связь с плазмой каверны, и ее влияние на эффективность сварки можно существенно ограничить. Наиболее распространенным приемом является сдвиг приповерхностной плазмы струей газа — He, Ar, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и др. Иногда достаточным является увеличение расхода защитного газа, например Ar, от 17 до 25–30 л/мин.

Установлено, что на процесс плазмообразования влияет и скорость сварки. В частности [292], при сварке в аргоне белой жести толщиной 0,25 мм на мощностях излучения от 2,0 до 5,0 кВт с использованием линзы с фокусным расстоянием  $f = 300$  мм при увеличении  $v_{св}$  с 5 до 25 м/мин наблюдается формирование качественного сварного шва. Однако при  $v_{св} = 27-30$  м/мин процесс сварки становится неустойчивым, что выражается в прерывистом характере существования плазмы. Переход на фокусирующий объектив с  $f = 130$  мм и, следовательно, повышение плотности мощности позволяет довести  $v_{св}$  до 50 м/мин.

При сварке металлов малых толщин плазма каверны не носит выраженного характера, и ее роль в снижении эффективности сварки не имеет значения в отличие от приповерхностной плазмы.

При сварке металлов большой толщины (свыше 1,0 мм) плазма сварочной каверны начинает оказывать самостоятельное воздейст-

*Рис. 218.  
Макроструктура  
( $\times 60$ ) сварного  
соединения стали  
08X18H10T  
при лазерной сварке  
( $P = 5 \text{ кВт}$ ,  
 $v_{\text{св}} = 10 \text{ м/мин}$ )*



вие на лазерное излучение. Установлено, что при интенсивности излучения  $(2-5) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$  плазма каверны нестационарна, тем не менее сварка протекает стабильно с образованием качественного сварного шва.

Эксперименты показали [292], что даже расфокусированные за счет рефракции лучи на входе в каверну после отражения от стенок каверны при выходе из ее основания снова становятся сфокусированными. Это объясняют тем, что стенки сварочной каверны обладают достаточно большой отражательной способностью, и при сварке стали больших толщин со сквозным проплавлением качественное формирование сварного шва происходит, когда около 10% подводимой энергии лазерного излучения выходит из корневой части сварочной каверны. При этих условиях формируется более широкое «кинжальное» проплавление с расширением уширения и выпуклостью не только в верхней ее части, но и в корневой (рис. 218). В средней зоне по высоте сварного шва наблюдается почти параллельное проплавление боковых кромок, что свидетельствует о равномерном поглощении излучения, а также распределении лазерной энергии по высоте сварочной каверны в средней ее зоне, нижней и частично верхней. Увеличение ширины сварного шва в нижней и верхней его частях вызвано характером теплоотвода.

Массоперенос расплавленного металла в сварочной ванне оказывает существенное влияние на формирование шва, образование характерных дефектов и механические свойства сварного соединения. Основной силой, действующей на расплавленный металл и

обеспечивающей его перенос, считается сила реакции паров. Под действием этой силы жидкий металл перемещается как сверху вниз по передней стенке парогазового канала, так и в горизонтальном направлении вокруг него (см. рис. 216). Перенесенный расплавленный металл обнажает участки металла с более низкой температурой на передней стенке канала, после чего процессы плавления и переноса повторяются. Экспериментально установлено, что скорость переноса жидкого металла существенно превышает скорость сварки и при скорости сварки 2–5 мм/с достигает 1000–2000 мм/с. Перенос жидкого металла в канале носит дискретный характер. Частота переноса изменяется прямо пропорционально скорости сварки и равна 10–50 Гц.

В процессе нагрева материала постоянным во времени потоком лучистой энергии, превышающим некоторое критическое значение, температура поверхности колеблется. Наличие незатухающих во времени колебаний температур указывает на существование резонансных режимов нагрева вещества.

Следует отметить характерные особенности импульсно-периодической лазерной сварки, осуществляемой импульсами с длительностью от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  с и частотой следования от 100 Гц до 1 кГц при плотности мощности  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>. Глубокое проплавление осуществляется, как и при непрерывном излучении, при наличии парогазового канала, который не схлопывается после действия очередного импульса.

При средней мощности лазерного излучения (1 кВт) мощность импульса может достигать 100 кВт. За короткое время действия импульса металл быстро нагревается до температуры кипения. Возникающая сила реакции паров перемещает объем расплавленного металла с передней стенки канала на заднюю. Происходит циклическое перемещение расплавленного металла в парогазовом канале с частотой действия импульсов, что принципиально отличает импульсно-периодическую лазерную сварку от сварки непрерывным оплавлением. При высокой частоте следования импульсов поверхность канала не успевает остыть, вследствие чего максимальная глубина проплавления оказывается больше, чем при действии непрерывного излучения.

В [293] проводили сопоставительное исследование геометрии, прочности и структуры сварных швов, выполненных непрерывным и импульсно-периодическим излучением CO<sub>2</sub>-лазера на низкоуглеродистых сталях (08кп, 10кп и 15кп) толщиной 1, 3, 5 и 10 мм.

Все опыты по изучению влияния скважности  $G$  и импульсно-периодического режима (ИПР) на характеристики металла шва производили при условии  $P_{\text{имп}} = P_{\text{непр}}$ , т. е. мощность лазерного излучения в импульсе равнялась таковой в непрерывном режиме (НР). Пределы изменения мощности составляли 1,5–5,0 кВт. Зону действия лазерного излучения во всех случаях защищали углекислым газом.

Установлено, что при импульсно-периодическом режиме модуляции излучения  $\text{CO}_2$ -лазера можно проплавливать более узкие и глубокие швы, чем при аналогичном непрерывном режиме генерации излучения. Увеличение глубины проплавления составляло 20–50%. С возрастанием средней мощности импульсно-периодического излучения оптимальная скважность увеличивается (при  $P_{\text{ср.имп}} = 1,9$  кВт  $G_{\text{опт}} = 1,5$ ; при  $P_{\text{ср.имп}} = 3,0$ – $4,4$  кВт  $G_{\text{опт}} = 2$ ), а оптимальная частота уменьшается (при  $P_{\text{ср.имп}} = 1,7$ – $1,9$  кВт,  $f_{\text{опт}} = 330$  Гц; при  $P_{\text{ср.имп}} = 3,0$ – $3,1$  кВт  $f_{\text{опт}} = 200$  Гц).

Установлено также, что с повышением скорости сварки глубина и ширина проплавления уменьшаются при сохранении коэффициента формы шва. Формирование превышения шва улучшается. При малых скоростях проплавления (18 м/ч) непрерывным и импульсно-периодическим излучением имеет место разбрызгивание металла. При скорости 36 м/ч эти недостатки устраняются, а при более высоких скоростях (например, 72 м/ч) зафиксировано стабильное формирование качественного валика превышения.

При сварке низкоуглеродистых сталей в импульсно-периодическом режиме зафиксировано уменьшение ширины ЗТВ. Участок перегрева (крупного зерна) либо отсутствует, либо становится нечетко выраженным. С уменьшением толщины свариваемого листового металла встречались явно выраженные участки перегрева. Во всех случаях на участках крупного зерна не обнаружено существенного увеличения твердости, в отличие от традиционных способов сварки. Металлографические исследования показали, что при сварке в импульсно-периодическом режиме в металле швов обнаружены участки с бейнитной структурой. Эта прочная пластичная структура обуславливает повышение твердости и прочности металла швов и ЗТВ, что является преимуществом по сравнению со сваркой в непрерывном режиме.

Результаты испытаний на растяжение показали, что металл шва, выполненный лазерной сваркой в непрерывном режиме, равнопрочен с основным металлом (стали 08кп, 10кп, 15кп). Прочность проплавления и стыковых соединений, сваренных в им-

пульсно-периодическом режиме, на 10–15% выше указанной прочности аналогичных соединений, полученных при той же мощности и скорости в непрерывном режиме.

Одной из особенностей импульсно-периодической лазерной сварки является периодичность образования и релаксации плазмы над поверхностью сварочной ванны [287]. При этом между началом импульса и образованием плазмы имеет место некоторая задержка по времени  $\tau_1$ , а после окончания импульса плазма релаксирует в течение времени  $\tau_2$ . Временная структура излучения определяется соотношением длительности импульса  $\tau_{\text{и}}$  и паузы  $\tau_{\text{п}}$ :

$$\tau_{\text{и}} = (Gf_{\text{и}})^{-1}; \tau_{\text{п}} = f_{\text{и}}^{-1} - \tau_{\text{и}},$$

где  $G$  – скважность импульсов;  $f_{\text{и}}$  – частота следования импульсов.

Соответствующим подбором параметров временной структуры можно добиться практически полного устранения влияния плазменного факела на снижение проплавляющей способности лазерного излучения. Для этого необходимо выполнять следующие условия:

$$\tau_{\text{и}} < \tau_1; \tau_{\text{п}} > \tau_2.$$

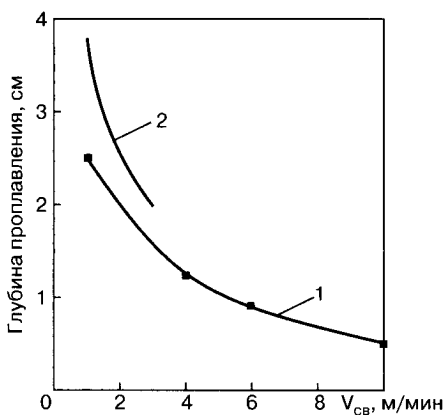
Механизм формирования шва при сварке с глубоким проплавлением характеризуется наличием парогазового канала, что является принципиальным отличием от сварки металлов малых толщин. Основными параметрами режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением являются мощность лазерного излучения, скорость сварки, параметры фокусирующей системы.

Мощность излучения в первую очередь влияет на проплавляющую способность и характер формирования шва (рис. 219) [312]. Наряду с мощностью излучения на процесс сварки влияют модовый состав, поляризация, распределение плотности мощности в сечении луча, расходимость. В связи с этим при переходе от одной модели лазера к другой оптимальное значение мощности для сварки может существенно изменяться.

При данном значении мощности скорость сварки устанавливается в следующем диапазоне: минимальное значение ограничено отсутствием «кинжального» проплавления, а максимальное – отсутствием качественного формирования шва и появлением дефектов в виде подрезов, пор, непроваров.

На качество сварных соединений влияет фокальное пятно (фокус) лазерного излучения. Для целей сварки фокальное пятно лазерного излучения должно быть диаметром 0,5–1,0 мм. При мень-

*Рис. 219. Глубина провара при выходной мощности пучка 30 (1) и 45 (2) кВт в зависимости от скорости сварки*



шем диаметре фокального пятна повышенная плотность мощности приводит к значительному перегреву расплавленного металла шва, интенсификации процессов испарения металла, вследствие чего в шве появляются дефекты. При диаметре сфокусированного пятна лазерного излучения более 1,0 мм снижается эффективность процесса сварки.

Геометрические параметры шва зависят от режима лазерной сварки и положения фокального пятна относительно поверхности свариваемых деталей. Максимальной глубины проплавления достигают при расположении фокуса под поверхностью материала. Оптимальная величина этого смещения фокуса зависит от свойств материала, толщины деталей и режимов сварки.

Принципиальной особенностью лазерного источника нагрева является высокая степень концентрации энергии, обеспечивающая сварку на повышенных скоростях, чего не обеспечивают дуговые источники нагрева. Этим достигают незначительного теплового воздействия на околошовную зону, высоких скоростей нагрева и охлаждения металла сварного соединения.

Высокопроизводительная лазерная сварка, выполняемая на скоростях 30 мм/с и более, обеспечивает для большей части конструкционных материалов значительное повышение технологической прочности. Таким образом, лазерная сварка улучшает свариваемость металлов, т.е. дает возможность получать качественные сварные соединения из конструкционных материалов, плохо свариваемых при использовании дуговых источников теплоты.

Выполнение лазерной сварки на скоростях 25–30 мм/с обеспечивает существенное снижение (в 3–10 раз) остаточных деформаций по сравнению с традиционными способами дуговой сварки [287]. Вследствие малой ширины зоны пластической деформации при лазерной сварке значения сжимающих напряжений в околошовной зоне оказываются на 40–70% ниже, чем при дуговой сварке, и не вызывают трудноустраняемых деформаций и потери устойчивости листовых элементов. При дуговой сварке потеря устойчивости сварных деталей приводит к искажению формы и размеров листовых элементов, и требуются непроизводительные затраты на устранение этих дефектов.

Металл шва при лазерной сварке защищают от окисления, используя газовую, флюсовую либо газоплюсовую защиту. Специфика лазерной сварки обуславливает применение специальных сопел (рис. 220) и составов защитных газов, обеспечивающих как надежную защиту, так и требуемое проплавление [294].

Наиболее простой и в то же время эффективной является медная трубка, один конец которой срезан под углом 30–40°, а по образующей на поверхности среза просверлено отверстие для прохождения луча (рис. 220, а). Помимо этого, может быть использовано

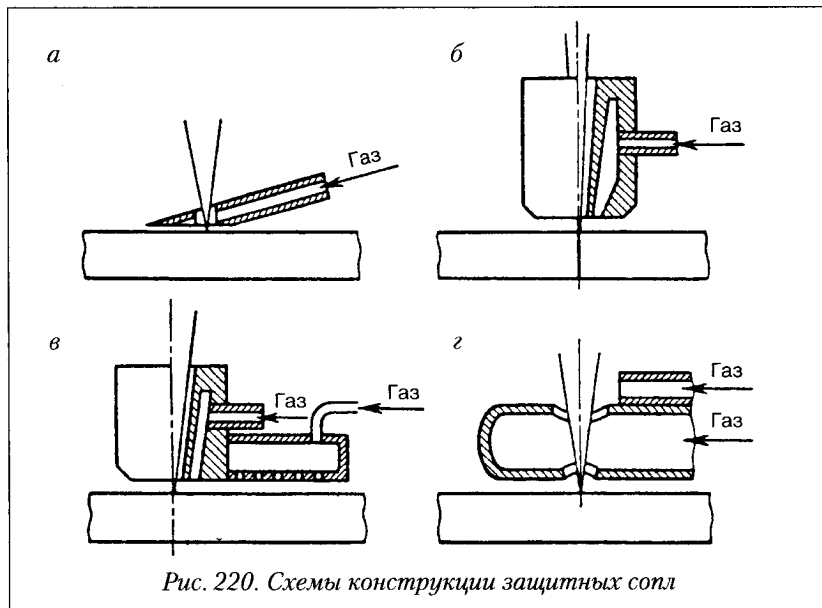


Рис. 220. Схемы конструкции защитных сопел

**Таблица 147. Физические свойства защитных газов и их влияние на эффективность проплавления**

Защитный газ	Теплоемкость $C$ , кДж/кК	Потенциал ионизации $U_i$ , В	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Глубина проплавления $h$ , мм	Эффективный КПД проплавления $\eta_{\text{и}}$
Аргон	0,53	15,7	1,78	1,0	0,4
Азот	1,04	14,5	1,25	4,9	0,5
Углекислый газ	0,88	13,2	1,98	5,1	0,6
Гелий	5,2	24,5	0,178	6,1	0,65
50% Ar + 50% He	2,1	–	0,95	6,0	0,63

*Примечание. Режим сварки  $P = 4,5$  кВт,  $V_{\text{св}} = 100$  м/ч.*

сопло, подобное соплу для дуговой сварки с коаксиальной подачей газа (рис. 220, б). Диаметр выходного отверстия сопла 2,0–3,5 мм. При сварке высокоактивных материалов, таких, например, как титан, используют дополнительные хвостовики с самостоятельной подачей газа (рис. 220, в). При сварке на повышенных уровнях плотности мощности применяют дополнительные устройства для сдува потока газов и брызг (рис. 220, г).

При выполнении соединений со сквозным проплавлением во многих случаях требуется защита корня шва. Организацию этой защиты выполняют аналогично защите при дуговой сварке, т. е. со стороны корня шва имеется подкладка, отступающая от поверхности материала на 2–3 мм, со множеством отверстий диаметром до 1 мм, через которые защитный газ подается в зону.

Функцию защиты сварного шва от окисления могут выполнять те же газы, что используются для дуговой сварки. Однако вследствие разницы в физических свойствах разные газы оказывают разное влияние на снижение экранирующего действия плазмы, а следовательно, и на эффективность проплавления (табл. 147) [294]. При этом газы, имеющие более высокий потенциал ионизации и теплопроводность, обеспечивают наивысшую эффективность проплавления. Наилучшие результаты дает защита шва гелием.

На качество защиты в существенной степени влияет правильный выбор расхода газа. При недостаточном расходе газа не будет обеспечено качество защиты, а излишний расход его приводит к неоправданным экономическим потерям. Рекомендуют следующие диапазоны расхода для некоторых защитных газов: He –  $(53-60) \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; 50% He + 50% Ar –  $(46-53) \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; Ar –  $(13-20) \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с.



Помимо газовой защиты, возможна защита шва флюсами, особенно в виде обмазок.

Сварку **деталей малых толщин** выполняют как импульсным, так и непрерывным излучением. Основными параметрами импульсной лазерной сварки, определяющими качество сварного соединения, являются энергия и длительность импульсов, диаметр фокального пятна излучения, частота следования импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности свариваемых деталей.

Энергию импульса лазерного излучения выбирают из условия отсутствия выплесков [287]. В первом приближении длительность импульса  $\tau_{\text{и}}$  рекомендуют: для меди —  $10^{-4} < \tau_{\text{и}} < 5 \cdot 10^{-4}$  с, для алюминия —  $5 \cdot 10^{-4} < \tau_{\text{и}} < 2 \cdot 10^{-3}$  с, для сталей —  $5 \cdot 10^{-3} < \tau_{\text{и}} < 8 \cdot 10^{-3}$  с.

Диаметр фокального пятна излучения  $d$  выбирают из условия обеспечения требуемой плотности мощности излучения —  $10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для целей сварки диапазон изменения  $d$  — от 0,05 до 1,0 мм. Регулирование  $d$  и, соответственно, плотности мощности излучения наиболее просто вести расфокусировкой излучения. При этом поверхность свариваемых деталей располагают выше или ниже фокальной плоскости, где сфокусированный световой пучок имеет наименьший диаметр.

Сварной шов при импульсном излучении образуется наложением сварных точек с некоторым перекрытием (0,3–0,9) в зависимости от типа сварного соединения, его прочности и герметичности. Скорость шовной импульсной сварки определяется диаметром сварной точки, приблизительно равным диаметру лазерного излучения  $d$ , коэффициентом перекрытия  $K$  и частотой следования импульсов  $f_{\text{и}}$ :

$$v_{\text{св}} = d \cdot f_{\text{и}} (1 - K). \quad (25)$$

Большое значение при импульсной сварке имеет форма импульса излучения. Лучшее качество сварки обеспечивает трапециевидная либо треугольная форма импульса с крутым передним и пологим задним фронтом.

**Повышение эффективности лазерной сварки.** Для повышения эффективности лазерной сварки (снижения требований к подготовке кромок, уменьшения опасности образования утончений, пор, подрезов, снижения капитальных и других затрат) используют различные приемы и способы, включающие [287, 293, 295]:

- импульсно-периодическую модуляцию излучения, осцилляцию сфокусированного лазерного излучения, подачу дополнительно потока газа;

- применение флюсов и присадочной проволоки;
- сочетание лазерного нагрева с плазменным, дуговым или высокочастотным (гибридные и комбинированные способы сварки).

Использование импульсно-периодических режимов лазерной сварки для увеличения глубины проплавления рассмотрено выше. Но импульсно-периодическое лазерное излучение используют и для сварки с проплавлением менее 1 мм. При этом значительно уменьшается размер ЗТВ, повышается стабильность процесса, устраняется опасность прожогов. В [293] отмечают, что сварку особо тонких сталей желательно проводить лазерным излучением в импульсно-периодическом режиме. Так, для сварки нержавеющей фольги  $\delta = 0,1$  мм рекомендуют следующий режим: защита — аксиальная подача аргона, фокусное расстояние объектива  $F = 300$  мм, диаметр фокального пятна излучения на поверхности изделия 0,6 мм, средняя мощность излучения 190–200 Вт, пиковая — 500–600 Вт, частота следования импульсов 200 Гц, скважность 2,5–3,0,  $v_{св} = 360$  м/ч.

При осцилляции сфокусированный луч периодически углубляют в сварочную ванну за счет колебания фокальной плоскости относительно свариваемого изделия [287]. Для этого используют специальные механические или пьезоэлектрические сканаторы линзы или объектива, обеспечивающие варьирование частоты в диапазоне от 0 до 150 Гц с амплитудой колебаний, равной толщине свариваемых деталей.

Осцилляция сфокусированного излучения обеспечивает при сварке большей части конструкционных материалов (сталей, алюминиевых и титановых сплавов) увеличение глубины проплавления на 40%. Ширина шва при этом возрастает примерно на 30%, а коэффициент формы шва увеличивается на 10–15%. Одновременно с этим эффектом осцилляция излучения уменьшает колебания величины глубины проплавления и улучшает формирование шва, в том числе и его внешний вид. Осцилляция обеспечивает существенное повышение термического КПД — на 60–80% по сравнению с КПД при общепринятой схеме лазерной сварки с неизменным расположением фокального пятна излучения по отношению к поверхности свариваемых деталей.

Эффективность проплавления может быть увеличена подачей непосредственно в зону сварки дополнительного потока газа под определенным давлением. Дополнительный поток оказывает влияние на параметры плазмы в области взаимодействия излучения с материалом и на гидродинамические процессы в канале проплавления.

Применяют также импульсную подачу газа. Оптимальная частота подачи газа зависит от мощности лазерного излучения, скорости сварки и свойств свариваемых материалов. При этом способе удастся повысить глубину проплавления на 30–40% и значительно его стабилизировать, что является важным фактором, в особенности при сварке с несквозным проплавлением.

Важным технологическим приемом при лазерной сварке является использование присадочного материала. Это дает возможность регулировать в широких пределах химический состав шва, обеспечивать требуемые свойства сварных соединений, исключить такие дефекты, как неравномерность проплавления, поры в корне шва, горячие и холодные трещины, а также снизить требования к точности сборки деталей для сварки [287, 294, 295].

Лазерную сварку с присадкой выполняют теми же приемами, что и дугую. Особенность заключается в использовании присадочной проволоки малого диаметра (менее 1 мм) и в точной подаче ее под лазерное излучение с помощью специальных механизмов. При этом оптимальная скорость подачи проволоки лежит в пределах 90–100 м/ч. При использовании присадки требования к точности сборки свариваемых кромок значительно снижаются: допускаются зазоры до 30–50% от толщины стенки, депланация до 50%.

При изготовлении тонкостенных стальных изделий (до 1,0 мм) с неплотно прилегающими кромками применяют технологию сварки расфокусированным лучом с подачей порошкового присадочного материала [331]. В этом случае свариваемые кромки собирают с зазором, соответствующем толщине свариваемых деталей (около 1,0 мм), и плотно прижимают к медной подкладке. По такой технологии были успешно сварены конические фильтрующие элементы размером 27×25×280 мм с толщиной стенки 0,5–0,6 мм, выполненные из стали X18H10T.

Необходимость применения флюсов при лазерной сварке вызвана тем, что при достаточно высоких скоростях сварки (400–600 м/ч) не успевает произойти полная дегазация сварочной ванны и в верхней части шва образуются поры [295]. Использование флюса при лазерной сварке с высокими скоростями оправдано при нанесении его очень тонким слоем (<0,1 мм), плотно сцепленным с образцом. При относительно толстых и неплотно сцепленных слоях мощность излучения поглощается во флюсе и не успевает передаться металлу.

Повышение эффективности процесса лазерной сварки может быть достигнуто совмещением лазерного источника нагрева с дру-

гими, менее дорогими источниками теплоты (плазменный, дуговой, высокочастотный) [296–298]. В последнее время эти способы в большинстве случаев называют гибридными.

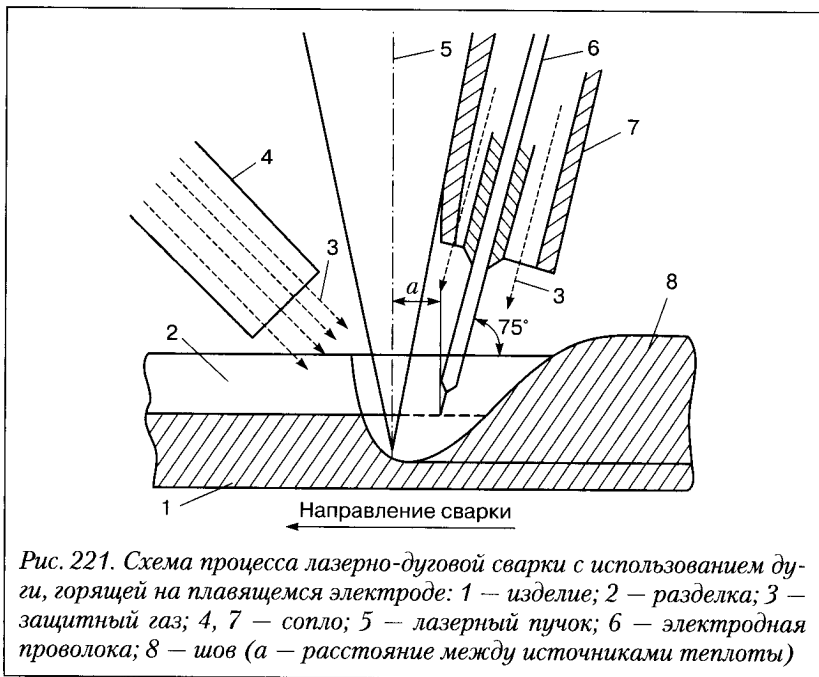
В [296] проводили исследования технологических возможностей специального интегрированного плазмотрона применительно к микроплазменной, лазерной и лазерно-микроплазменной сварке алюминиевых сплавов.

Было установлено, что при проплавлении алюминиевого сплава толщиной 3 мм микроплазменной дугой переменного тока (амплитудное значение силы тока 25 А) заметное расплавление металла отсутствует, а при увеличении амплитуды импульсов тока до 35 А глубина проплавления составила 0,7 мм, ширина шва — 4 мм, площадь проплавления — 2,0 мм<sup>2</sup>. При лазерной сварке этого же образца со скоростью 0,25 м/мин глубина проплавления составила 0,4 мм при мощности лазера 1,2 кВт.

При совместном использовании лазерного луча мощностью 1,2 кВт и микроплазменной дуги переменного тока (амплитуда силы тока 25 А) глубина проплавления образца толщиной 3 мм при скорости сварки 0,25 м/мин составила 0,8 мм, ширина шва — 2,0 мм и площадь проплавления — 1,1 мм<sup>2</sup>.

С увеличением силы тока плазмотрона до 35 А и использовании лазерного пучка мощностью 1,2 кВт было достигнуто полное проплавление образца из сплава АМгЗ толщиной 3 мм при ширине шва 4,9 мм и его площади 10,6 мм<sup>2</sup>. Таким образом, в условиях гибридной лазерно-микроплазменной сварки площадь проплавления алюминиевого сплава более чем в 4 раза превосходит сумму соответствующих площадей при лазерной и микроплазменной сварке. Это свидетельствует о существенном повышении эффективности использования энергии источников теплоты при их объединении в гибридном процессе.

При гибридной лазерной и дуговой сварке плавящимся электродом (рис. 221) используют преимущества этих двух способов [297, 298]. Показано, что излучение СО<sub>2</sub>-лазера стабилизирует электрическую дугу плавящегося электрода, горящую в СО<sub>2</sub>, «привязывает» ее к действующему на металл сфокусированному лучу и заставляет опускаться в парогазовый канал. Чем больше мощность лазерного излучения, тем сильнее проявляется этот эффект. При гибридной лазерно-дуговой сварке мощность лазерного излучения может быть частично снижена (1 кВт дуги вместо 0,5 кВт лазерного излучения) для низкоуглеродистой стали толщиной более 5 мм



[298], т. е. речь идет об использовании менее мощных (более дешевых) лазеров для сварки толстолистового металла, что в ряде случаев экономически целесообразно.

Лазерно-дуговая сварка обеспечивает более «мягкий» термический цикл, который регулируют, варьируя расстояние  $a$  между зонами действия лазерного излучения и дуги (см. рис. 221). В работе [298] показано, что при твердости основного металла HV 1490–1520 МПа лазерные швы имеют микротвердость HV 3110–3200 МПа, а гибридные — HV 2550–2690 МПа. При уменьшении твердости можно ожидать меньшей склонности швов к хрупкому разрушению.

Как показали исследования [298], применение лазерно-дуговой сварки при фиксированной мощности лазерного излучения целесообразно до определенной толщины свариваемого металла, выше которой глубина проплавления не возрастает, независимо от снижения скорости сварки. Для дальнейшей интенсивности процесса проплавления необходимо увеличивать мощность лазерного излучения. Это подтверждает сообщение о применении гибридной лазерно-дуговой сварки на верфи Meyer (Папенбург, Германия), где

используют  $\text{CO}_2$ -лазеры мощностью 12 кВт и источник питания дуговой сварки плавящимся электродом на 450 А в защитном газе для соединения листов панелей корпуса и переборок судов [299].

В промышленных масштабах лазерно-дуговую сварку фирма Volkswagen использует при изготовлении дверей автомобиля [300].

Проводятся исследования возможности использования лазера и дуговой сварки плавящимся электродом под флюсом (рис. 222) [301]. Соединить два способа — сварку лазерным лучом и сварку под флюсом — в одной сварочной ванне, как оказалось, сложно, поскольку флюс проваливается в парогазовый канал лазерного луча, при этом лазерное излучение поглощается флюсом, а не свариваемым материалом. В исследованном варианте защитный газ, необходимый для сварки лазерным лучом, поступал против направления сварки, чтобы сдуть флюс, который может попасть в зазор между

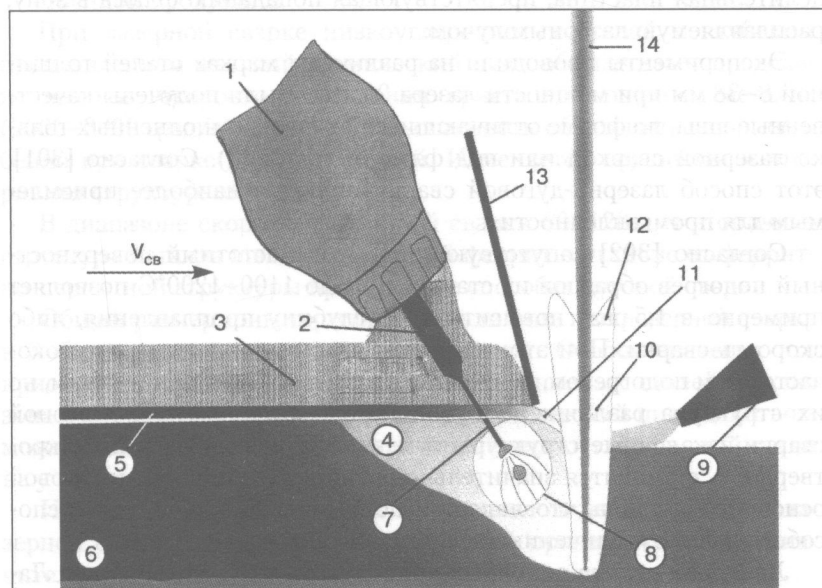


Рис. 222. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом: 1 — бункер для флюса; 2 — контактная трубка; 3 — флюс; 4 — жидкая ванна; 5 — твердый шлак; 6 — металл шва; 7 — проволочный электрод для дуговой сварки под флюсом; 8 — полость шва с дугой; 9 — струя гелия; 10 — парогазовый канал; 11 — жидкий шлак; 12 — плазма с парами металла; 13 — разделительная пластина; 14 — лазерный луч

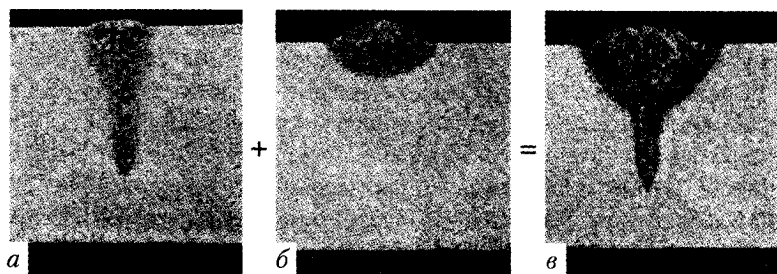


Рис. 223. Макрошлифы швов, выполненных лазерной (а), дуговой (б) и лазерно-дуговой (в) сваркой

свариваемыми листами, а за лазерным лучом устанавливалась разделительная пластина, препятствующая попаданию флюса в зону, расплавляемую лазерным лучом.

Эксперименты проводили на различных марках сталей толщиной 8–38 мм при мощности лазера 20 кВт. Были получены качественные швы, по форме отличающиеся от швов, выполненных только лазерной сваркой или под флюсом (рис. 223). Согласно [301], этот способ лазерно-дуговой сварки является наиболее приемлемым для промышленности.

Согласно [302] сопутствующий высокочастотный поверхностный подогрев образцов из стали СтЗпс до 1100–1200°С позволяет примерно в 1,5 раза повысить либо глубину проплавления, либо скорость сварки. При этом сварные швы, выполненные с высокочастотным подогревом, по форме близки к типичным лазерным, но их структура различна. Отсутствуют характерные для лазерной сварки закалочные структуры в металле швов и ЗТВ, их микротвердость становится значительно равномернее и ближе к таковой основного металла, что является положительным фактором, способствующим увеличению пластичности швов.

**Лазерная сварка основных конструкционных материалов.** Лазерным лучом возможна сварка многих конструкционных материалов (сталей, алюминиевых и титановых сплавов, пластмасс и др.).

Наиболее перспективные области применения лазерного источника нагрева для сварки сталей включают [294]:

- сварку сталей, склонных к образованию холодных и горячих трещин (с целью повышения технологической прочности соединений);

- сварку мартенситно-старееющих сталей (с целью снижения размеров зоны термического влияния и величины карбидной сетки для повышения коррозионной стойкости соединений);
- при изготовлении крупногабаритных деталей в качестве альтернативы электронному источнику нагрева;
- сварку деталей, к которым предъявляют жесткие требования по геометрии сварных соединений. В этом случае лазерная сварка может оказаться окончательной операцией, исключая последующую механическую обработку;
- сварку разнородных, трудносвариваемых сталей;
- сварку некоторых сталей в закаленном состоянии. При этом исключается необходимость предварительной и последующей обработки;
- в массовом производстве для повышения выпуска высококачественной продукции.

При лазерной сварке низкоуглеродистых сталей с глубоким проплавлением жесткий термический цикл обеспечивает предельно высокие скорости охлаждения кристаллизующегося металла (2000–3000 град/с). Повышается опасность образования пор, особенно при сварке кипящих сталей. Изменяется первичная и вторичная структура металла шва.

В диапазоне скоростей лазерной сварки 80–120 м/ч вторичная структура металла шва — игольчатый феррит в отличие от ферритно-перлитной структуры при дуговых способах дуговой сварки.

Общий размер зоны термического влияния при лазерной сварке в 3–5 раз меньше, чем при аргонодуговой. Особое значение это приобретает при сварке термически упрочняемых сталей. Малая зона термического влияния и жесткий термический цикл дают возможность предупреждать разупрочнение низкоуглеродистой стали на участке отпуса.

Изменение свойств металла шва и околошовной зоны при лазерной сварке низколегированных сталей проявляется более значительно.

Механические свойства сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполненных лазерной сваркой, достаточно высоки. При сварке стали СтЗсп толщиной 3–6 мм СО<sub>2</sub>-лазером непрерывного действия достигается прочность шва на уровне прочности основного металла, угол загиба составляет 180°, а ударная вязкость — 1,2 МДж/см<sup>2</sup> [294]. При сварке стали 17ГС толщиной 15–20 мм за один проход получена равнопроч-



ность шва основному металлу при достаточно высоких значениях ударной вязкости.

Для конструкционных средне- и высокоуглеродистых и легированных сталей характерной особенностью является образование закалочных структур в шве и зоне термического влияния, создающих опасность хрупкого разрушения. Содержание углерода более 0,3% способствует склонности стали к перегреву и закалке, образованию горячих и холодных трещин в сварном соединении и пор в металле шва.

Образованию холодных трещин при сварке рассматриваемой группы сталей способствуют следующие факторы:

- структурное состояние металла шва и зоны термического влияния;
- содержание и распределение водорода в шве и зоне термического влияния;
- уровень растягивающих сварочных напряжений первого рода.

Для лазерной сварки характерна мелкозернистая разориентированная структура с минимальной химической неоднородностью в зонах шва и термического влияния, что благоприятно сказывается на повышении стойкости сварных соединений упомянутого класса сталей против образования холодных трещин. Положительную роль в этом плане играет и пониженное в 2–2,5 раза содержание диффузионно-подвижного водорода по сравнению с содержанием его при аргонодуговой сварке. Кроме этого, как отмечалось выше, при сварке лазерными способами наиболее низок уровень остаточных напряжений.

Установлено, что стойкость сварных соединений углеродистых и легированных сталей против образования холодных трещин при лазерной сварке выше, чем при дуговой (например, стали 30ХГСА — в 3–3,5 раза [294]). Соединения сталей 12Х2Н4А и 18ХГТ, выполненные лазерной сваркой, отличаются более высокой стойкостью против образования горячих трещин и лучшими механическими свойствами по сравнению с аналогичными соединениями, выполненными дуговой сваркой.

При лазерной сварке высоколегированных мартенситно-старяющих сталей (например, 08Х15Н5Д2Т) удается в 2–3 раза повысить коррозионную стойкость сварных соединений, их стойкость против образования холодных трещин и обеспечить высокую работоспособность.

Существенные преимущества лазерной сварки перед дуговой наблюдаются при испытаниях на усталостную прочность. Установ-

лено, что соединения, выполненные лазерной сваркой, обладают большим сопротивлением воздействию динамических нагрузок по сравнению с соединениями, выполненными дугowymi способами сварки. Такое различие связано с меньшей структурной неоднородностью лазерных соединений и меньшим запасом потенциальной энергии остаточных растягивающих напряжений [294].

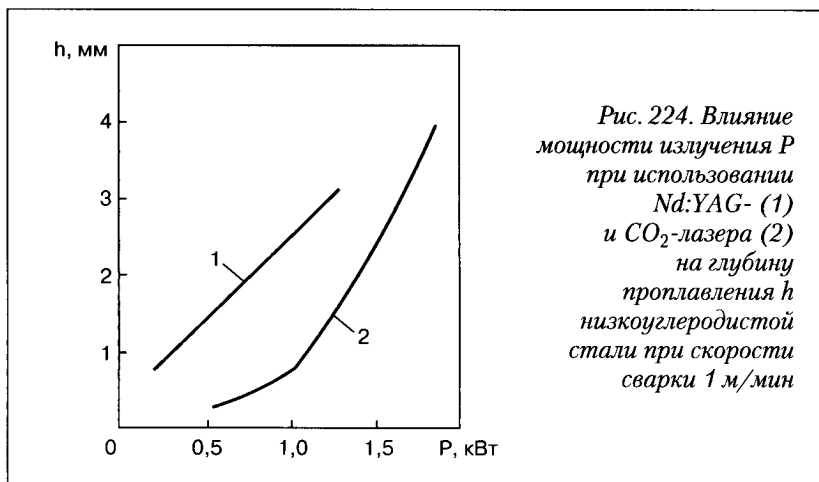
При выборе режимов лазерной сварки необходимо учитывать характерные особенности свойств конкретной марки стали. Например, большинство высоколегированных сталей имеет низкий коэффициент теплопроводности и высокий коэффициент линейного расширения, что обуславливает при одинаковой погонной энергии и прочих равных условиях расширение зоны проплавления, областей, нагретых до различных температур, и увеличение суммарной пластической деформации металла шва и околошовной зоны. Поэтому для сварки высоколегированных сталей следует применять более высокие скорости, чем для сварки низкоуглеродистых. В целом ряде случаев помимо этого следует учитывать тип соединения, условия работы детали, возможные деформации и многие другие факторы.

В *табл. 148* приведены режимы непрерывной лазерной сварки некоторых марок сталей.

Как видно из *табл. 148*, оптимальные скорости сварки рассмотренных групп сталей 80–120 м/ч. Мощность луча, необходимая для сварки 1 мм стали в этом диапазоне скоростей, 1–1,3 кВт. В то

**Таблица 148. Режимы сварки сталей различных марок**

<i>Группа сталей</i>	<i>Толщина материала, мм</i>	<i>Мощность луча, кВт</i>	<i>Скорость сварки, м/ч</i>	<i>Фокусное расстояние, мм</i>	<i>Углубление фокального пятна, мм</i>
Низкоуглеродистые, низколегированные (Ст3, 17ГС)	3,0	3,1	110	120	1,5
Среднеуглеродистые, легированные (стали 35, 30ХГА)	2,0	2,8	100	120	1,5
	3,0	3,2	100	120	1,5
	3,0	3,3	100	160	1,0
Высоколегированные, аустенитные (12Х18Н10Т)	5,0	5,0	75	150	1,0
	2,0	2,5	100	160	1,0
Высоколегированные, мартенситно-старяющие (08Х15Н5Д2Т)	3,0	3,5	80	500	1,5



же время необходимо подчеркнуть, что глубина проплавления зависит не только от мощности, но и от типа лазера. Твердотельные Nd:YAG-лазеры генерируют излучение с длиной волны 1,06 мкм, а  $\text{CO}_2$ -лазеры — 10,6 мкм. В зависимости от этих факторов абсорбция углеродистой сталью излучения  $\text{CO}_2$ -лазера составляет порядка 4% при комнатной температуре. Для той же стали абсорбция излучения Nd:YAG-лазера составляет 30%. Поэтому глубина проплавления стали при сварке Nd:YAG-лазером значительно выше, чем  $\text{CO}_2$ -лазером, в условиях одинаковой мощности (рис. 224) [303].

Как отмечалось выше, **алюминиевые сплавы** используют в сварных конструкциях различного назначения. Процесс сварки алюминиевых сплавов имеет целый ряд особенностей, которые связаны с выбором способа, режимов и сказываются на свойствах сварных соединений (см. гл. 1).

Сварка алюминиевых сплавов лазерным лучом получает все большее распространение [303]. Высокая концентрированность лазерного излучения и гибкость процесса обеспечивают высокую производительность, минимальный объем металла шва, зону термического влияния незначительной ширины и др. Кроме того, лазерный луч имеет ряд преимуществ как перед дугой, так и перед электронным лучом. По сравнению с последним не требуется вакуум, возможна транспортировка луча на большие расстояния, возможно расщепление луча с подачей его на несколько постов одновременно и выполнение сложных фигурных швов.

Специфической особенностью лазерной сварки алюминиевых сплавов является тот факт, что расплавление металла начинается только при определенном уровне плотности мощности, имеющем достаточно большую величину, т. е. необходим запас мощности, чтобы начать сварку. Для сплава АМг6, например, это величина 2–2,2 кВт, причем при этих значениях сразу достигается глубина проплавления, равная 1,5–2,0 мм [294]. При меньшей мощности проплавление вообще отсутствует. Этот эффект объясняют сочетанием высокого коэффициента отражения алюминия (0,97) на длине волны 10,6 мкм (СО<sub>2</sub>-лазер) с высокой теплопроводностью и теплоемкостью алюминия. После начала плавления коэффициент отражения резко снижается, происходит интенсивное проплавление материала и образование парогазового канала. С момента образования канала уже существует зависимость глубины проплавления от мощности луча. Указанный порог мощности зависит от типа лазера, степени фокусировки, толщины металла, состояния его поверхности и скорости сварки.

Решение проблемы преодоления отражающей способности алюминиевой поверхности ведется в нескольких направлениях [303]. Чаще всего используют светопоглощающие покрытия, которые одновременно с увеличением поглощения мощности излучения не должны заметно влиять на качество соединения. Наилучшей поглощающей способностью обладают фосфатные пленки (фосфаты цинка и марганца), хорошо себя зарекомендовали и смеси оксидов.

Инициирования поверхности металла достигают зачисткой ее шлифовальной шкуркой различной зернистости или металлической щеткой. В принципе, чем грубее поверхность, тем выше ее поглощающая способность. Однако такая подготовка поверхности приводит к большому количеству дефектов в шве. После образования жидкой ванны эффект от ее воздействия утрачивается.

При сварке образцов, покрытых неметаллическими материалами, с большой скоростью поглощающая способность поверхности возрастает с 20 до 100%, а с увеличением мощности (при определенном ее значении) образуется скважина проплавления и уровень поглощения излучения возрастает за счет внутреннего отражения луча.

Наложение воздействия дополнительных температурных источников (электрическая дуга, плазменная дуга) — еще один способ увеличения уровня поглощения излучения и глубины проплавления.

При сварке алюминиевых сплавов благодаря интенсивному выделению паров образуется факел плазмы, существующий в нескольких состояниях. Способы борьбы с плазменным факелом те

же, что и при сварке сталей, и они рассмотрены выше. В дополнение следует отметить, что одним из эффективных способов подавления факела плазмы может быть использование элементов, препятствующих ионизации, которые, попадая в область действия луча, снижают экранирующее действие факела плазмы. Применительно к алюминиевым сплавам этот способ добавления такого рода компонентов в состав покрытия представляет интерес, поскольку такие элементы, как калий, натрий (с низким потенциалом ионизации) либо фтор, хлор (деионизаторы) входят в состав флюсов для сварки алюминия дугowymi способами [303].

Возможно также применение вакуумирования. С одной стороны, это лишает лазерный луч преимуществ перед электронным, а с другой, даже небольшая степень вакуумирования позволяет увеличить проплавление в 3–5 раз [304]. Кроме того, специфика лазерного луча позволяет передать его через прозрачное ограждение, что может быть использовано при изготовлении специальных изделий.

Оптимальные режимы сварки алюминиевого сплава АМг6 излучением CO<sub>2</sub>-лазера представлены в *табл. 149* [294].

Пористость сварных соединений сплава АМг6 при оптимальной подготовке поверхности на всех режимах лазерной сварки находится в пределах допустимых значений [294]. Однако в этих пределах существует зависимость значений пористости от скорости сварки и толщины свариваемого материала. Минимального значения пористости достигают в диапазоне скоростей от 75 до 100 м/ч, а с увеличением толщины свариваемого металла количество пор возрастает.

<b>Таблица 149. Режимы сварки алюминиевого сплава АМг6</b>				
<i>Материал</i>	<i>Толщина, мм</i>	<i>Мощность излучения, кВт</i>	<i>Скорость сварки, м/ч</i>	<i>Фокусное расстояние, мм</i>
АМг6	2,0	2,1	90	120
	2,0	2,3	120	120
	3,0	2,3	90	140
	3,0	2,8	120	140
	4,0	2,8	90	140
	4,0	3,1	120	140
АМг61	2,0	2,3	100	120
	4,0	2,8	90	120
АМг6НП	4,0	3,1	120	120

**Таблица 150. Режимы сварки алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием**

Сплав	Толщина листа, мм	Скорость сварки, м/мин	Мощность излучения, кВт
1424	1,5	0,8	1,3
		2,5	2,0
		5,2	2,7
		8,2	3,8
1523	2,0	1,3	2,7
		2,5	3,0
		4,5	4,1

Предел прочности сварных соединений сплава АМгб толщиной 2,0 и 3,0 мм не менее 0,9 от прочности основного металла при сварке без присадочной проволоки. Разрушение соединений происходит преимущественно по шву.

Механическая прочность сварных соединений ниже, чем прочность основного металла, из-за испарения магния, потери которого достигают при этом 1,0–1,5% (при дуговых способах сварки потери магния достигают 3–6%).

Таким образом, установлено, что при скорости лазерной сварки 1–2 м/мин можно получить достаточно высокие механические свойства и оптимальное качество сварных соединений традиционных алюминиевых сплавов.

В [305] исследовали влияние скорости лазерной сварки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием (1424, 1523). Режимы лазерной сварки приведены в табл. 150.

Установлено, что увеличение скорости лазерной сварки алюминиевых сплавов 1523 и 1424 неоднозначно влияет на механические свойства соединений. Повышение скорости сварки сплава 1523 до 8,2 м/мин приводит к повышению предела прочности, предела текучести и ударной вязкости. Наилучшего сочетания свойств сплава 1424 достигают при скорости сварки 2,5 м/мин.

Максимальные значения предела прочности сварных соединений исследованных сплавов составляют 0,80–0,92 предела прочности основного материала. Особенностью полученных механических свойств является более высокий предел текучести сварного соединения, который по сравнению с пределом текучести основного материала на 14–22% больше.

**Таблица 151. Механические свойства сварных соединений титановых сплавов, выполненных различными способами сварки**

Способ сварки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>			
			шов	ЗТВ	шов	ЗТВ
АрДС	760	280	95	63	31	34
ЭЛС	780	300	89	71	26	26
ЛС	800	400	98	84	27	27
Основной металл	800	550	70	—	26	—

На механические свойства благоприятно влияют специфическая макронеоднородность структуры сварного шва — уменьшение размеров дендритов в центре шва вследствие выделения дисперсидов скандия и циркония — и дендритная столбчато-ячеистая структура с пересыщенным твердым раствором в зоне сплавления [305]. На исследованных материалах в широком диапазоне режимов лазерной сварки не обнаружены дефекты в виде разупрочнения зоны термического влияния, расслоений и пористости.

Как уже отмечалось в гл. 1, благодаря сочетанию особых физико-механических свойств (малая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость) **титан и его сплавы** являются перспективными материалами для различных отраслей промышленности. Как видно из *табл. 151*, механические свойства сварных соединений титановых сплавов, выполненных лазерной сваркой, находятся на уровне свойств основного металла [294]. Эти данные показывают также, что прочность соединений, выполненных лазерной сваркой, не ниже, чем у выполненных электронно-лучевой сваркой, и выше прочности соединений, выполненных аргонодуговой сваркой.

При испытаниях на переменный изгиб установлено, что циклическая прочность соединений, выполненных лазерной сваркой, в среднем на 25–30% выше, чем прочность соединений, выполненных аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой.













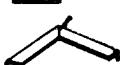


В последние годы все большее распространение получает лазерная сварка **пластмасс** (полиэтилен, поливинилхлорид, полиметилметакрилат, поликарбонат, полиамиды, полиуретан) толщиной 0,01–4,0 мм. Для этих целей применяют диодные, CO<sub>2</sub>- и Nd:YAG-лазеры [306].

**Промышленное применение лазерной сварки.** Активизации внедрения лазерной сварки, наплавки, упрочнения и резки в определяющей степени способствовало создание в 80-х годах прошлого

века мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров, отличающихся повышенной надежностью. Одним из основных потребителей  $\text{CO}_2$ -лазеров в эти годы стала **автомобильная промышленность**. Значительная доля сваренных в табл. 152 изделий массового производства относится к этой отрасли [304].

<b>Таблица 152. Примеры применения <math>\text{CO}_2</math>-лазеров в сварочном производстве</b>			
<i>Наименование изделия</i>	<i>Общий вид</i>	<i>Материал</i>	<i>Режим сварки</i>
Блок шестерен		Цементируемая сталь	1 кВт; 3 м/мин
Шестерня			2 кВт; 1 м/мин
Деталь автомобиля		Хромоникелевая сталь	4,4 кВт; 1 м/мин
Корпус		Углеродистая сталь	1,2 кВт; 2 м/мин
Топливный бак		Различные стали	2 кВт; 2,8 м/мин
Глушитель		Хромистая сталь	4,4 кВт; 1,8 м/мин
Деталь автомобиля		Различные стали	2 кВт; 1,5 м/мин
Датчик		Хромоникелевая сталь	0,8 кВт; 2 м/мин
Деталь автомобиля		Углеродистая сталь	1 кВт; 1 м/мин
Статор		Электротехническая сталь	1 кВт; 1 м/мин
Ротор		Хромоникелевая сталь	0,9 кВт; 2 м/мин
Разъем		Различные стали	0,9 кВт; 1 м/мин
Рама велосипеда			2 кВт; 1,5 м/мин
Корпус		Хромоникелевая сталь	2 кВт; 1,5 м/мин
		Титановый сплав	4 кВт; 1,5 м/мин



Наименование изделия	Общий вид	Материал	Режим сварки
Сегментная пила		Легированная сталь + порошковый материал	1 кВт; 1 м/мин
Корпус		Стеллит	1,3 кВт; 5 м/мин
Сосуд		Хромоникелевая сталь	2 кВт; 2 м/мин
Канистра		Различные стали	1,8 кВт; 15 м/мин
Корпус		Хромоникелевая сталь	1 кВт; 1 м/мин
Барaban		Различные стали	1,5 кВт; 15 м/мин
Биметалл		Сталь + медь	0,8 кВт; 0,5 м/мин
Фильтр		Хромоникелевая сталь	2 кВт; 1,5 м/мин
Деталь автомобиля			0,4 кВт; 1 м/мин
Биметаллическая пила		Стали (обычная + инструментальная)	2 кВт; 4 м/мин
Выключатель		Хромоникелевая сталь	0,5 кВт; 3 м/мин
Камера			2 кВт; 3 м/мин
Корпус		Различные стали	1 кВт; 0,7 м/мин
Нахлесточное точечное соединение			0,2 кВт; 1,5 м/мин
Радиатор			0,5 кВт; 2,5 м/мин

Лазерную сварку давно и успешно применяют автомобильные фирмы «Форд», «Мерседес», «Крайслер», ФИАТ, «Фольксваген», «Ауди», «Рено» и др.

Лидерство автомобильной промышленности продолжается и в настоящее время. При этом много внимания уделяют совершенст-

вованию технологии сварки оцинкованной стали [307] и алюминиевых конструкций [308].

Лазерную сварку оцинкованных стальных листов в конструкциях с соединением внахлестку широко используют при производстве кузовов легковых автомобилей. При сварке с нулевым зазором, как правило, дегазация испарившегося цинка между листами невозможна. Следовательно, он испаряется через парогазовый канал, при этом нарушается баланс давления и гидродинамических процессов, происходящих в сварочной ванне, и, как следствие, в сварном шве появляются поры, перехваты и вмятины.

Указанные выше дефекты устраняют путем обеспечения контролируемой величины зазора, применения модуляции лазерного луча и его наклона углом вперед (до  $35^\circ$ ) в процессе сварки [307, 309, 310].

Технология лазерной сварки открыла новые возможности в производстве комбинированных составных листовых заготовок элементов легковых автомобилей из стали и алюминиевых сплавов для последующей штамповки с глубокой вытяжкой. Такие тонколистовые сварные составные заготовки заданных размеров и конфигурации в мировой практике автомобилестроения получили название «Tailored Blanks» [29]. В таких заготовках комбинируют толщины и марки конструкционных материалов в зависимости от нагрузки и условий эксплуатации конкретных элементов или деталей, из которых состоит кузов легкового автомобиля.

Основные преимущества заготовок:

- снижение массы элементов и общего расхода материалов;
- сокращение количества отдельных деталей, различных конструктивных накладок и усиливающих элементов;
- повышение точности геометрии конструктивных и сборочных элементов, оптимизация допусков;
- стабилизация качества и повышение надежности конструкции за счет обеспечения равнопрочности элементов при статической и ударных нагрузках, а также увеличения их усталостной прочности;
- замена нахлесточных (точечных и прерывистых) сварных соединений стыковыми, обеспечивающая сокращение объема работ по герметизации соединений;
- существенное повышение коррозионной стойкости кузова и его отдельных частей.

На *рис. 225* приведены объемы применения составных сварных заготовок различными автомобильными фирмами Западной Европы.

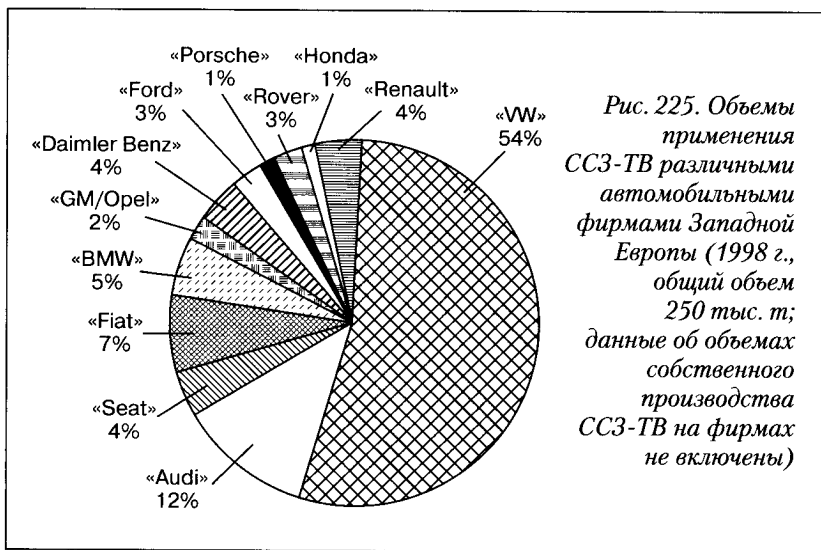


Рис. 225. Объемы применения ССЗ-ТВ различными автомобильными фирмами Западной Европы (1998 г., общий объем 250 тыс. т; данные об объемах собственного производства ССЗ-ТВ на фирмах не включены)

С каждым годом объемы их применения увеличиваются не только в странах Западной Европы, но и в США, Японии и других странах.

В западных странах основным поставщиком сварных составных заготовок является **металлургическая промышленность**. В этой отрасли используют лазерную сварку для осуществления непрерывной горячей и холодной прокатки. Фирма Nippon Steel (Япония) разработала технологию сварки горячекатаной стали, при которой используют два лазера мощностью 45 кВт [311]. Лазерное излучение передают к зоне сварки с расстояния 50 м. При сварке нагретых до 1000°C пластин глубина проплавления шва увеличивается на 30%.

Большой интерес к лазерной сварке проявляют специалисты **судостроительной промышленности** [312, 313]. Применение лазерной сварки в судостроении взамен дуговой позволяет повысить производительность, радикально уменьшить деформации за счет более низкого тепловложения, стабилизировать качество соединений, разрабатывать новые технологии и применять современные конструкторские решения при проектировании элементов судов.

Лазерную сварку применяют в серийном производстве пассажирских вагонов из высококачественной листовой стали [314, 315]. Важным преимуществом этой технологии является существенное сокращение рихтовки наружной (видимой) поверхности стенок вагонов.

В ИПЛИТ РАН (Россия) освоена технология лазерной сварки шестерен коробки передач автомобилей, нержавеющей труб, гидротолкателей топливной аппаратуры, карданных валов, корпусов аэрозольных баллончиков, корпусов топливных фильтров, консервных банок [316]. Ведутся работы по применению лазерной сварки газо- и нефтепроводных труб, деталей из алюминиевых сплавов для авиационной промышленности, корпусных деталей из титановых и высокопрочных сталей для оборонной промышленности.

В Институте сварки (Польша) разработаны технологии лазерной сварки гидравлических губок деревообрабатывающих инструментов, деталей системы измерения расхода летучих газов и чистых жидкостей в трубах, деталей траверсы сидения автомобиля и телескопического устройства передней подвески, деталей амортизатора автомобиля и др. [317].

По мнению авторов [318] в Украине перспективным является использование лазерной сварки в авиакосмической и судостроительной промышленности для изготовления стрингерных и многослойных панелей.

Несмотря на ряд существенных достоинств, о которых говорилось выше, лазерная сварка по-прежнему остается одной из экзотических технологий. Основной причиной этого является высокая стоимость лазеров. Согласно [319] капитальные затраты на лазерную установку составляют около 0,1 млн евро на 1 кВт выходной мощности. Кроме того, на уровень текущих затрат при лазерной сварке влияют много факторов, таких как объем производства, длина и тип шва, пространственное положение сварки, вид материала и др. Поэтому анализ и сравнение стоимости лазерной сварки может быть проведен на примере конкретных элементов и производственных условий.

В [320] подчеркивают, что удельные затраты при лазерной сварке зависят от инвестиционных и операционных затрат, а также объема производства: чем он больше, тем меньше удельные затраты, поскольку амортизационные затраты распределяются на большее количество изделий. В настоящее время существует много областей, где лазерная сварка, несмотря на большое вложение капитала, может дать существенный экономический эффект. Это открывает перспективу для больших и богатых фирм, владеющих значительными производственными мощностями с полной загрузкой лазерного оборудования в три смены. Для малых и средних предприятий, имеющих проблемы с обеспечением достаточного количества

заказов для работы в одну смену, приобретение лазерного оборудования может оказаться затруднительным. Однако зачастую именно эти фирмы производят изделия на наивысшем техническом уровне, поскольку качество и точность являются основополагающим условием существования их производства. В мировой практике для таких предприятий создаются специализированные лазерные центры и лаборатории с развитой научно-технической базой, цель которых — с помощью соответствующих услуг ускорить внедрение в производство современных технологий лазерной сварки.

Следует также отметить, что простая замена существующих технологий лазерными не гарантирует достаточной эффективности. Необходим комплексный подход к конструктивным решениям изделий с точки зрения реализации сварки, а также доведение остальных технологических процессов до уровня лазерной сварки. Необходимо произвести также организационные изменения, которые позволили бы в полной мере использовать преимущества лазерной сварки.

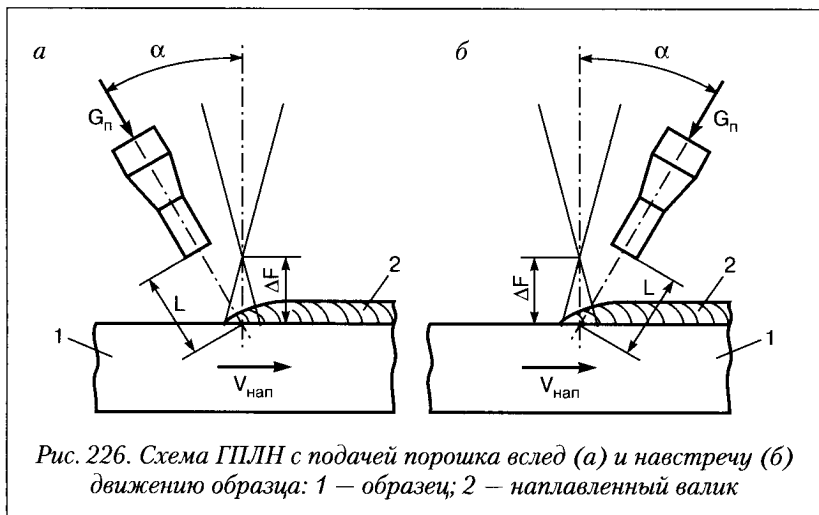
## 4.2. Лазерная наплавка, оплавление и напыление покрытий

**Лазерная наплавка.** Лазерная наплавка заключается в получении поверхностных покрытий путем подачи присадочного материала непосредственно в зону излучения.

В качестве присадочных материалов используют проволоку и порошки. Наибольшее распространение получила газопорошковая наплавка, при которой порошок подают газовым потоком непосредственно в зону излучения (рис. 226) [287]. Менее распространена лазерная наплавка с подачей присадочной проволоки и с предварительной засыпкой перед лазерным лучом слоя порошка определенной высоты [321].

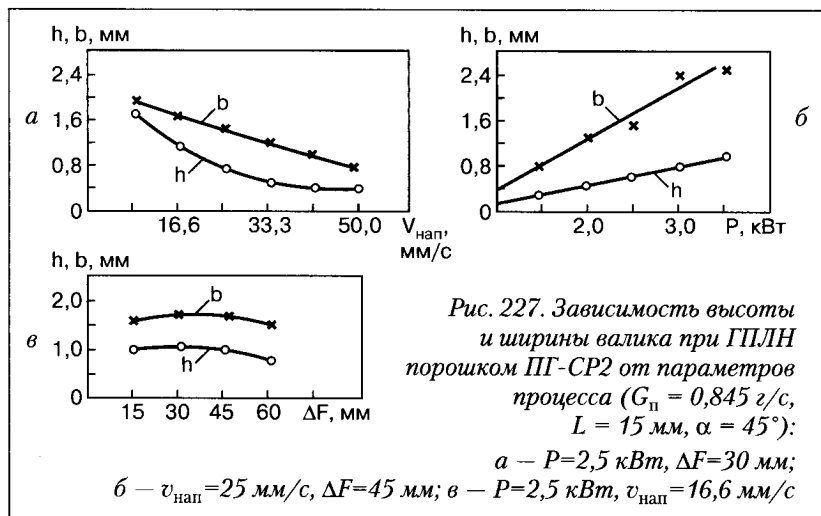
Лазерную газопорошковую наплавку выполняют при мощности лазерного излучения  $P$ ; скорости наплавки  $v_{\text{нап}}$ ; диаметре пятна нагрева лазерного излучения, определяемым условием фокусировки излучения,  $d_{\text{п}}$ ; массовом расходе подаваемого в зону обработки порошка  $G_{\text{п}}$ ; расстоянии, с которого вводится порошок,  $L$ ; угле ввода порошка  $\alpha$ .

Увеличение  $P$  с 1,5 до 3,5 кВт приводит к увеличению количества расплавленного порошка, вследствие чего также увеличиваются



ширина  $b$  и высота  $h$  наплавленных валиков (рис. 227, б) [287]. Коэффициент перемешивания основного и присадочного материала  $\gamma$  увеличивается с 0,02 до 0,11 в связи с незначительным увеличением глубины проплавления.

Рост скорости наплавки с 8,3 до 50 мм/с приводит к существенному уменьшению размеров наплавленных валиков. Ширина вали-



ков уменьшается приблизительно в 2 раза, а высота — почти в 4 раза (рис. 227, а).

Влияние степени расфокусировки на геометрические размеры наплавленных валиков в [287] достигалось за счет изменения расстояния  $\Delta F$  (см. рис. 227). Установлено, что с увеличением степени расфокусировки при постоянной мощности луча уменьшается плотность мощности излучения, что приводит к снижению количества расплавленного порошка и уменьшению высоты наплавленного валика (рис. 227, в). Ширина же валика первоначально возрастает за счет увеличения размеров фокального пятна излучения. Дальнейшее увеличение степени расфокусировки приводит к уменьшению ширины валика, хотя размер пятна излучения растет. Коэффициент перемешивания при увеличении степени расфокусировки в большинстве случаев уменьшается.

Согласно [287] увеличение массового расхода порошка при постоянных режимах лазерной наплавки приводит к некоторому росту высоты и ширины наплавленных валиков. Коэффициент перемешивания уменьшается при этом с 0,14 до 0,06.

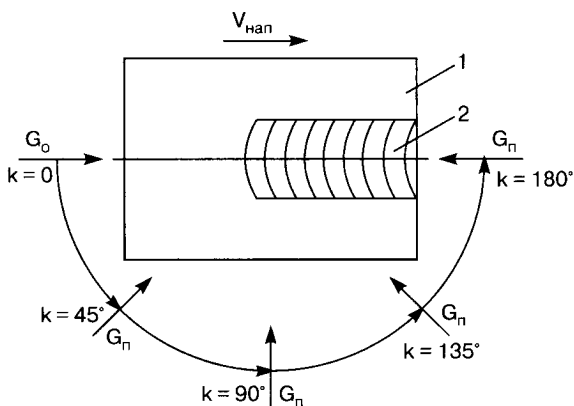
Уменьшение расстояния от среза сопла до зоны наплавки (дистанция нанесения  $L$ ) с 5 до 35 мм приводит к увеличению площади сечения струи порошка в месте наплавки с одновременным снижением плотности частиц. Вследствие этого ширина наплавленных валиков несколько увеличивается, тогда как высота их уменьшается. При этом  $\gamma$  растет с 0,07 до 0,65.

С увеличением угла ввода порошка  $\alpha$  до  $45^\circ$  высота валика растет за счет динамического давления газопорошковой струи на жидкую ванну. При дальнейшем увеличении  $\alpha$  сильно уменьшается количество порошка, попадающего в ванну, а также высота валиков. Ширина валиков при увеличении  $\alpha$  несколько уменьшается, а  $\gamma$  увеличивается с 0,05 до 0,47.

Заметно влияет на формирование валиков при газопорошковой наплавке направление подачи порошка относительно движения образца. В [287] изучали различные варианты подачи порошка: за движущимся образцом ( $x = 0$ ), навстречу ему ( $x = 180^\circ$ ) и под углом к движению ( $0 < x < 180^\circ$ ) (рис. 228).

Формирование валика при подаче порошка за движущимся образцом отличается стабильностью, колебания высоты и ширины валика незначительны и достигают 10–15%. При подаче порошка навстречу движущемуся образцу газопорошковая струя оттесняет жидкий металл от закристаллизовавшейся части, вследствие чего

Рис. 228.  
Варианты  
подачи  
порошка:  
1 — образец;  
2 — наплав-  
ленный валик



он больше растекается по поверхности, увеличивая площадь ванны плавления. При этом растет количество порошка, попадающего в расплав, и несколько увеличиваются размеры валиков по сравнению с размерами валиков при подаче порошка за движущимся образцом.

Принципиально характер формирования наплавленных валиков при изменении режима наплавки тот же, что и при  $x = 0^\circ$ . Однако геометрические размеры наплавленных валиков по длине при  $x = 180^\circ$  отличаются нестабильностью. Разброс высоты и ширины валиков по длине достигает 50–60%.

При увеличении  $x$  с 0 до  $90^\circ$  газопорошковая струя вытесняет металл в сторону, противоположную направлению подачи, что приводит к нарушению формы валиков. Особенно значительное нарушение формы валика наблюдается при изменении  $x$  с  $45$  до  $135^\circ$ .

Расход порошка определяют коэффициентом использования порошка, т. е. отношением массы наплавленного металла к массе израсходованного в процессе наплавки порошка. При увеличении мощности излучения и расхода порошка растет коэффициент использования порошка КИП, а при увеличении дистанции  $L$  этот коэффициент уменьшается. Угол подачи порошка, равный  $40\text{--}50^\circ$ , является оптимальным для увеличения коэффициента использования порошка.

В [322] предложена физико-математическая модель процесса лазерной газопорошковой наплавки, созданная на основе решения системы дифференциальных уравнений теплопереноса и равновесия давлений на поверхность расплава и представленная в ви-



де компьютерной программы, позволяющей оценивать показатели качества при заданных условиях.

Разработанная методика позволяет определять режим наплавки, оценивать стабильность процесса, вероятность бездефектного формирования валика и обоснованно выбирать допуски на параметры.

В [287] рекомендуют наплавку никельхромборкремниевых сплавов выполнять на следующих режимах:  $P = 1-3$  кВт,  $v_{\text{нап}} = 16,7-33,3$  мм/с,  $\Delta F = 30-45$  мм (при фокусном расстоянии 400 мм),  $G_{\text{п}} = 0,6-0,9$  г/с,  $L = 15-20$  мм,  $\alpha = 30-35^\circ$ . Геометрические размеры наплавленных валиков на этих режимах следующие:  $h = 0,5-2,0$  мм,  $b = 1,2-2,6$  мм, коэффициент использования порошка изменяется с 0,4 до 0,7, а  $\gamma \leq 0,15$ .

При лазерной наплавке порошок подают с помощью таких газов, как воздух, азот, гелий, аргон, углекислый газ. При использовании самофлюсующихся порошков тип газа не оказывает существенного влияния на формирование покрытия. Если используют несамофлюсующиеся порошки, то для защиты от окисления порошков и расплавленного металла следует применять инертные газы. Рекомендуют оптимальные размеры частиц порошка 40–160 мкм. Более крупные частицы застревают в питающем устройстве, а частицы мелких размеров образуют комки, это приводит к неравномерной подаче.

При прецизионной лазерной наплавке для стабильного формирования валика необходимо разделять порошок на фракции, в пределах которых разброс диаметров частиц составляет 50 мкм [323]. В этих условиях равномерность формы валика зависит от концентрации порошка в струе транспортирующего газа. При попадании его в зону наплавки в виде распыленной струи получается равномерный по высоте и ширине валик. В наибольшей степени это удается обеспечить при коаксиальной подаче порошка относительно лазерного луча. Близкие результаты получают и при малом расходе порошка и боковой подаче, но все же разброс высоты по длине наплавленного валика в этом случае в два раза больше, чем при коаксиальной подаче.

Управлять формой валика можно и за счет сканирования лазерного луча. В [324] проводились исследования влияния сканирования сфокусированного лазерного луча на технологические особенности процесса наплавки. Диаметр луча в фокусе составлял  $\sim 1$  мм. Сканирование осуществлялось по синусоидальному закону с частотой 50 Гц в направлении, перпендикулярном к вектору скорости

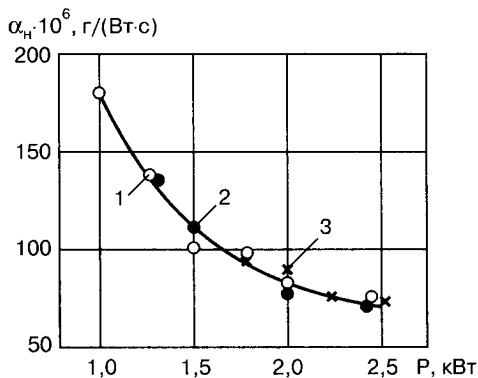


Рис. 229. Зависимость коэффициента наплавки  $\alpha_n$  от мощности  $P$  лазерного излучения;  
 1 —  $v_{\text{нап}} = 1$  мм/с;  
 2 —  $v_{\text{нап}} = 2$  мм/с;  
 3 —  $v_{\text{нап}} = 3$  мм/с

наплавки. Амплитуда сканирования составляла  $\sim 10$  мм, а расход порошка — 0,25 г/с.

В опытах варьировали мощность  $P$  лазерного излучения в диапазоне 1–2,5 кВт и скорость наплавки в пределах 1–7 мм/с. Установлено, что с увеличением мощности излучения коэффициент наплавки  $\alpha_n$  монотонно уменьшается и слабо зависит от скорости наплавки во всем исследованном диапазоне (рис. 229). Удовлетворительное формирование валика при заданной скорости наплавки начинается с некоторой пороговой мощности  $P_{\text{кр}}$ , которая увеличивается с повышением скорости наплавки. Так, для  $v_{\text{нап}} = 1, 2$  и 3 мм/с пороговая мощность равна соответственно 1, 1,25 и 1,75 кВт.

Коэффициент использования порошка в исследуемом диапазоне параметров режима наплавки остается практически постоянным и равен 0,65–0,75. Высота валика определяется прежде всего скоростью наплавки и слабо зависит от мощности излучения (рис. 230).

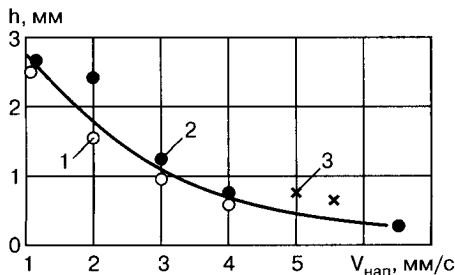


Рис. 230. Зависимость высоты  $h$  наплавленного валика от скорости наплавки  $v_{\text{нап}}$ :  
 1 —  $P = 1$  кВт;  
 2 —  $P = 1,25$  кВт;  
 3 —  $P = 1,75$  кВт

Ширина валика практически не изменяется во всем исследованном диапазоне параметров режима наплавки и определяется амплитудой сканирования луча.

При лазерной наплавке сканирующим лучом проплавление материала подложки и его перемешивание с наплавленным металлом практически отсутствует, а формирование кристаллитов происходит преимущественно в направлении, перпендикулярном к поверхности подложки.

В последние годы в мире усилился интерес к технологиям формирования трехмерных объектов не за счет удаления материала, а за счет постепенного наращивания или добавления его при изменении фазового состояния вещества в заданной области пространства [290]. Наиболее подходящей для этих целей является лазерная наплавка, которая позволяет послойно формировать трехмерные объекты по компьютерным образам. Лазерной наплавкой можно как изготавливать новые детали, так и формировать на поверхности изделия объемные элементы, например, при ремонте. Эти технологии применимы для широкого круга материалов, включая коррозионностойкую сталь, цветные металлы и сплавы, алюминиевые и титановые сплавы, а также керамику, полимеры и композиты. Кроме того, можно локально изменять состав материала, микроструктуру и текстуру поверхности. Благодаря широкому выбору присадок возможно получение деталей с высокими механическими и служебными характеристиками.

При объемном формообразовании деталь разбивают на тонкие слои. Подложку перемещают относительно лазерного луча по программируемой траектории. Одновременно в зону наплавки подают порошок. При переплаве присадочного материала получают наплавленный слой. Далее слой за слоем формируют деталь.

Объемное формообразование детали возможно при условии минимального проплавления основы и перемешивания основного и присадочного металлов, а также принятия соответствующих мер, исключающих образование трещин в наплавленном металле и ЗТВ.

При использовании непрерывного лазерного излучения эти условия можно выполнить за счет снижения производительности (скорость нанесения наплавленного валика примерно  $65,5 \text{ см}^3/\text{ч}$ , ширина наносимого слоя — 1 мм, толщина 25 мкм).

В [325] хорошее качество наплавленных непрерывным излучением слоев на образцы из стали 45 и жаропрочного сплава ЖС6К порошков различных материалов (самофлюсующегося сплава ПГ-

СР4, смеси ПС-12НВК, лигатуры ХТН и карбида бора В4С, плакированного никелем) обеспечивается в определенном режиме лазерного процесса. Это: мощность излучения — 0,9–3 кВт; размер пятна фокусирования — 1–5 мкм; скорость наплавки — 0,1–0,6 м/мин; расход присадочного порошка — 0,1–0,5 г/с. При этом при подаче порошка вслед лучу затраты энергии меньше на 25–30%, а количество использованного порошка — на 10–15%, чем при подаче порошка навстречу лучу.

Еще одной особенностью предложенной технологии [325] является распределение мощности излучения в пятне фокусирования со смещенным максимумом интенсивности в направлении движения лазерного пучка. Это приводит к значительному снижению остаточных напряжений в наплавленном слое и уменьшает склонность наплавленного металла к образованию трещин.

Улучшение качества наплавленных слоев наблюдается при использовании лазерного импульсно-периодического излучения [323]. В этой работе энергию импульса  $W$  варьировали с 6,25 до 9,8 Дж, частоту следования импульсов  $f$  — с 2 до 10 Гц, скорость наплавки  $V$  — с 0,5 до 2,5 мм/с, расфокусировку  $\Delta F$  — с 0 до 2 мм, расход порошка в зависимости от толщины переплавляемого слоя  $h$  — с 0,2 до 0,5 мм.

Установлено, что с увеличением частоты следования импульсов высота валика увеличивается, а ширина валика и глубина проплавления подложки уменьшаются (рис. 231, а), возрастание энергии в импульсе приводит к увеличению высоты, ширины валика и глубины проплавления подложки (рис. 231, б). С увеличением скорости высота и ширина валика, а также глубина проплавления подложки уменьшаются (рис. 231, в). Повышение расхода порошка (высоты его слоя) вызывает увеличение высоты и ширины валика и уменьшение глубины проплавления подложки (рис. 231, г). Влияние расфокусировки зависит от толщины насыпанного слоя порошка. При толщине, равной 0,5 мм, высота, ширина валика и глубина проплавления подложки уменьшаются с увеличением расфокусировки (рис. 231, д). При толщине менее 0,2 мм наблюдается некоторое увеличение высоты и ширины валика (рис. 231, е).

На оптимальных режимах лазерной наплавки валики имели одинаковую длину и малую глубину проплавления основ. Поверхность валика имела «чешуйчатое» строение. Расстояние между чешуйками пропорционально частоте импульсно-периодического излучения. Колебание высоты по длине валика в пределах 0,1 мм.

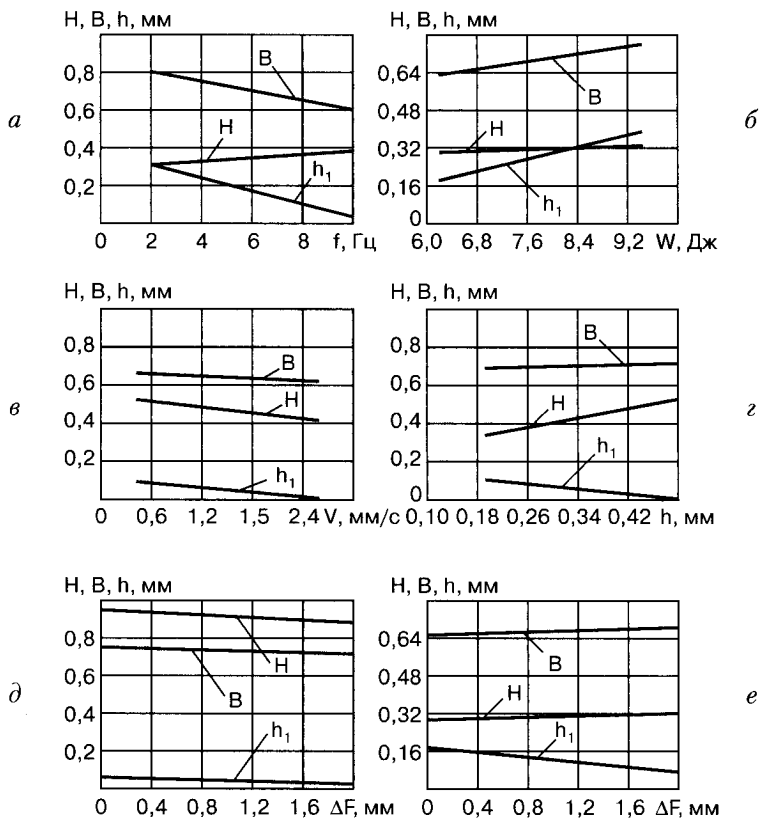


Рис. 231. Зависимость размеров валиков, наплавленных импульсно-периодическим лазерным излучением, от режимов наплавки ( $B$  — ширина,  $H$  — высота,  $h$  — глубина проплавления): а —  $f=2-10$  Гц,  $h=0,2$  мм,  $W=9,8$  Дж,  $v=2,5$  мм/с,  $\Delta F=2$  мм; б —  $W=6,25-9,8$  Дж,  $f=2$  Гц,  $h=0,2$  мм,  $v=2,5$  мм/с,  $\Delta F=0$ ; в —  $v=0,5-2,5$  мм/с,  $f=10$  Гц,  $h=0,2$  мм,  $W=6,25$  Дж,  $\Delta F=0$ ; з —  $h=0,2-0,5$  мм,  $f=2$  Гц,  $W=6,25$  Дж,  $v=2,5$  мм/с,  $\Delta F=2$  мм; д —  $\Delta F=0-2$  мм,  $f=10$  Гц,  $h=0,5$  мм,  $W=6,25$  Дж,  $v=0,5$  мм/с; е —  $f=2$  Гц,  $h=0,2$  мм,  $W=6,25$  Дж,  $v=2,5$  мм/с

Практика показывает, что наиболее перспективно выполнение лазерной наплавки с использованием в качестве присадочных материалов смесей различных порошков, в первую очередь порошков самофлюсующихся сплавов на основе никеля (колманой) и на

основе кобальта (стеллиты). Для получения покрытий со специальными свойствами при лазерной наплавке используют порошки самофлюсующихся сплавов с добавлениями в них карбидов вольфрама, титана, бора, а также феррованадия, ферротитана и других составляющих [287, 326].

С металлургической точки зрения особенностью лазерной наплавки является возможность регулирования времени существования жидкой фазы, в том числе и в минимальных пределах, и обеспечения высоких скоростей охлаждения кристаллизующегося металла наплавки. Вследствие этого микроструктура покрытий, полученных лазерной наплавкой, отличается от микроструктуры при наплавке этих же порошков другими способами.

Преимущества лазерной наплавки [287, 326, 327]:

- возможность получения наплавляемых слоев с заданными свойствами высотой 0,1–0,3 мм;
  - значительное ослабление эффекта перераспределения компонентов из материала основы в наплавленный слой, что способствует повышению точности прогнозирования результатов и максимальному приближению свойств наплавленного слоя к свойствам наплавляемого материала;
  - получение равноосных мелкокристаллических (высокодисперсных) структур наплавленного металла и ЗТВ малой (до 0,1–0,5 мм) протяженности;
  - минимальный припуск для финишной механической обработки.
- К недостаткам лазерной наплавки следует отнести:
- повышенную опасность образования поперечных холодных микротрещин вследствие релаксации высоких внутренних напряжений растяжения;
  - возможность образования как внутренних, так и наружных пор, что связано с наличием неметаллических включений, остаточной влажностью наплавочного порошка, а также с загрязнением наплавляемой поверхности;
  - сравнительную дороговизну способа наплавки, обусловленную в основном высокими капитальными затратами на приобретение оборудования.

Считают [327], что перспективными направлениями устранения отмеченных выше недостатков являются тщательная подготовка присадочных порошков и наплавляемых поверхностей в сочетании с использованием дополнительных источников нагрева (электрической дуги, плазмы, токов высокой частоты).

С помощью лазерной наплавки получают износостойкие и коррозионностойкие микрокристаллические, аморфизированные и аморфные покрытия из достаточно широкой гаммы материалов.

Лазерную наплавку применяют для увеличения стойкости тяжело нагруженных локальных участков различных деталей, таких как уплотнительные фаски клапанов газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания, штампов, прессформ, эксцентров, ножевых валов для дробления стекла, посадочных поверхностей деталей газо- и водораспределительной арматуры и др. [287, 326, 327]. Лазерную наплавку считают одной из наиболее перспективных способов для формообразования трехмерных изделий.

**Лазерное оплавление покрытий.** Лазерное оплавление покрытий — это способ наплавки на предварительно нанесенные на подложку и закрепленные слои наплавляемого материала.

Так называемые **шликерные покрытия** предусматривают предварительное нанесение клеевой порошковой обмазки на наплавляемую поверхность детали [287, 328, 329]. Для этих целей используют вещества различного состава (клеи, самотвердеющие пластмассы, жиры, масла, лакокрасочные материалы и др.).

Лучшее качество наплавленных валиков получают при оплавлении шликерных покрытий, на которые наносят связующие вещества на нитроцеллюлозной основе [287]. Установлено, что достижение удовлетворительного формирования валиков при оплавлении шликерных покрытий при заданном минимальном проплавлении возможно в довольно узком диапазоне режимов ( $P$ ,  $v_{\text{опл}}$ ,  $d_{\text{п}}$ ), характеризующихся значениями погонной энергии 60–70 Дж/мм<sup>2</sup>. Добиться интенсификации процесса лазерного оплавления за счет увеличения плотности мощности излучения не удастся вследствие резкого возрастания коэффициента перемешивания.

При оплавлении шликерных покрытий лазерным излучением шликерный слой вблизи наплавленного валика разрушается и оголяет основной металл. Это связано с тем, что под действием периферийных участков лазерного излучения, недостаточного для проплавления присадочного материала, происходит разложение связующих веществ рядом с наплавленным валиком, потеря сцепления между частицами порошка в данной зоне, смачивание этих частиц расплавом и затягивание их в формируемый валик силами поверхностного натяжения.

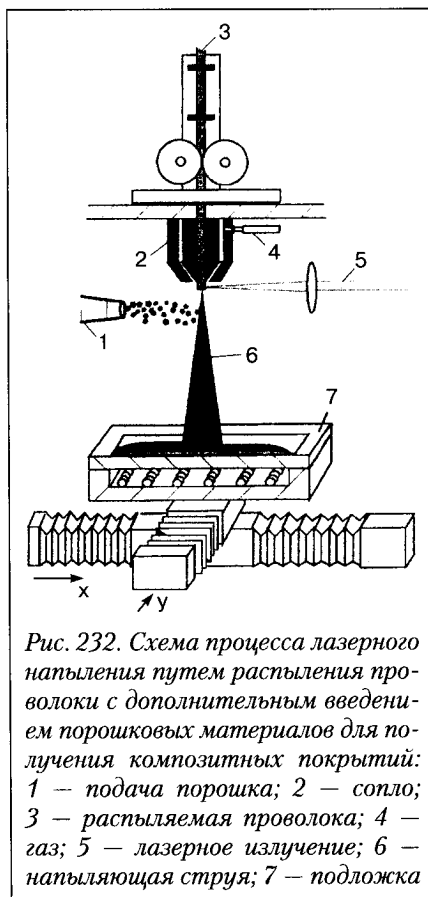
Указанное разрушение шликерного покрытия рядом с зоной оплавления делает невозможной последующую наплавку соседнего

валика, так как требуется восстановление шликерного покрытия. Вследствие этого затрудняется получение наплавов на большой поверхности. Поэтому считают [287], что оплавление лазерным излучением поверхностей, покрытых связующим веществом на нитроцеллюлозной основе, может быть рекомендовано для нанесения одиночных однослойных валиков, особенно в труднодоступных местах, а также при легировании поверхности.

Высокое качество поверхности обеспечивается при лазерном оплавлении покрытий, полученных плазменным или газоплазменным напылением. Однако осуществление двухстадийной обработки (напыление и последующее лазерное оплавление) приводит к заметному повышению трудоемкости. Поэтому лазерное оплавление может быть перспективным для улучшения свойств напыленных покрытий на локальных тяжело нагруженных участках поверхности.

**Лазерное напыление.** При лазерном напылении (рис. 232) в качестве напыляемых материалов используют как порошок, так и проволоку [327]. В частности, проводили лазерное напыление титана и нитрида титана на стальную основу путем распрыскивания титановой проволоки в смеси газов  $Ag + N_2$  с целью получения жаростойких покрытий. Благодаря использованию проволоки вместо порошка стоимость покрытия снизилась.

Следует отметить, что при лазерном напылении так же, как и при других способах газотермического напыления, необходимо





предварительно создать шероховатость поверхности. Качество покрытий, полученных лазерным напылением, практически такое же, как и при микроплазменном напылении.

В настоящее время способом лазерного напыления получают также покрытия с аморфной и кристаллической микроструктурой, имеющие шероховатость, почти совпадающую с шероховатостью напыляемой поверхности. Такие покрытия обладают свойствами как металлов, так и полупроводников. Другим перспективным направлением развития этого способа является нанесение керамических покрытий (например, оксида алюминия).

В настоящее время способы лазерной наплавки и напыления продолжают совершенствоваться. Основной тенденцией их развития, как и лазерной сварки, является применение комбинированных процессов, сочетающих лазерное излучение с высокочастотным нагревом, энергией электрической дуги, плазмы, световым лучом [327]. Это позволяет устранить недостатки, присущие каждой из составляющих при их отдельном использовании.

### 4.3. Лазерная резка

Лазерную резку применяют для разделения как металлических, так и неметаллических материалов.

**Лазерная резка металлов.** Лазерная резка металлов основана на нагреве, плавлении, испарении, химических реакциях горения и удаления расплава из зоны реза [287, 330, 332, 333]. При воздействии лазерного излучения на металлы возможно плавление и испарение.

Практическое использование разрушения металлов посредством испарения затруднено в связи с достаточно высокими удельными энергозатратами. Заметного снижения энергозатрат достигают использованием вспомогательного газа для удаления продуктов разрушения металлов из канала реза (газолазерная резка). Перемещение жидкой ванны расплава осуществляется в основном по толщине материала, т. е. вдоль канала реза с помощью динамического воздействия газа, превышающего вязкокапиллярную силу.

При газолазерной резке сталей и ряда других сплавов в качестве газа чаще всего используют кислород. Схема лазерно-кислородной резки показана на *рис. 233*. Благодаря протеканию экзотермической реакции кислород выделяет дополнительное количество теплоты. Кроме того, на обрабатываемой поверхности металла появляет-

ся оксидная пленка, изменяющая тепловой баланс в канале реза вследствие изменения поглощательной способности металла. Оксидная пленка заметно влияет также на гидродинамику течения расплава, так как вязкость оксидов существенно превышает соответствующую вязкость жидкого металла.

При лазерно-кислородной резке струя кислорода выполняет тройную функцию. Сначала кислород способствует предварительному окислению металла и уменьшению его отражательной способности. Затем происходит переход к воспламенению и горению, и теплота экзотермической реакции усиливает термическое действие лазерного излучения. Наконец, струя сдувает и уносит из зоны резки расплав и продукты сгорания металла, обеспечивая одновременно приток кислорода для поддержания реакции горения.

Последняя функция струи кислорода наиболее важна, так как в этом случае удается получить чистый, качественный рез значительно большей глубины. Кроме того, струя кислорода сокращает время остывания материала.

Основными факторами, определяющими производительность и качественные показатели газолазерной резки, являются тип, плотность мощности и мощность лазерного излучения, скорость резки, давление и состав газа, размер и конфигурация сопла для подачи газа, расстояние от среза сопла до поверхности материала, вид, состав и свойства разрезаемых материалов.

Как уже отмечалось выше, отражательная способность металлов снижается с уменьшением длины падающей электромагнитной волны, поэтому эффективность нагрева металлов увеличивается при использовании лазера с меньшей длиной волны излучения. Поэтому резка металлов с использованием Nd:YAG-лазера, имею-

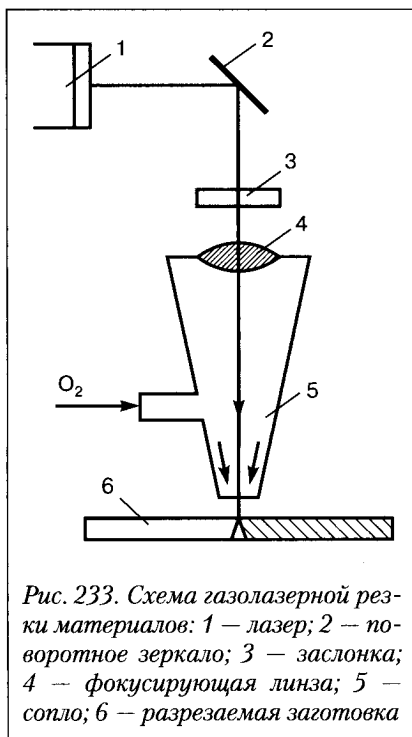
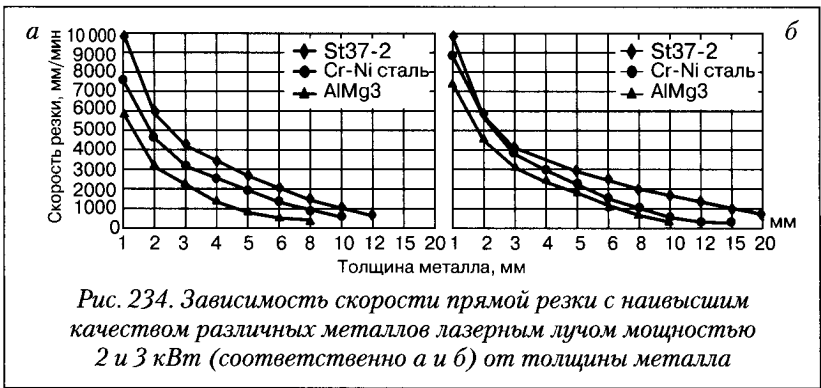


Рис. 233. Схема газолазерной резки материалов: 1 — лазер; 2 — поворотное зеркало; 3 — заслонка; 4 — фокусирующая линза; 5 — сопло; 6 — разрезаемая заготовка



щего меньшую длину волны, более эффективна в сравнении с резкой CO<sub>2</sub>-лазером, имеющим большую длину волны. Отражательная способность неметаллов, наоборот, уменьшается с увеличением длины волны, и в этом случае предпочтительнее использовать CO<sub>2</sub>-лазер.

Наиболее существенные факторы, влияющие на размерные характеристики резов, — это мощность и плотность мощности. Так как тепловложение в материал зависит и от скорости резки, ее тоже целесообразно рассматривать в совокупности с вышеуказанными.

На скорость резки (по данным фирмы Messer Cutting&Welding, Германия) оказывают влияние мощность лазерного излучения и толщина конструкционных материалов (рис. 234). В табл. 153 приведены аналогичные данные фирмы ЗАО «Технолазер» (Россия), касающиеся других конструкционных материалов.

Плотность потока излучения лазерного луча, которую определяют как отношение выходной мощности к площади пятна нагрева, является одной из основных характеристик лазерной установки: при плотности потока 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup> и распределении его по пятну нагрева диаметром 0,25–0,5 мм возможно осуществление процесса резки металла.

Пригодность лазеров для резки металла оценивают по коэффициенту качества излучения

$$K_{и} = P/Q^2d^2, \quad (26)$$

где  $P$  — средняя мощность лазерного излучения, Вт;  $Q$  — расходимость лазерного излучения, мрад;  $d$  — диаметр луча, мм.

Физический смысл этого коэффициента заключается в способности лазерного излучения создавать в фокальном пятне плотность

**Таблица 153. Оптимальные скорости лазерно-кислородной резки конструкционных материалов**

Материал	Толщина, мм	Скорость резки для лазера, м/мин			
		ТЛ-700	ТЛ-1,5	ТЛ-3	ТЛ-5М, ТЛ-6
Сталь	1	7	6	6	–
	4	1	2,4	3,5	–
	6	–	1,5	2,2	–
	14	–	–	0,8	1,5
	20	–	–	–	1
	25	–	–	–	0,6
Нержавеющая сталь	1	1	–	–	–
	4	–	1	–	–
	10	–	–	0,6	1,5
	15	–	–	–	0,5
Алюминиевые сплавы	2	0,7	2,2	3,2	–
	6	–	0,4	1,0	–
	8	–	–	0,5	1,0
Медь	2	–	–	0,3	0,5
Латунь	10	–	–	–	0,6
ДСП	16	1	2	4	6
Пластик ПММА	20	0,6	2	–	–
	40	–	–	1	–
	80	–	–	0,5	–

мощности не менее  $5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При  $K_{и} = 0,1-0,4$  качественную резку обеспечить нельзя. Доведение этого коэффициента до единицы и более обеспечивает высокие характеристики процесса лазерной резки.

Необходимо подчеркнуть, что плотность мощности является комплексной величиной и зависит не только от мощности лазерного излучения, но и от условий его фокусирования, модового состава луча, его расходимости, диаметра пучка на выходе из резонатора и других факторов. Поэтому при резке углеродистых сталей надо стремиться к фокусировке излучения в пятно меньшего диаметра (использовать установки с малой расходимостью лазерного пучка,

работающие в одномодовом режиме, применять короткофокусные линзы) с целью повышения плотности мощности в зоне реза.

При резке нержавеющей стали не всегда следует стремиться к повышению плотности мощности в зоне реза [330]. Для качественного разрезания материалов толщиной более 3 мм, проводимого на низких скоростях, плотность мощности не должна превышать  $(3-5) \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. При высоких скоростях резки верхний предел плотности мощности может быть повышен. При резке же титановых сплавов лучшие результаты получают при повышении плотности мощности в зоне резки.

Наряду с плотностью мощности важным параметром является скорость резки. Однако варьирование скорости резки имеет ограничения. Нижним пределом допустимой скорости резки для углеродистых сталей служит переход процесса в режим кислородной резки, когда количество теплоты, выделяющейся в результате экзотермической реакции горения металла в струе кислорода, достаточно для поддержания самопроизвольного процесса резки. Нижний предел допустимой скорости резки нержавеющей стали, титановых и алюминиевых сплавов приводит к резкому ухудшению качества поверхности реза. При резке металлов лазерным излучением мощностью 1 кВт такие явления особенно характерны при скоростях ниже 0,3–0,5 м/мин. На слишком же высоких скоростях возможна резка деталей небольшой толщины.

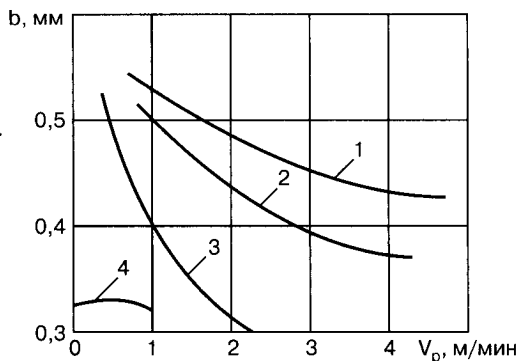
Значительно зависят от скорости резки ширина реза и протяженность ЗТВ. Ширина ЗТВ и ширина реза у верхней кромки уменьшаются с увеличением скорости резки [330].

Оба параметра у нижней кромки имеют минимум. Скорость резки, при которой достигают минимальной ширины реза и ЗТВ, позволяет получить оптимальное качество реза. Для низкоуглеродистой стали минимальная ширина ЗТВ на нижней кромке и оптимальное качество реза достигаются при соотношении выходной мощности лазерного излучения и скорости резки, примерно равном 70 Дж/мм.

Ширина реза  $b$  снижается с увеличением скорости резки  $v_p$  у всех групп конструкционных материалов. На *рис. 235* представлена зависимость ширины реза на углеродистых и нержавеющей сталях, титановых и алюминиевых сплавах от скорости резки при мощности лазерного излучения 0,9 кВт [330].

Следует отметить также, что высокое качество поверхности реза в различных металлических материалах обеспечивается при опре-

Рис. 235. Влияние скорости резки на ширину реза в различных металлах: 1 — углеродистая сталь; 2 — нержавеющая сталь; 3 — титановый сплав; 4 — алюминиевый сплав

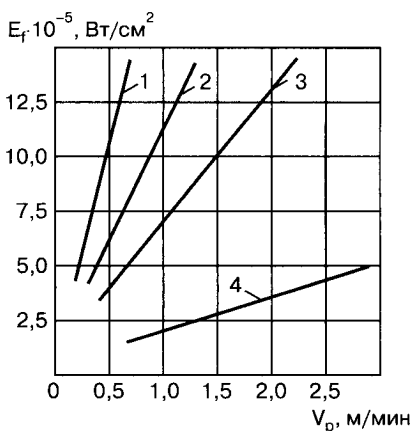


деленных соотношениях между скоростью газолазерной резки металла и плотностью мощности  $E_f$  (рис. 236) [330]. Превышение указанного предела при резке углеродистых сталей ведет к переходу на режим кислородной резки, а при резке нержавеющей сталей и титана в инертной среде — к ухудшению качества реза.

Указанное выше соотношение между плотностью мощности излучения и скоростью резки обеспечивается при определенных параметрах подаваемых в зону резки газов и изменяется при их изменении.

Необходимо отметить, что хотя точность выполнения резки различных металлов практически одинакова (при одинаковой точнос-

Рис. 236. Зависимость верхнего предела соотношения плотности мощности и скорости резки, обеспечивающего качественную резку, для различных материалов: 1, 3 и 4 — соответственно углеродистые, нержавеющие стали и титановые сплавы в среде кислорода; 2 — титановые сплавы в среде инертных газов



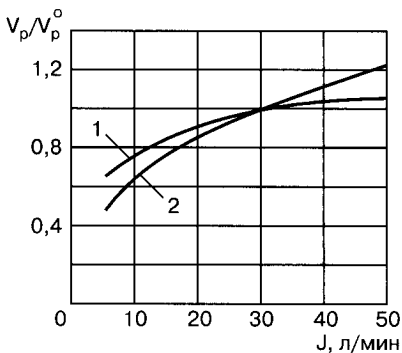


Рис. 237. Зависимость скорости резки от расхода в газовой струе ( $v_p^0$  — скорость резки при  $J=30$  л/мин):  
1 — струя инертного газа;  
2 — кислородная струя

ти исполнительных манипуляционных механизмов), тем не менее резку нержавеющей сталей можно выполнять несколько точнее, чем углеродистых. Точность же выполнения резки титана уступает точности выполнения резки углеродистых и нержавеющей сталей.

Состав, давление и скорость истечения технологического газа, подаваемого в зону резки, оказывают существенное влияние на производительность резки и качество реза.

Для выполнения обязательного условия газолазерной резки — удаления жидкого расплава из зоны реза — необходимо создать вдоль всей передней стенки реза определенное давление газа. При резке углеродистых и нержавеющей сталей, титана и ряда других материалов в качестве технологического газа используют кислород. Когда окисление кромок металла нежелательно (при резке нержавеющей сталей, титана, алюминиевых сплавов), в качестве технологического газа используют азот и аргон.

Увеличение давления инертного газа в струе увеличивает скорость стекания жидкого расплава. Это, в свою очередь, снижает затраты теплоты за счет теплопроводности, и процесс резки выходит на максимально возможную при данных условиях скорость, лимитируемую лишь стадией нагрева до температуры плавления, плавлением и тепловыми потерями (рис. 237, кривая 2, здесь расход изменяется за счет давления газа) [330].

Характерными особенностями лазерной резки в инертном газе являются:

- использование режущего газа с давлением, как правило, больше 0,1 МПа, поэтому применяют фокусирующие линзы повышенной толщины;

- формирование со сверхзвуковой скоростью струи режущего газа, которая выдувает капли расплавленного металла из зоны реза;
- фокусировка лазерного луча на нижнюю поверхность листа;
- минимальное расстояние между срезом сопла и поверхностью металла (0,5–1 мм);
- большой расход инертного газа и относительно низкая скорость резки.

При лазерно-кислородной резке с возрастанием толщины жидкого расплава увеличивается скорость стекания оксидной пленки, что приводит к уменьшению ее толщины и, следовательно, к увеличению тепловыделения в результате химической реакции окисления металла. Это усиливает воздействие мощности лазерного излучения на скорость резки. Следовательно, при использовании кислорода (в отличие от лазерной резки металла в струе инертного газа) лучше сдувается жидкий расплав, уменьшается толщина оксидной пленки, что в свою очередь увеличивает скорость окисления и тепловыделения, в результате чего скорость резки монотонно возрастает (рис. 237, кривая 2).

Параметры струи кислорода при лазерно-кислородной резке зависят от конструкции сопла, направляющего газ в область резки, и условий истечения газа [330].

Для лазерно-кислородной резки характерны такие особенности:

- диаметр сфокусированного лазерного луча меньше, чем диаметр (обычно 1–2 мм) кислородной струи;
- ширина реза определяется диаметром сфокусированного лазерного луча и скоростью резки и может быть меньше 100 мкм;
- давление кислорода 0,3–0,4 МПа при резке тонкого листа и до 0,03 МПа при резке листов толщиной 30 мм;
- как правило, лазерную резку осуществляют расширяющимся лазерным лучом, т. е. фокальное пятно всегда расположено выше поверхности металла;
- зазор между срезом сопла, формирующим струю, и поверхностью разрезаемого металла должен быть от 0,5 мм для тонкого листа и 3 мм — для листа толщиной 30 мм;
- чем толще металл, тем меньше скорость резки; при минимальной скорости резки 0,5–0,6 м/мин максимальная толщина разрезаемого стального листа в настоящее время 30 мм при мощности лазерного луча 6 кВт.

В последние годы получает распространение способ лазерно-кислородной резки под названием LASOX, разработанный компа-



нией VOC Gases (США) [332]. При этом способе используют лазерную головку с лазерным лучом, направленным по оси газового сопла. Лазерный луч обеспечивает предварительный нагрев стального изделия до температуры горения, а сверхзвуковая струя кислорода, направленная на фокальное пятно лазерного луча, окисляет сталь, образуя узкий рез. При этом способе:

- давление кислорода для формирования сверхзвуковой струи 0,6–1,0 МПа;
- диаметр пятна нагрева лазерным лучом на поверхности металла существенно больше, чем диаметр струи;
- ширина реза равна диаметру кислородной струи и, как правило, больше 3 мм;
- расстояние между срезом сопла и металлом 6–8 мм;
- толщина разрезаемого металла до 50 мм при мощности лазерного луча 2 кВт и до 100 мм — при мощности лазерного луча 6 кВт; скорость резки при этом около 0,2 м/мин.

К преимуществам этого способа разработчики относят уменьшение вероятности попадания брызг металла на режущую головку за счет большего зазора между режущей головкой и деталью, а также высокую точность резки толстолистовых стальных деталей.

При лазерной резке металлов используют как непрерывное, так и импульсно-периодическое излучение.

Сравнение точности и качества резов, выполненных непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением, показывает, что при меньшей ширине реза, выполненного импульсно-периодическим лазерным излучением, характерна более высокая точность выполнения. Шероховатость поверхности реза, отклонение кромок реза от перпендикулярности также ниже при импульсно-периодической резке. В то же время резка непрерывным лазерным излучением в настоящее время более производительна, что и предопределяет широкое внедрение ее в производство.

Лазерную резку широко используют в судостроении, авиакосмической отрасли, энергетике и других отраслях промышленности [330, 332, 333].

Экономическими и экологическими преимуществами лазерной резки являются следующие [334]:

- большая скорость резки;
- низкий уровень шума;
- небольшое количество шлака;
- возможность резки практически любого материала;

A, пенсы GB/м

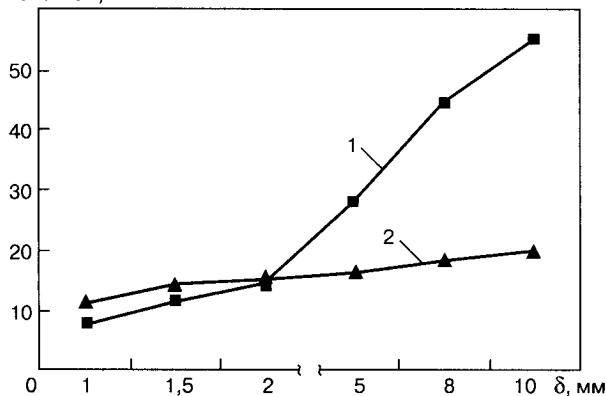


Рис. 238. Сравнение стоимости A лазерной (1) и прецизионной плазменной (2) резки

- возможность резки и маркировки при использовании одних и тех же инструментов;
- простота интеграции с другими производственными процессами.

Прямое сравнение стоимости лазерной и прецизионной плазменной резки (без учета дополнительных преимуществ использования лазера) показывает, что лазерная резка тонколистового (толщиной до 3 мм) металла существенно дешевле (рис. 238) [335]. При толщине металла свыше 5 мм более конкурентоспособна плазменная резка. Однако степень эффективности этих двух способов резки может существенно измениться в пользу лазерной резки, если будут учтены, например, высокая точность резки, узкая зона термического влияния, возможность повторения, исключение дополнительной обработки, улучшением организации работ и т. д.

При сравнении качества и стоимости лазерной и плазменной, а также других способов резки можно сделать такие выводы:

- если точность является основным условием и критерием производства, то лазерная резка практически является единственным рациональным способом;
- если требуемые производственные допуски не слишком жесткие, а существенным критерием является минимальная стоимость продукции при данной точности и повторях резки, следует рассмотреть целесообразность применения плазменной либо других способов резки.

При анализе эффективности новых способов изготовления продукции существенным критерием являются капитальные затраты, а также затраты на эксплуатацию оборудования. Тщательный анализ, проведенный сотрудниками Лазерного центра в Мюнстере (Германия), показал, что затраты на покупку лазеров типа Nd:YAG более высоки (до 40%), чем на покупку CO<sub>2</sub>-лазеров [336]. Кроме стоимости лазера, значительную долю в затратах составляют затраты на манипуляторы и периферийные устройства, которые могут в несколько раз превышать стоимость лазера.

Если учитывать марку и толщину разрезаемого материала (*табл. 154*), то получается, что затраты при лазерной резке углеродистой стали (St 37-2) толщиной 12 мм и нержавеющей стали толщиной 8 мм значительно ниже, чем затраты при резке водяной струей. В остальных случаях для этих же материалов кислородная и плазменная резки оказались более предпочтительными с экономической точки зрения.

Качество резки имеет непосредственное влияние на стоимость изготовления сварных конструкций. Относительно низкое качество и повторяемость резки имеют место при относительно дешевых способах резки, т. е. более дешевых, чем лазерная резка. Причем зачастую низкое качество резки приводит к потерям на дальнейших этапах производства. Необходимым условием объективной оценки экономической эффективности использования лазерной резки является применение комплексного подхода к процессу изготовления сварной конструкции, учитывающего влияние качества каждого производственного этапа на общие затраты.

При анализе затрат и преимуществ, кроме стоимости самой резки, следует учитывать все дополнительные технологические и экологические преимущества, являющиеся следствием высокого качества резки. Согласно [320], точность изготовления примерно 4–6 мм/10 м при разметке и резке требует затрат труда при изготовлении корпуса корабля от 50 до 80 ч/т. Повышение точности изготовления до менее 2 мм/10 м (что является возможным при использовании лазерной техники) уменьшает трудоемкость до 25 ч/т.

Еще одним способом повышения эффективности производства является замена штамповки лазерной вырезкой (*табл. 155*) [320].

При замене штамповки лазерной резкой экономические показатели улучшаются за счет исключения затрат на изготовление штампов и приобретение штамповочного оборудования.

**Таблица 154. Сравнение характерных затрат при резке различными способами материалов разной толщины**

Параметр	Кислородная резка			Плазменная резка			Лазерная резка			Резка водяной струей		
	1-я смена	2-я смена	3-я смена	1-я смена	2-я смена	3-я смена	1-я смена	2-я смена	3-я смена	1-я смена	2-я смена	3-я смена
Стоимость работы установки, DM/ч	141,5	103,5	90,5	157,70	115,70	102,70	Режущий газ N <sub>2</sub>			267,00	193,00	169,00
							287,50	187,50	154,50			
							Режущий газ O <sub>2</sub>					
							337,50	237,50	204,50			
Толщина материала 12 мм, St37-2	3 горелки			Сила тока резки 250 А. Плазмообразующий газ N <sub>2</sub>			Мощность лазера 2500 Вт. Режущий газ O <sub>2</sub>			Насос 75 кВт. Давление 380 МПа. 2 головки		
Скорость резки	600 мм/мин × 3 горелки			2000 мм/мин			900 мм/мин			80 мм/мин × 2 головки		
Стоимость резки, DM/ч	1,31	0,96	0,84	1,31	0,96	0,86	5,32	3,47	2,86	27,81	20,10	17,60
Толщина материала 8 мм, X4CrNi18-10	—			Сила тока резки 250 А. Плазмообразующий газ N <sub>2</sub>			Мощность лазера 2500 Вт. Режущий газ N <sub>2</sub>			Насос 75 кВт. Давление 380 МПа. 2 головки		
Скорость резки				2000 мм/мин			900 мм/мин			140 мм/мин × 2 головки		
Стоимость резки, DM/ч				1,05	0,77	0,68	9,58	6,25	5,15	15,89	11,49	10,06
Толщина материала 6 мм, AlMg3				—			Сила тока резки 250 А. Плазмообразующий газ N <sub>2</sub>			Мощность лазера 2500 Вт. Режущий газ N <sub>2</sub>		
Скорость резки	2500 мм/мин						600 мм/мин			500 мм/мин × 2 головки		
Стоимость резки, DM/ч	1,05	0,77	0,68				7,99	5,21	4,29	4,45	3,22	2,82

**Таблица 155. Сравнение затрат при лазерной вырезке и при традиционных способах на примере Института сварки**

<i>Обрабатываемый элемент</i>	<i>Данные технологии</i>	<i>Лазерная резка</i>
<p>Рычаг (2500 шт.)</p> 	Выкраивание с помощью штампа	Время операции ~5 с
	Время операции ~2 с	
	Стоимость выкраивания одного элемента 3,0 PLZ	Стоимость изготовления одного элемента 0,5 PLZ
	Необходимость изготовления рабочего элемента штампа стоимостью примерно 8...10 тыс. PLZ	
<p>Ползун (2500 шт.)</p> 	Выкраивание с помощью штампа	Время операции ~10 с
	Время операции ~2 с	
	Стоимость выкраивания одного элемента 3,0 PLZ	Стоимость изготовления одного элемента 0,6 PLZ
	Необходимость изготовления рабочего элемента штампа стоимостью примерно 8...10 тыс. PLZ	
<p>Зубчатое колесо смесителя (10 шт.)</p> 	Черновое выкраивание с помощью плазменной горелки	Время операции ~90 с
	Механическая обработка (фрезеровка, сверление, протачивание)	Стоимость изготовления одного элемента около 40 PLZ
	Время операции ~4 ч	
<p>Элемент корпуса (500 шт.)</p> 	Черновое выкраивание с помощью плазменной горелки	Время операции ~49 с
	Механическая обработка (фрезеровка, сверление, протачивание)	Стоимость изготовления одного элемента приблизительно 14 PLZ
	Время операции ~60 мин	
	Стоимость изготовления одного элемента 30 PLZ	

**Лазерная резка неметаллических материалов.** Для разделения неметаллических материалов в промышленности применяют механическую резку, ультразвук, плазму, струю воды высокого давления, лазерное излучение и другие способы [322]. В последние годы объемы применения лазерной резки неметаллических материалов существенно увеличились. При этом обеспечиваются высокая точность и качество реза (малая ширина и параллельные кромки), малая зона нагрева, большая производительность процесса и возможность точного, автоматизированного управления [287].

По некоторым данным, доля обработки неметаллических материалов составляет около 70% от всего объема промышленного применения лазерной резки, что свидетельствует об очевидных преимуществах лазерной резки неметаллических материалов.

Лазерной резке одинаково легко поддаются такие высокотвердые материалы, как металлокерамика, стеклоуглерод, алмаз, композиционные материалы на основе нитей бора и углерода. Высокого качества реза достигают при лазерной резке стеклоткани, одновременно улучшаются условия труда за счет уменьшения количества стеклопыли по сравнению с количеством пыли при механической резке.

Успешно применение лазерной резки в деревообрабатывающей промышленности. Например, при раскрое фанеры отсутствуют опилки, достигается малая ширина реза, чистая поверхность кромок, высокая точность при очень сложных поверхностях раскроя. Отмечают резкое повышение производительности бумагорезательного производства при переходе на лазерный раскрой бумаги и картона с помощью лазера [287].

Большая часть неметаллических материалов обладает высокой поглощающей способностью излучения  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны 10,6 мкм и коэффициентом поглощения 0,9. При незначительных тепловых потерях лазерного излучения и малой теплопроводности удастся осуществлять резку неметаллических материалов больших толщин; например, полиметилметакрилат (ПММА) толщиной 25 мм успешно разрезают лазерным излучением мощностью 500 Вт.

При воздействии лазерного излучения на органические материалы происходят деструкция, испарение, сублимация, термическая диссоциация с выделением газов. При резке дерева, каучука, бумаги и некоторых пластиков происходит образование свободного углерода, т. е. сажи. Кроме образования газов при взаимодействии лазерного излучения с неметаллическими материалами в ряде случаев образуется аэрозоль в виде мелкодисперсных частиц испаренного материала.

При быстром испарении материала под воздействием лазерного излучения даже небольших плотностей мощности, порядка  $10^3$ – $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, образуется эрозионный факел, который экранирует обрабатываемую поверхность, поглощает излучение и снижает интенсивность процесса нагрева.

Отмечают различие в механизме экранирования при резке металлов и неметаллов [287]. При воздействии на металлы лазерного излучения с плотностью мощности  $10^5$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> образуется оптический пробой в парогазовой среде над обрабатываемой поверхнос-

**Таблица 156. Режимы резки неметаллических материалов**

<i>Материал</i>	$\delta$ , мм	<i>P</i> , Вт	$v_p$ , мм/с	<i>Материал</i>	$\delta$ , мм	<i>P</i> , Вт	$v_p$ , мм/с
Кварц	3,2	500	12,3	Стекло- текстолит	8,0	2500	16,6
Стекло	3,2	5000	76,1				
Фанера	6,4	850	90,1	Стеклоткань	5,0	800	12,5
Картон	19,4	200	1,6	Текстиль	0,45	500	666,6
Керамика	6,5	850	10,0	Нейлон	0,76	200	101,6
Плексиглас	10,0	900	58,3	Кожа	3,20	200	10,5
Асбоцемент	5,0	500	0,83	Резина	2,0	100	31,7

тью, приводящий к образованию экранирования. При обработке неметаллов в этом же диапазоне плотностей мощности вследствие образования твердых частиц в потоке испаряющегося вещества экранирование излучения происходит в значительно большей степени.

Для устранения влияния эрозионного факела в зону взаимодействия излучения с материалом подается активный или нейтральный газ для соответствующих материалов. Первоочередное назначение этого газа заключается в удалении испарившихся частиц, плазмы и образовавшегося расплава.

В табл. 156 представлены режимы резки  $\text{CO}_2$ -лазером ряда неметаллических материалов.

Лазерную резку неметаллических материалов достаточно широко используют в текстильной, автомобильной, электротехнической и других отраслях промышленности.

#### **4.4. Лазерные технологические комплексы**

Как уже отмечалось выше, на применении лазерных источников энергии основаны эффективные технологии резки, сварки, наплавки, поверхностного легирования, термической обработки и др. Эти технологии реализуют с помощью лазерных технологических комплексов (ЛТК).

Основными составными частями лазерных технологических комплексов являются обычно лазер, внешняя оптическая система, система манипулирования изделием или оптикой, система обеспечения технологического процесса, система автоматизированного управления [337].

По назначению лазерные технологические комплексы делят на универсальные и специализированные.

По степени автоматизации современные комплексы можно разделить на комплексы для автоматической, автоматизированной, механизированной и ручной обработки.

Наибольшее распространение получили автоматизированные лазерные комплексы для резки конструкционных материалов (рис. 239) [330, 337]. Составные части лазерной аппаратуры для резки приведены в табл. 157 [332].

Режущую головку размещают непосредственно на каретке портала резательной машины. Если лазер имеет небольшую массу и габариты, то он также может быть размещен на портале. В противном случае лазер располагают отдельно и используют блоки поворота излучения для транспортировки излучения к подвижной режущей головке. По условиям техники безопасности трасса лазерного луча должна быть закрыта для исключения выхода лазерного излучения

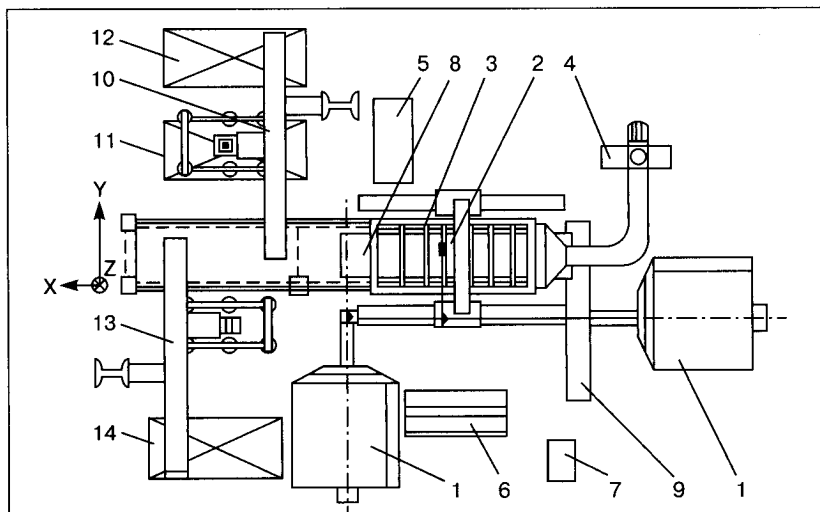


Рис. 239. Автоматизированный лазерный технологический комплекс резки: 1 – лазерный модуль (по двум вариантам); 2 – манипулятор луча; 3 – стол на платформе; 4 – система вентиляции; 5 – шкаф газовой станции; 6 – пульт управления; 7 – шкаф ЧПУ; 8 – пластинчатый конвейер; 9 – ленточный конвейер; 10 – манипулятор загрузки; 11 – позиция заготовок; 12 – позиция отходов; 13 – манипулятор выгрузки; 14 – позиция деталей



**Таблица 157. Составные части лазерной аппаратуры**

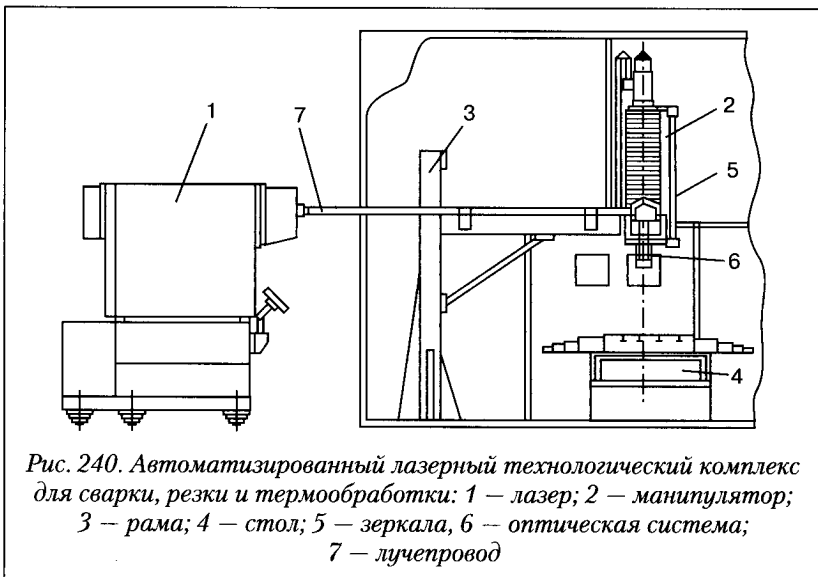
<i>Под-система</i>	<i>Назначение</i>	<i>Примечание</i>
Лазерная головка	Излучающий блок лазера (содержит рабочий элемент и оптический резонатор)	Обязателен
Блок питания лазера	Электропитание и управление лазером. В современных лазерах обеспечивается полное управление по каналу RS232 или RS485	Обязателен
Блок охлаждения лазера	Обеспечивает сьем лишней теплоты с оптического элемента. КПД современных лазеров находится в интервале от 3 до 8%, так что система охлаждения отводит большую часть теплоты	Обязателен. Обычно объединяют с блоком питания лазера
Контур охлаждения	Второй внешний контур водяного охлаждения	Используют, если качество технической воды в цеху неудовлетворительно и может привести к загрязнению внутреннего контура лазера
Оптический коллиматор	Расширяет пучок излучения лазера в диаметре (с 3–6 мм до 10–15 мм) для передачи к режущей головке. Уменьшает расходимость излучения и позволяет его передавать на большие расстояния	Используют почти всегда, особенно, если оптический путь от лазера до режущей головки значителен
Блоки поворота излучения	Поворотное зеркало на юстировочном устройстве. Используют при построении оптической системы передачи излучения, например, если лазер установлен на портале	Используют всегда, если лазер не стоит на подвижной каретке
Блок измерения мощности	Прибор, обеспечивающий контроль мощности излучения	Используют, если в лазер не встроены точный контроль мощности или если технологический процесс требует тщательного контроля мощности
Юстировочный лазер	Лазер видимого диапазона и устройство для ввода излучения этого лазера в трассу пучка	Используют, если необходимо подсвечивать трассу и точку фокусировки лазерного пучка

Под-система	Назначение	Примечание
Режущая головка	Устройство, размещенное на каретке, непосредственно выполняющее резку материала. Содержит фокусирующую оптику (линза или зеркало) и сопло для подачи в область фокуса режущего газа под давлением. Головка должна размещаться на устройстве вертикального перемещения для точного наведения на поверхность разрезаемого листа	Обязательна. Машина может быть снабжена несколькими режущими головками с разным фокусным расстоянием для разных материалов и толщин
Датчик положения	Предназначен для точного измерения расстояния от режущей головки до поверхности листа с целью его автоматического поддержания постоянным. Для лазерной резки хорошо зарекомендовали себя емкостные датчики	Желательно

или травмирования наладчиков. Это могут быть разного типа конструктивные решения в виде экранирующих плоскостей или телескопических систем. Кроме того, при использовании в запыленных помещениях необходимо обеспечить минимизацию осаждения пыли на поверхности оптических зеркал. Для этого блоки поворота изготавливают в корпусе с подачей избыточного давления воздуха через фильтр.

Существенное влияние на конструктивные особенности лазерных технологических комплексов оказало использование оптоволоконных световодов для транспортировки лазерного излучения на расстояние до 300 м. Один источник лазерного излучения с оптоволоконным световодом может обеспечить последовательное выполнение ряда операций (резка, сварка, наплавка, термическая обработка). Манипуляторы и роботы должны обеспечить необходимую точность воспроизведения траекторий. Лазерно-технологические комплексы обеспечивают большой коэффициент загрузки оборудования при сменяющейся номенклатуре изделий.

В состав универсальных лазерно-технологических комплексов для сварки, резки и термообработки, применяемых в Украине и России, входят двухкоординатные столы для позиционирования обрабатываемого изделия и зеркала для транспортировки излучения (рис. 240) [337].

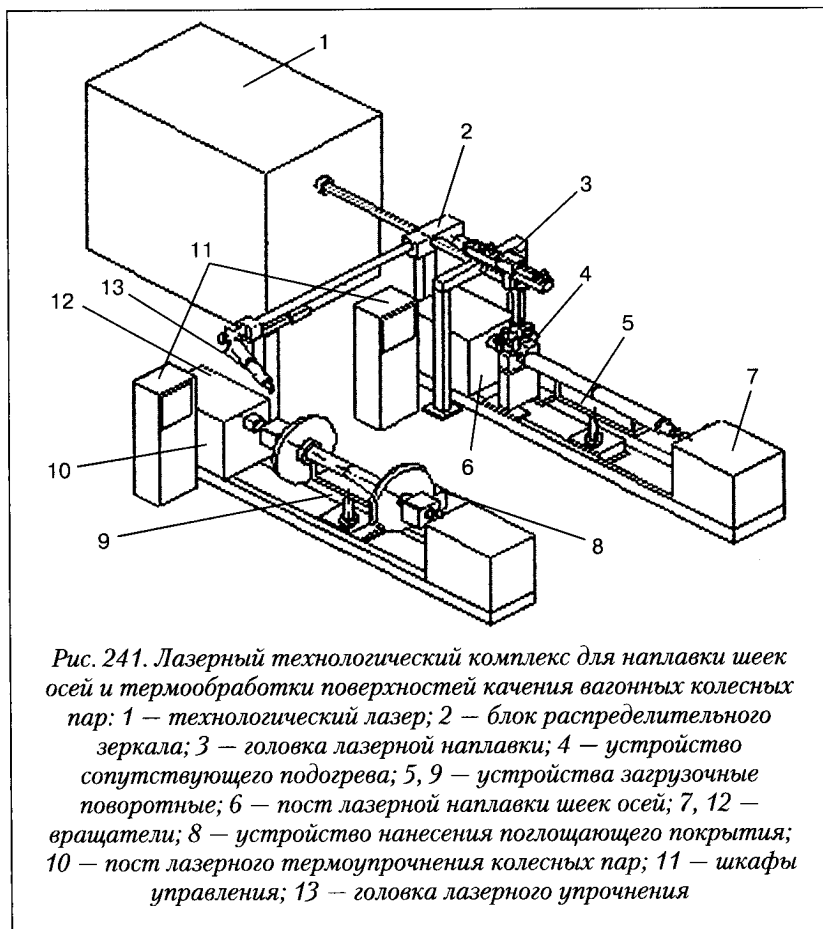


Еще одним направлением является совмещение в лазерно-технологическом комплексе оборудования для резки с высокопроизводительным оборудованием типа револьверного прессы, а в некоторых случаях и гибочными устройствами, что позволяет значительно расширить возможности оборудования. Такие установки с успехом выпускают ряд фирм, например, Trumatic Laser-Press, Behrens (Германия), Raskin (Швейцария) и др.

Автоматизированный лазерный технологический комплекс был применен для наплавки шеек осей и термообработки поверхностей качения вагонных колесных пар (рис. 241) [338]. В состав этого комплекса входят лазер 1 мощностью 5 кВт, два поста для лазерной обработки 6 и 10, система транспортировки и фокусирования лазерного излучения, системы управления 11 постами 6 и 10.

Комплекс работает в полуавтоматическом режиме, т. е. загрузку, закрепление и выгрузку деталей осуществляют с помощью транспортных средств участка, прочие технологические операции выполняются автоматически.

В последние годы получили распространение мобильные установки для ручной и механизированной сварки и обработки металлов [339]. Фраунгоферовский институт лазерной техники в г. Аахене (Германия) разработал мобильную лазерную установку для



*Рис. 241. Лазерный технологический комплекс для наплавки шеек осей и термообработки поверхностей качения вагонных колесных пар: 1 — технологический лазер; 2 — блок распределительного зеркала; 3 — головка лазерной наплавки; 4 — устройство сопутствующего подогрева; 5, 9 — устройства загрузочные поворотные; 6 — пост лазерной наплавки шеек осей; 7, 12 — вращатели; 8 — устройство нанесения поглощающего покрытия; 10 — пост лазерного термоупрочнения колесных пар; 11 — шкафы управления; 13 — головка лазерного упрочнения*

удаления ржавчины, окалины, краски и других загрязнений с металлических и неметаллических поверхностей, в том числе и со сварных швов.

Установку комплектуют мощным твердотельным лазером, излучение по световоду длиной до 100 м передается на рабочий инструмент, который оператор перемещает вручную. Встроенный в рабочий инструмент сканер обеспечивает необходимую ширину обрабатываемой поверхности. Лазер автоматически отключается в тот момент, когда рабочую головку отводят от обрабатываемой поверхности.

На Саксонском машиностроительном предприятии при сотрудничестве со Среднесаксонским лазерным институтом Высшей школы в г. Миттвайда (Германия) разработан аппарат с рабочим инструментом для ручной лазерной сварки и обработки. Его можно комплектовать твердотельным Nd:YAG-лазером или диодным лазером, который связывается с ручным рабочим инструментом оптоволоконным световодом. Кроме того, в комплект аппарата входят блоки питания и управления лазером, а также система охлаждения.

В сварочном учебно-исследовательском центре SLV (г. Галле, Германия) разработаны два варианта оригинального переносного оборудования для механизированной лазерной сварки и наплавки.

Установку обоих аппаратов производят вручную. Параметры режима сварки задаются специальной программой. Сварка начинается при стационарном положении аппарата, затем сварочная головка с выбранной скоростью передвигается автоматически на установленную длину шва. Сварку выполняют в защитном газе. Аппараты имеют защитные экраны от лазерного излучения на случай некорректного обслуживания или других непредвиденных обстоятельств.

В последние годы западные производители, включая малые и средние предприятия, значительно увеличивают инвестиции в различные разработки по использованию лазера. Несмотря на сложность и высокую стоимость лазерного оборудования и технологий, их применение в итоге может быть экономически целесообразным, поскольку увеличивает производительность сварки и обеспечивает более высокое качество продукции.

---

## **Глава 5.**

# **Фрикционные технологии**

Фрикционные технологии базируются на использовании тепла, выделяющегося в процессе сухого трения сопряженных поверхностей [340–342]. При этом температура поверхностей не остается постоянной. Происходит это потому, что энергия, затраченная на преодоление сил трения, выделяется в форме теплоты в первую очередь на элементарных площадках физического контакта. В этих точках при трении могут появляться кратковременные температурные всплески, быстро повышающие температуру микровыступов. Тепло от этих точек рассеивается в окружающей среде и проникает вглубь обоих тел, причем тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплоотвода.

Тепловыделение при трении имеет место не только на поверхностях точек физического контакта. Деформирование микровыступов, на которое затрачивается некоторая доля энергии при трении, также является причиной теплогенерирования. Поэтому говорят о тепловыделяющем поверхностном слое, имеющем некоторую толщину. В пределах этого слоя, а благодаря теплопроводности и в слоях, расположенных глубже, при трении образуется температурное поле.

Практическое использование теплоты, выделяемой при трении, можно реализовать для сварки, наплавки, формоизменения и упрочнения [340–343].

### **5.1. Сварка трением**

Сварка трением — особый вид сварки давлением, при котором местный нагрев материала заготовок происходит в результате трения их сопряженных поверхностей друг с другом или путем использования специального инструмента [340–345].

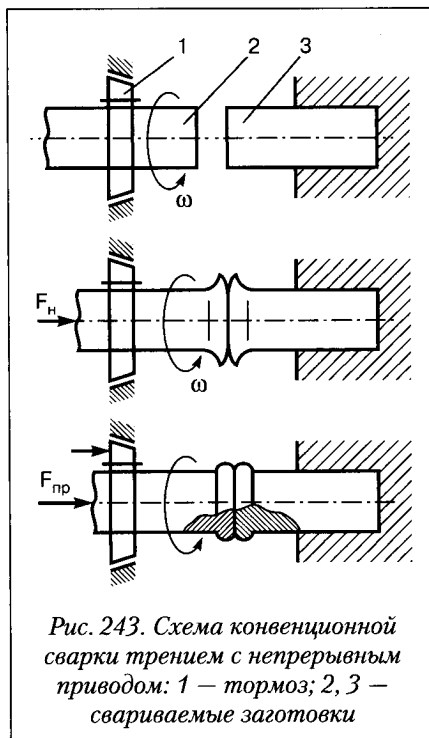


Практическому использованию сварки трением положили начало опыты токаря-новатора А.И. Чудикова (1956 г.), получившие развитие в работах ВНИИЭСО (Россия) под руководством В.И. Вилля [340]. Эти работы послужили толчком для начала исследований сварки трением в США, Японии, Великобритании, Германии и других странах.

В 1960–1990 гг. сварку трением интенсивно исследовали и внедряли в промышленность как в СССР, так и в других странах мира. В последние десятилетия интерес к сварке трением не только не снизился, но даже возрос.

**Классификация способов сварки трением.** Классификация способов в виде схемы показана на *рис. 242*. Наибольшее распространение получили способы 1 и 2. Сварку трением по способу 1 называют сваркой с непрерывным приводом или **конвенциональной сваркой** [342]. Конвенционная сварка — разновидность сварки трением, при которой механическая энергия, постоянно поступающая от источника, непосредственно преобразуется в тепловую в тонких приповерхностных слоях металла сопряженных и подлежащих соединению поверхностей свариваемых заготовок.

Наиболее распространенная схема выполнения конвенциональной сварки трением (способ 1, А) показана на *рис. 243*. Технологический цикл этого способа состоит в следующем. Одной из заготовок сообщают вращательное движение, затем заготовки сближают и прикладывают к ним осевое усилие нагрева (в некоторых машинах для сварки трением предусмотрена предварительная притирка поверхностей). Стадию нагрева регламентируют в машинах или временем нагрева,



*Рис. 243. Схема конвенциональной сварки трением с непрерывным приводом: 1 — тормоз; 2, 3 — свариваемые заготовки*



или совместной деформацией заготовок. После торможения подвижной заготовки прикладывают усилие проковки.

К основным достоинствам конвенционной сварки трением относят:

- высокую производительность (35–450 сварок в час) и небольшие потери металла;
- стабильность качества сварного соединения в широком диапазоне режимов сварки;
- простоту подготовки деталей к сварке;
- уменьшение припусков на сварку по сравнению с припусками при стыковой контактной сварке;
- уменьшение расхода электроэнергии в 5–10 раз и снижение мощности сварочного оборудования по сравнению с этими же показателями при стыковой контактной сварке;
- простоту автоматизации и контроля параметров режима сварки;
- отсутствие ультрафиолетового излучения, мощных магнитных полей, вредных газовых выделений и разбрызгивания расплавленного металла.

В качестве недостатков упомянутого способа сварки следует выделить:

- ограниченность вида соединения деталей (только стыковое и Т-образное соединение);
- ограниченность формы и размера сечения деталей. По экономическим соображениям наиболее целесообразным считается диапазон сечений  $10 - 5 \cdot 10^4$  мм<sup>2</sup>.

Предлагают некоторые разновидности конвекционной сварки трением, которые позволяют в значительной мере преодолеть отмеченные выше недостатки.

На *рис. 244* схематически представлены способы 1А–1Д (см. *рис. 242*). Общим для этих способов является то, что свариваемые поверхности значительным усилием прижимают друг к другу и, вращая, перемещают. При этом в начальный момент разрушаются и вытесняются из стыков пленки различных загрязнений, а также стираются неровности на свариваемых поверхностях. В результате получается плотный контакт поверхностей и прекращается доступ воздуха к ним. В дальнейшем происходит быстрый нагрев тонких слоев металла свариваемых поверхностей. Часть нагретого металла с возможными остатками загрязнений вытесняется за пределы стыка.

После прекращения вращения деталей при их совместной пластической деформации происходит образование сварного соединения.

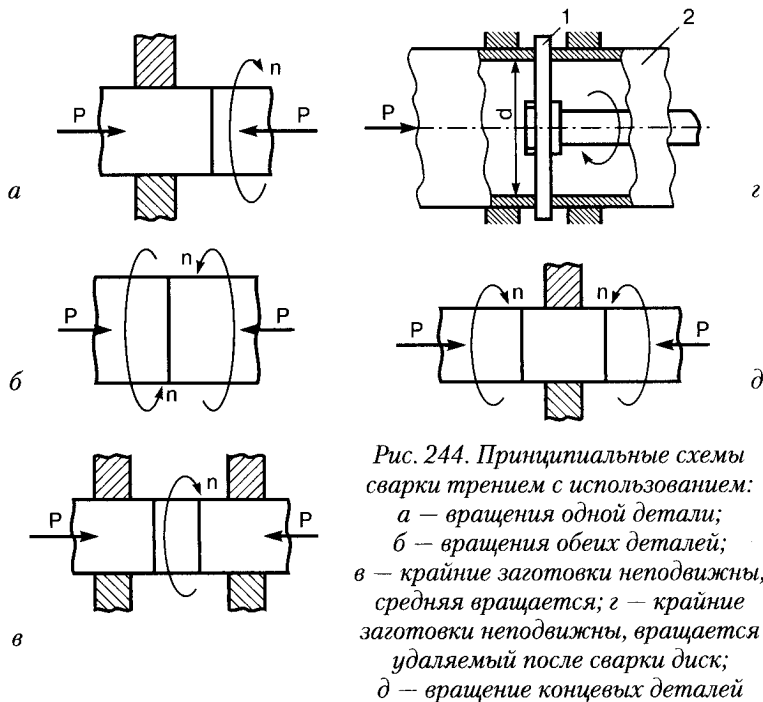


Рис. 244. Принципиальные схемы сварки трением с использованием:  
 а — вращения одной детали;  
 б — вращения обеих деталей;  
 в — крайние заготовки неподвижны, средняя вращается; г — крайние заготовки неподвижны, вращается удаляемый после сварки диск;  
 д — вращение концевых деталей

Отличительной особенностью способа 1Г является выполнение сварки длинных труб с помощью вращения зажатого между ними относительно тонкого диска. По этому способу сварки в результате износа и нагрева диск 1 становится тоньше и при осадке срезается по диаметру, близкому внутреннему диаметру свариваемых труб 2, а его периферийная часть в виде шайбы остается вваренной между торцами.

**Инерционная сварка трением** — этот способ запатентован фирмой Caterpillar Tractor Co (США) в 1962 г. Принцип инерционной сварки основан на использовании энергии, накопленной вращающимся маховиком, которая в процессе сварки преобразуется в теплоту. Шпиндель с насаженным на него маховиком заданной массы (рис. 245) разгоняют, затем привод отключают, а заготовки сжимают с заданным усилием. Сварка заготовок завершается в момент остановки шпинделя. В японском варианте инерционной сварки трением маховик устанавливают на шпинделе с закрепленной в нем неподвижной заготовкой, а вторую заготовку закрепляют в

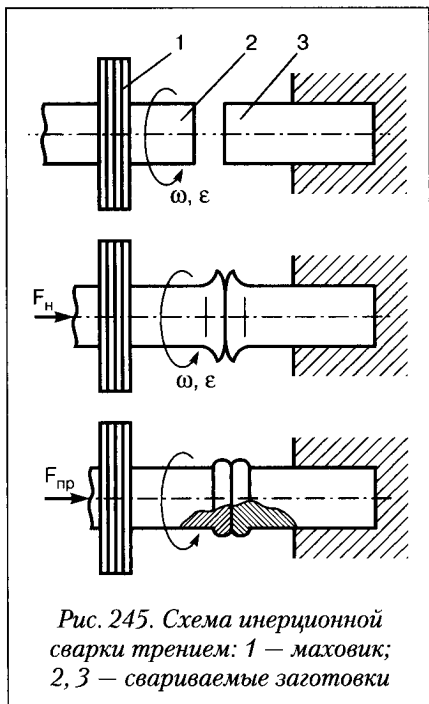


Рис. 245. Схема инерционной сварки трением: 1 — маховик; 2, 3 — свариваемые заготовки

оснащенном приводом шпинделе и сообщают ей вращательное движение. При сжатии заготовок силы трения разгоняют шпиндель с маховиком. Момент выравнивания угловых скоростей заготовок соответствует завершению процесса сварки. Преимуществом этого варианта является легкое удаление грата.

В качестве достоинств инерционной сварки трением следует отметить [342–346]:

- сокращение времени нагрева в несколько раз по сравнению с временем нагрева при конвенционной сварке трением;
- строгое дозирование энергии, затрачиваемой на сварку;
- расширение числа свариваемых сложных композиций материалов с резко отличающимися теплофизическими свойствами, а также улучшение свойств соединения при сварке сложных композиций материалов.

К основным недостаткам инерционной сварки относятся:

- усложнение конструкции машин за счет использования дополнительных маховиков, вращающихся с большими скоростями;
- применение дополнительной операции смены маховиков при перестройке режима сварки;
- ужесточение условий работы упорных подшипников машин.

Способ **комбинированной сварки трением** сочетает преимущества способов конвенционной и инерционной сварки. Вначале сварку выполняют с постоянной угловой скоростью, а затем привод отключают. Отрицательное угловое ускорение при этом должно быть таким, как и при инерционной сварке трением. Для этого снижают скорость вращения шпинделя (см. рис. 242, способ 3Б). Перспективным считают способ 3В, при котором предварительный нагрев осуществляют по способу 1, затем привод отключают и в

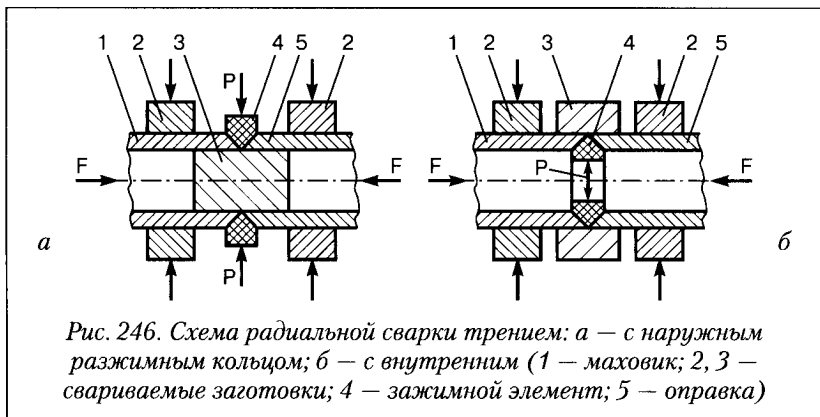


Рис. 246. Схема радиальной сварки трением: а — с наружным разжимным кольцом; б — с внутренним (1 — маховик; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — зажимной элемент; 5 — оправка)

дальнейшем процесс протекает так же, как и при инерционной сварке трением. При достижении шпинделем частоты вращения  $6-5 \text{ с}^{-1}$  его «мгновенно» останавливают.

В 1966 г. Британским институтом сварки был разработан способ радиальной сварки трением (рис. 246). Для выполнения радиальной сварки трением торцы труб со скошенными кромками прижимают друг к другу с определенным усилием, затем их нагревают с помощью внутреннего или наружного секционного разжимного кольца, вращающегося с заданной угловой скоростью. После торможения осуществляют проковку шва. Однако этот способ из-за сложности конструкции и технологии не нашел широкого промышленного применения.

Схема выполнения **вибрационной сварки трением** показана на рис. 247. Сварку выполняют при колебательных

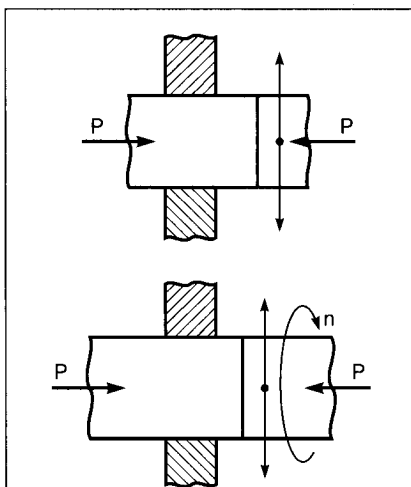


Рис. 247. Схема вибрационной СТ: а — колебательные движения одной свариваемой детали относительно другой; б — колебательные движения одной свариваемой детали с вращением

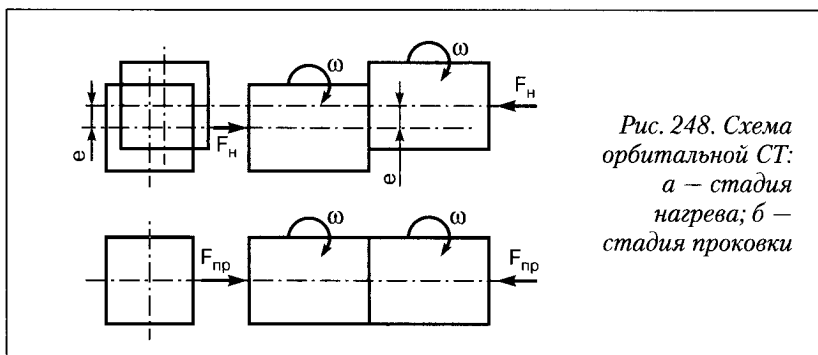


Рис. 248. Схема орбитальной СТ:  
 а — стадия нагрева; б — стадия проковки

движениях в области трения одной из свариваемых деталей относительно другой с небольшой амплитудой и частотой порядка десятков герц (а). Этот способ применяют для сварки пластмасс. При варианте «б» выполняют сварку при возвратно-поступательном движении одной вращающейся заготовки.

Основным преимуществом способа вибрационной сварки трением является возможность соединения двух взаимно сориентированных деталей, деталей с произвольным профилем сечения, а также возможность одновременной сварки на одной машине нескольких пар однотипных деталей. Основные недостатки указанного способа — сложность выполнения, невозможность сварки тонкостенных деталей, значительный шум при работе машины.

В 1971 г. фирмой Friction Welding Co был разработан способ **орбитальной сварки трением** (рис. 248). Суть способа заключается в том, что подвижную деталь без вращения перемещают по круговой орбите относительно неподвижной детали. После нагрева поверхностных слоев эксцентриситет  $e$  уменьшают до нулевого значения и выполняют проковку шва.

Орбитальная сварка трением позволяет сваривать заготовки, имеющие сечение произвольной формы, при одинаковом относительном перемещении всех точек контактных поверхностей, обеспечивая тем самым равномерный нагрев в зоне соединения. К недостаткам орбитальной сварки относят сложную конструкцию машин и ненадежность зажимных устройств вследствие действия на них значительных инерционных сил.

Способ **роликовой сварки трением** (рис. 249) разработан фирмой Gook Technologies (Великобритания). При выполнении сварки этим способом к сжатым заготовкам из листового материала подво-

дят ролик, вращающийся с угловой скоростью 1600 рад/с. Скорость его перемещения относительно свариваемых заготовок составляет 0,1–2,0 мм/с. Удельное усилие на ролик 0,2–0,5 МПа. Вращающийся ролик за счет трения инициирует выделение тепловой энергии и генерирует ультразвуковые колебания, способствующие разрушению оксидных пленок. Применение роликовой сварки перспективно для соединения тонколистовых материалов.

Способ **сварки трением с перемешиванием** (СТП, английский эквивалент FSW) был запатентован Британским институтом сварки в 1991 г. Отличительной особенностью способа (рис. 250) является использование специального вращающегося инструмента с утолщенной частью — заплечиком (буртом) и выступающей частью — штырем (стержнем). Вращающийся штырь погружают в свариваемые детали, при этом в результате трения выделяется теплота, а металл переходит в тестообразное состояние [350–353]. После этого инструмент, перемещаясь, образует непрерывный шов.

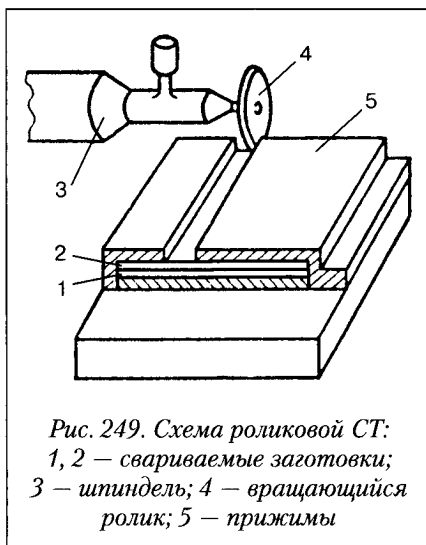


Рис. 249. Схема роликовой СТ:  
1, 2 — свариваемые заготовки;  
3 — шпиндель; 4 — вращающийся ролик; 5 — прижимы

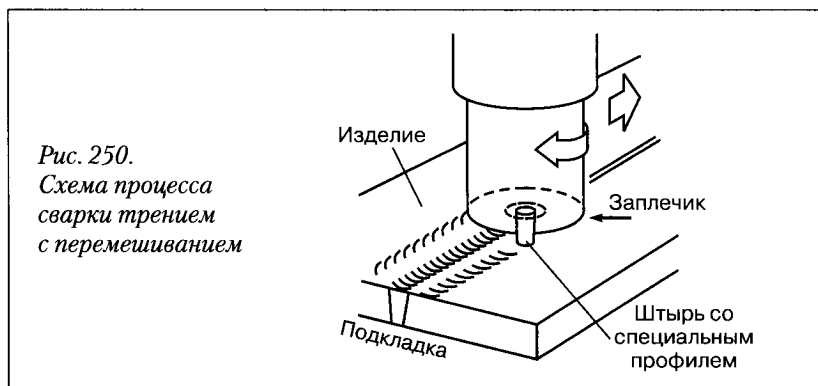


Рис. 250.  
Схема процесса сварки трением с перемешиванием

**Особенности процесса сварки трением при вращающихся заготовках.** На контактных поверхностях при сварке трением происходят следующие процессы: удаление загрязнений; изнашивание приповерхностных слоев заготовок; разрушение оксидных пленок; пластическое течение металла; упрочнение и разупрочнение поверхностных слоев; быстрый нагрев и охлаждение, вызывающие фазовые превращения; перенос металла с одной заготовки на другую и образование между контактными поверхностями твердых «клиньев», сформированных из срезанных микронеровностей и имеющих тенденцию к росту за счет переноса металла.

В результате взаимного наложения ряда названных выше явлений получается сложная картина течения конвенциональной сварки трением при кажущейся простоте этого способа. Циклограмма на рис. 251 [342] (вверху) показывает изменение во времени основных параметров процесса — частоты вращения  $n$  и осевого усилия  $F$ . Ниже показаны характерные кривые изменения во времени момента  $M(t)$ , потребляемой мощности  $N(t)$ , осадки (сближения свариваемых заготовок по мере

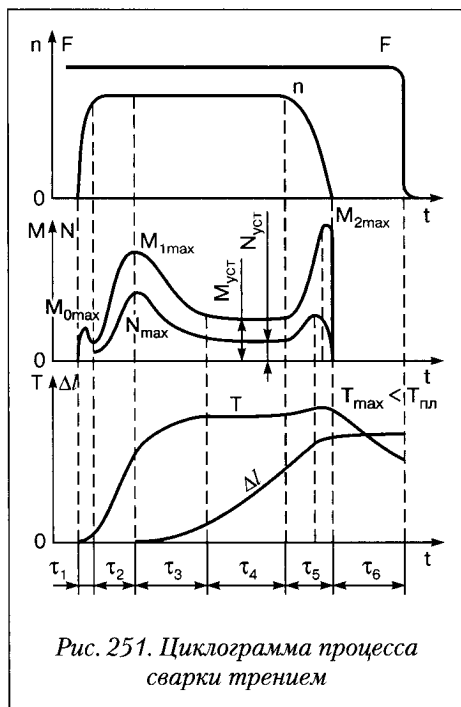


Рис. 251. Циклограмма процесса сварки трением

вытеснения из стыка пластифицированного металла)  $\Delta l(t)$ , а также температуры  $T(t)$ .

Весь процесс конвенциональной сварки трением делится на несколько временных фаз. В первой фазе ( $\tau_1$ ) происходит начальная притирка поверхностей, разрушаются жировые пленки, в контакт вступают отдельные микровыступы и начинается их деформация. Возникает сухое трение. С увеличением частоты вращения момент трения покоя  $M_{0\max}$  уменьшается.

Вторая фаза ( $\tau_2$ ) — лавинообразное увеличение числа взаимодействующих

микровыступов, увеличение фактической площади контакта, быстрый рост температуры  $T$  в стыке, снижение предела текучести металла и его сопротивления деформации. Момент трения к концу фазы достигает максимального значения ( $M_{1\max}$ ), появляется тонкий слой пластифицированного металла, выполняющего роль смазочного материала.

В третьей фазе ( $\tau_3$ ) происходит повышение температуры металла, спад момента трения и начинается образование грата. К концу третьей фазы температура в стыке достигает почти максимального значения, а момент трения, мощность тепловыделения и скорость осадки стабилизируются.

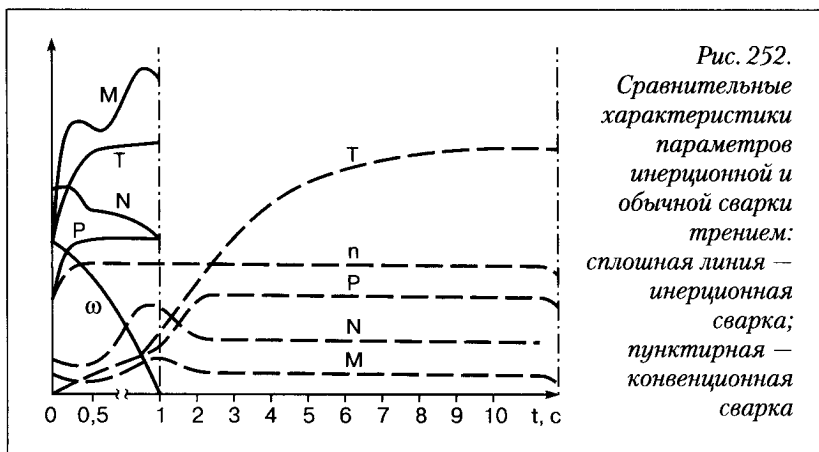
Четвертая фаза ( $\tau_4$ ) характеризуется квазистационарным течением процесса трения. При этом параметры процесса носят установившийся характер: момент трения ( $M_{уст}$ ), мощность тепловыделения ( $N_{уст}$ ), температура в стыке, скорость осадки. Контактные поверхности подготовлены к образованию сварного соединения.

Пятая фаза ( $\tau_5$ ) — торможение. Под влиянием уменьшения частоты вращения быстро нарастают коэффициент и момент трения ( $M_{2\max}$ ), менее интенсивно увеличивается мощность тепловыделения. В самом конце пятой фазы, когда частота вращения приближается к нулю, мощность почти мгновенно падает, начинается уменьшение температуры в стыке и образуется сварное соединение.

Шестая фаза ( $\tau_6$ ) — стадия проковки: образовавшееся соединение подвергают сжатию осевым усилием, которое в этой фазе либо остается на прежнем (как в стадии нагрева) уровне, либо может быть увеличено. Обычно стадия проковки длится несколько секунд, после чего сваренную деталь освобождают из зажимов машины, и далее соединение продолжает охлаждаться в естественных условиях.

Основным отличием инерционной сварки трением от конвенциональной является нагрев места сварки при спадающей частоте вращения шпинделя, что предопределяет технологические особенности этого процесса. На *рис. 252* приведены сравнительные характеристики параметров для конвенциональной и инерционной сварки трением [342]. Из показанных на рисунке зависимостей момента ( $M$ ), мощности ( $N$ ), давления ( $P$ ), угловой скорости ( $\omega$ ) и температуры ( $T$ ) как функций времени видно, что инерционная сварка трением отличается от конвенциональной более «жестким» режимом. Время выполнения инерционной сварки значительно меньше, а средняя удельная мощность тепловыделения несравненно больше, чем при





конвенционной, за счет чего сужается зона термического влияния и снижаются затраты энергии на образование сварного соединения.

В то же время к несомненному достоинству конвенционной сварки трением следует отнести возможность получения с ее помощью сварных соединений, строго регламентированных по длине. При инерционной сварке энергия, накапливаемая в маховике, строго дозированно передается свариваемым деталям, и осевые размеры соединений зависят от тщательности подготовки соединяемых поверхностей и от допусков на размеры внешнего диаметра заготовок.

Как уже упоминалось, машины для инерционной сварки потребляют из сети намного меньше электроэнергии, чем машины для конвенционной сварки, и отличаются более высокой производительностью. При инерционной сварке максимальная температура, как правило, не превышает температуры начала размягчения металлов, а пиковые температуры в стыке наблюдаются лишь в течение очень короткого времени. Эти особенности инерционной сварки дают возможность существенно расширить диапазон свариваемых материалов.

Применение комбинированного способа сварки трением (конвенционной и инерционной) является естественным направлением дальнейшего совершенствования этого процесса [342, 344].

**Свариваемость материалов.** Сваркой трением успешно соединяют не только многие однородные металлы и сплавы, но и материалы, резко отличающиеся по своим механическим и теплофизическим характеристикам, а также материалы, вступающие в процессе

совместного нагрева в химическое взаимодействие и образующие хрупкие интерметаллидные соединения.

С позиций свариваемости все материалы или пары материалов разделяют на три группы [342]: хорошо свариваемые материалы; условно свариваемые (соединение которых обеспечивается специальными конструктивными или технологическими мерами) материалы; материалы, не свариваемые даже с использованием дополнительных конструктивных или технологических мер.

Общая оценка свариваемости материалов различных групп конвенционной сваркой трением представлена на *рис. 253* [340].

Для получения соединения трудносвариваемых материалов применяют принудительное формирование соединений с помощью матриц. Несвариваемые материалы иногда удается соединить с помощью прослойки, хорошо сваривающейся с материалами обеих деталей, подлежащих соединению.

*Рис. 253. Систематизация материалов по группам свариваемости*

	Сплавы меди	Медь	Сплавы алюминия	Алюминий	Быстрорежущие стали	Аустенитные хромоникелевые стали	Мартенситные хромистые стали	Легированные улучшенные стали (C > 0,35%)	Легированные улучшенные стали (C ≤ 0,35%)	Легированные цементруемые стали	Нелегированные улучшенные стали (C > 0,35%)	Нелегированные улучшенные стали (C ≤ 0,35%)	Нелегированные цементруемые стали	Конструкционные стали (C > 0,35%)	Конструкционные стали (C ≤ 0,35%)
Конструкционные стали (C ≤ 0,35%)		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Конструкционные стали (C > 0,35%)		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Нелегированные цементруемые стали				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Нелегированные улучшенные стали (C ≤ 0,35%)		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Нелегированные улучшенные стали (C > 0,35%)				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Легированные цементруемые стали			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Легированные улучшенные стали (C ≤ 0,35%)					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Легированные улучшенные стали (C > 0,35%)					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Мартенситные хромистые стали							○	○	○	○	○	○	○	○	○
Аустенитные хромоникелевые стали								○	○	○	○	○	○	○	○
Быстрорежущие стали									○	○	○	○	○	○	○
Алюминий		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Сплавы алюминия			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Медь	○	○													
Сплавы меди	○	○													

X – хорошо свариваемые  
 ○ – условно свариваемые  
 □ – несвариваемые или не исследованные

Инерционный и комбинированные способы сварки трением позволяют существенно расширить диапазон групп свариваемых материалов.

Возможность получения при помощи сварки трением соединений большого ряда материалов, как одноименных, так и разноименных, позволяет эффективно использовать этот способ при изготовлении составных деталей из материалов с различными свойствами. Такие способы реализуют с целью замены дорогих и дефицитных материалов более простыми и дешевыми, а также для повышения долговечности и надежности деталей.

Потребность в изготовлении составных деталей из материалов разных марок по технико-экономическим соображениям во многих отраслях производства быстро возрастает.

**Технология сварки трением.** Особенности сварки трением определяют требования, предъявляемые к конструкции (форме) подлежащих сварке деталей, к их технологической подготовке, а также к механической и термической обработке сваренных соединений.

**Подготовка деталей для сварки.** При конструировании деталей, подлежащих сварке трением, рекомендуют выбирать их форму в зоне стыка в соответствии с формами, показанными на *рис. 254*. Следует также учитывать специфику закрепления свариваемых деталей в зажимах сварочной машины, а также назначение технологических припусков на основные размеры заготовки [340, 342].

При сварке особо ответственных элементов конструкций, разрушение которых при эксплуатации может быть опасно для людей и окружающей среды, а также может причинить большой материальный ущерб, рекомендуют выбирать такую форму заготовок в зоне стыка, которая по своим очертаниям и размерам была бы одинаковой у обеих свариваемых заготовок (*рис. 254, а, б, д-з, к, л, н, р-т*). Такую же подготовку выполняют, когда соединяемые детали работают в условиях динамических нагрузок или к ним предъявляются требования герметичности. Указанная выше подготовка обуславливает (при сварке деталей из одинаковых материалов) их симметричный нагрев и симметричную деформацию в процессе нагрева (трения) и проковки, а также создает оптимальные условия для образования прочного соединения. Как правило, выбор оптимальной формы подлежащих сварке деталей требует их предварительной механической обработки.

При сварке менее ответственных деталей, когда заготовки не требуют предварительной механической обработки, можно пользо-

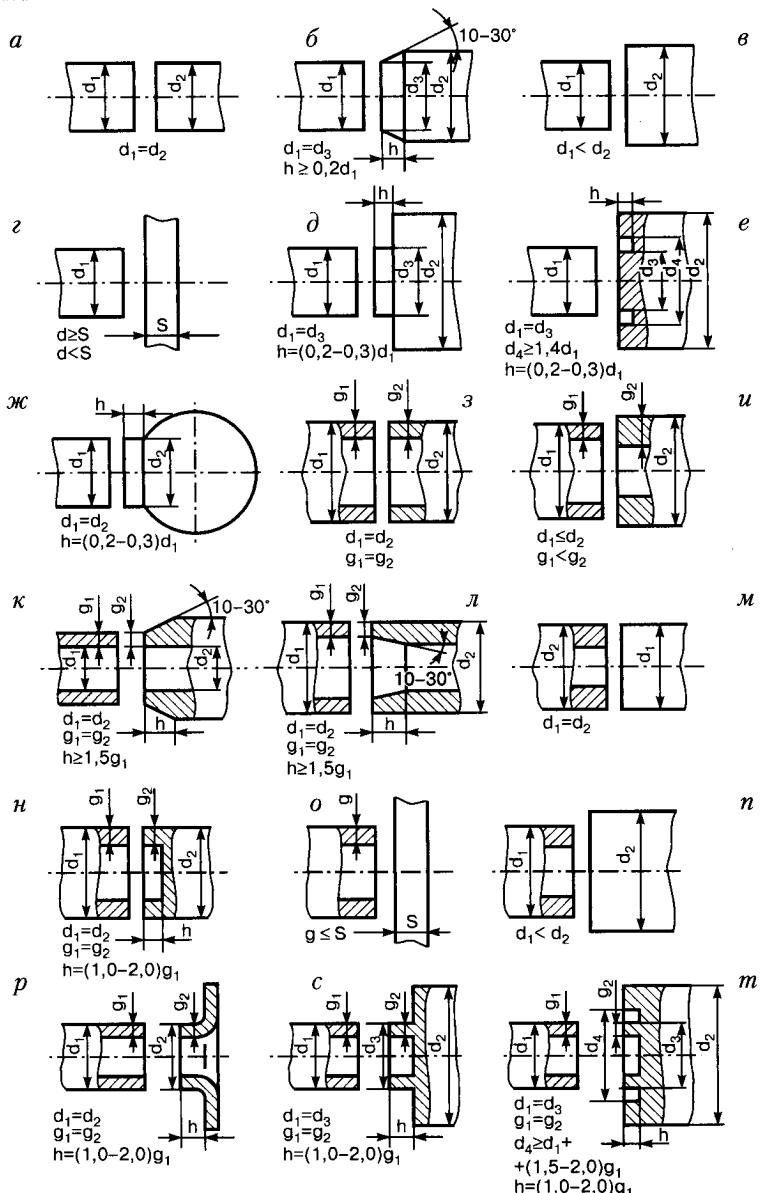


Рис. 254. Основные формы заготовок под сварку трением

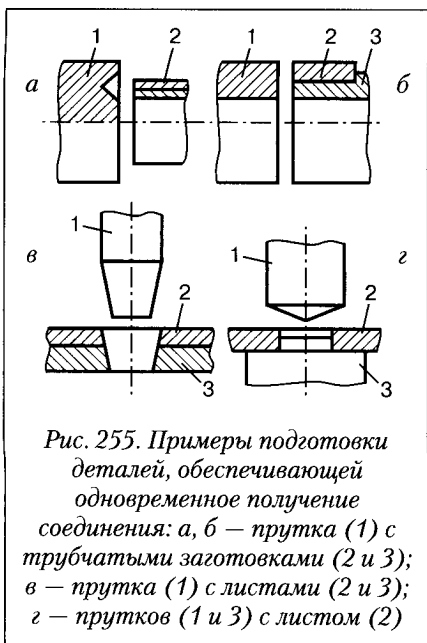


Рис. 255. Примеры подготовки деталей, обеспечивающей одновременное получение соединения: а, б — прутка (1) с трубчатыми заготовками (2 и 3); в — прутка (1) с листами (2 и 3); з — прутков (1 и 3) с листом (2)

ваться формами соединений в, з, и, м, о, п (рис. 254). В ряде случаев применяют и другие конструктивные решения подготовки деталей, отличающиеся от указанных на рис. 254 [342]. При одновременном выполнении соединения трех и более деталей подготовку выполняют согласно рис. 255, а при сварке деталей, изготовленных из материалов с различными физико-механическими свойствами, — согласно рис. 256.

Свариваемые поверхности деталей, подвергающиеся до сварки ковке, штамповке или термической обработке, должны быть очищены от окалины и облоя. При этом боковые поверхности деталей не требуют специальной очистки, если загрязнения не затрудняют установку деталей в зажимных устройствах сварочной машины.

В общем случае в связи с точной дозировкой вкладываемой в стык энергии подготовка свариваемых заготовок для инерционной сварки трением должна быть более тщательной, чем для конвенциональной сварки трением. При этом желательно, чтобы торцовые поверхности заготовок подвергались механической обработке.

В общем случае в связи с точной дозировкой вкладываемой в стык энергии подготовка свариваемых заготовок для инерционной сварки трением должна быть более тщательной, чем для конвенциональной сварки трением. При этом желательно, чтобы торцовые поверхности заготовок подвергались механической обработке.

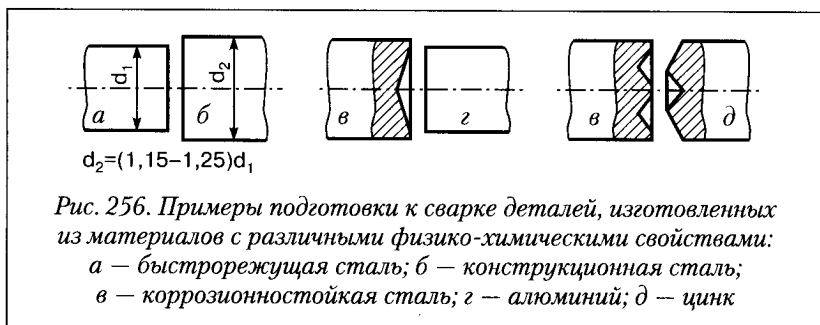


Рис. 256. Примеры подготовки к сварке деталей, изготовленных из материалов с различными физико-химическими свойствами: а — быстрорежущая сталь; б — конструкционная сталь; в — коррозионностойкая сталь; з — алюминий; д — цинк

Для устранения загрязнений, ржавчины, неровностей на торцах и получения качественных сварных соединений при инерционной сварке необходимо вкладывать дополнительную энергию. Поэтому если в условиях производства невозможно обеспечить хорошую подготовку торцов свариваемых деталей, то количество энергии для инерционной сварки необходимо выбирать с определенным запасом.

При инерционной сварке материалов, резко отличающихся по своим теплофизическим свойствам (сталь-алюминий, медь-алюминий и др.), требования к подготовке торцовых поверхностей резко возрастают. При сварке стали с алюминием для получения качественного сварного соединения шероховатость торцовой поверхности стального образца не должна превышать  $Ra \leq 3,2$  мкм [342].

На результаты конвенционной и инерционной сварки большое влияние оказывает удобное и надежное крепление деталей, гарантирующее невозможность их смещения в зажимах сварочной машины под действием вращения и осевого усилия.

Установка и крепление простых деталей, изготовленных из прутков, толстостенных (с толщиной стенки более 4 мм) труб, а также некоторых поковок и штамповок в типовых зажимах сварочных машин общего применения не представляет особых затруднений. Для крепления деталей сложной формы рекомендуют применять специальные зажимные устройства.

С целью обеспечения достаточной жесткости деталей и предотвращения в процессе сварки их деформирования, а также снижения при сварке вибраций необходимо, чтобы длина вылета заготовок из зажима машины не превышала рекомендованных значений (рис. 257) [342].

При выборе припуска на длину детали следует учитывать точность ее изготовления (допустимые погрешности при резке, торцовке и др.), величину суммарной осадки в процессе сварки, допустимую неточность осадки, а также вид обработки после сварки и заданный допуск на конечные размеры сваренной детали.

При расчете припуска на размер диаметра следует учитывать точность изготовления детали, точность узлов сварочной машины (в том числе зажимов для крепления свариваемых деталей), а также вид обработки после сварки и заданный допуск на конечные размеры сваренной детали.

Обычно при сварке типичных деталей (прутки, трубы, некоторые поковки и штамповки) принимаются припуски на длину —  $\Delta l + (1-4)$  мм, где  $\Delta l$  — суммарная осадка; на диаметр — 1–3 мм.

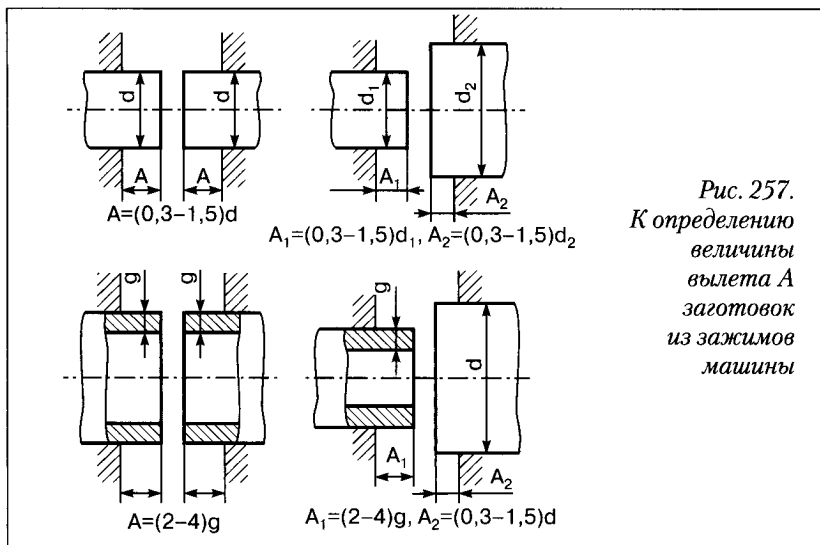


Рис. 257.  
К определению  
величины  
вылета  $A$   
заготовок  
из зажимов  
машины

При сварке длинных (более 400 мм) деталей, а также, когда сварная деталь содержит более одного соединения, технологические припуски должны быть больше и их устанавливают экспериментально.

Качество соединений, выполненных сваркой трением, в значительной мере определяется способом и точностью подготовки поверхностей, подлежащих соединению. В этом отношении наиболее высокие требования предъявляют к деталям особо ответственных элементов конструкции. Перед сваркой таких деталей с поверхностями, подлежащих соединению, должны быть удалены различного рода неровности, возникшие, например, в результате резки пилой, на токарном станке или ножницами. Также следует удалить покрывающие эти поверхности окалину, ржавчину, различные смазочные вещества. Требования к шероховатости соединяемых однородных поверхностей не предъявляются. Неперпендикулярность соединяемых поверхностей по отношению к боковым поверхностям свариваемых деталей в местах их крепления в зажимах сварочной машины не должна превышать значений, предусмотренных ГОСТ 26643–81.

При конвенционной и инерционной сварке непараллельность свариваемых поверхностей не должна превышать 0,122 рад [340], так как большая непараллельность может привести к эксцентricности сварного соединения, а также к повышенному износу машины.

Боковые поверхности деталей должны быть очищены от грязи, песка, масел и других веществ, которые могут оказать влияние на надежность и точность крепления свариваемых деталей в зажимах сварочной машины или вызвать помехи при эксплуатации этих зажимов.

**Режимы сварки.** Основными параметрами конвенционной сварки трением являются давление при нагреве  $P_H$ , давление проковки  $P_{пр}$ , время нагрева  $t_H$ , время проковки  $t_{пр}$ , частота вращения  $n$ , осадка при нагреве  $\Delta l_H$ , суммарная осадка  $\Delta l$  [340, 342].

Из приведенных выше параметров взаимозависимыми являются  $t_H$  и  $\Delta l_H$ . Процесс сварки трением можно регламентировать (ограничивать его длительность) либо по времени нагрева  $t_H$ , либо по величине осадки при нагреве  $\Delta l_H$ .

Регламентацию по времени рекомендуют, если линейные размеры заготовок имеют большие допуски, поверхности сопряжения обработаны со скосом, на них имеются заусенцы и пр.

Регламентацию по величине осадки применяют, если предъявляют высокие требования к размерам деталей. При этом на контактирующих поверхностях допускается наличие окислов, жировых пленок и т. п. В этих случаях регламентация по времени нежелательна.

Частоту вращения при сварке трением выбирают из следующих соотношений [342]:

для черных металлов

$$nd_s = (0,3-0,6) \cdot 10^3 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1} \quad (v \approx 1-2 \text{ м/с}); \quad (41)$$

для цветных металлов

$$nd_s = (0,6-0,75) \cdot 10^3 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1} \quad (v \approx 2 \text{ м/с}); \quad (42)$$

для титана

$$nd_s = (8-10) \cdot 10^3 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1} \quad (v \approx 4-5 \text{ м/с}). \quad (43)$$

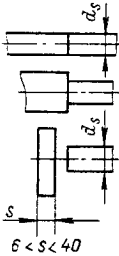
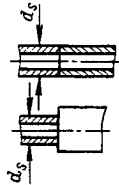
Здесь  $v = \pi \cdot d_s \cdot n \cdot 10^{-3}$  — окружная скорость;  $d_s$  — диаметр заготовки в месте сварки, мм.

Рекомендации по выбору давлений нагрева  $P_H$  и проковки  $P_{пр}$  для двух частот вращения  $n = 16,6 \text{ с}^{-1}$  и  $n = 6,6 \text{ с}^{-1}$  приведены в табл. 158.

Время нагрева  $t_H$  зависит от частоты вращения, давления нагрева, свойств свариваемых материалов, диаметра места соединения. При увеличении диаметра места соединения стержневых заготовок от 10 до 100 мм температура нагрева  $t_H$  возрастает с 5 до 120 с. При



**Таблица 158. Выбор давлений нагрева и проковки**

Вид соединения	Рекомендуемые параметры	
	Сплошной материал	
	$n = 16,6 \text{ с}^{-1};$ $d_s = 15-40 \text{ мм};$ $P_H = 30 \text{ МПа};$ $P_{\text{пр}} = (2-3)P_H$	$n = 6,6 \text{ с}^{-1};$ $d_s = 40-100 \text{ мм};$ $P_H = 50 \text{ МПа};$ $P_{\text{пр}} = (2-3)P_H$
	Трубчатые сечения	
	$n = 16,6 \text{ с}^{-1};$ $d_s = 15-60 \text{ мм};$ $P_H = 20-30 \text{ МПа};$ $P_{\text{пр}} = 2P_H$	$n = 6,6 \text{ с}^{-1};$ $d_s = 40-160 \text{ мм};$ $P_H = 50 \text{ МПа};$ $P_{\text{пр}} = 2P_H$
<p><i>Примечание. При <math>d_s &gt; 40</math> мм для мартенситных, хромистых, аустенитных и быстрорежущих сталей рекомендуются повышенные давления нагрева (<math>P_H = 80-120 \text{ МПа}</math> и <math>P_{\text{пр}} = (2-3)P_H</math>).</i></p>		

сварке трубчатых заготовок из конструкционных сталей с толщиной стенки более 10 мм, при увеличении диаметра места соединения  $d_s$  с 50 до 150 мм температура нагрева  $t_H$  уменьшается с 20 до 8 с.

Время проковки в зависимости от типа машины, материала, а также диаметра свариваемых заготовок обычно варьируется в пределах 1,5–5 с.

Суммарная осадка является важным параметром, по которому определяют длину подлежащих сварке заготовок и допуски на нее, длину сваренной детали, расход материала, объем грата, подлежащего обработке. По кривым на *рис. 258* может быть определена суммарная величина осадки [342]. Фактические значения осадки при одних и тех же режимах сварки могут варьироваться в зависимости от свойств свариваемых материалов, их термической обработки до начала сварки, геометрии заготовок и условий крепления их в зажимах (интенсивности теплоотвода через зажимы). Как правило, величина суммарной осадки и другие параметры режима уточняют экспериментально.

В *табл. 159, 160* приведены рекомендуемые режимы сварки трением сталей [342]. Приведенные значения соответствуют двухсту-

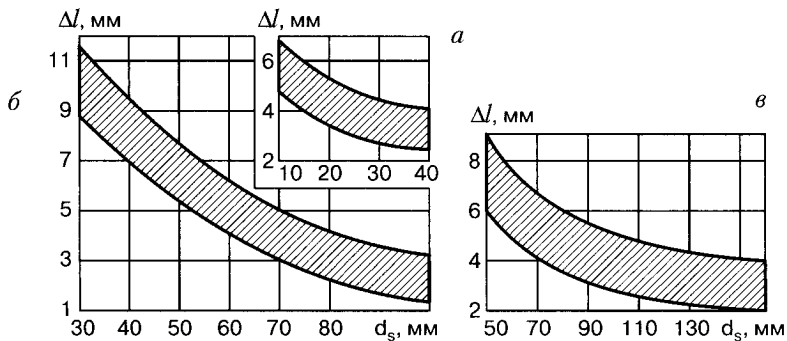


Рис. 258. Суммарная осадка при сварке трением стержневых заготовок из разных материалов при  $P_H = 30$  МПа;  $P_{пр} = 2P_H$ ;  $t_{пр} = 1,5$  с;  $n = 16,6$  с $^{-1}$  (а); при  $P_H = 50$  МПа;  $P_{пр} = 2P_H$ ;  $t_{пр} = 3$  с;  $n = 6,6$  с $^{-1}$  (б) и трубчатых – из материалов группы I.1 при  $P_H = 50$  МПа;  $P_{пр} = 2P_H$ ;  $t_{пр} = 3$  с;  $n = 6,6$  с $^{-1}$  (в)

**Таблица 159. Режимы сварки трением одноименных материалов**

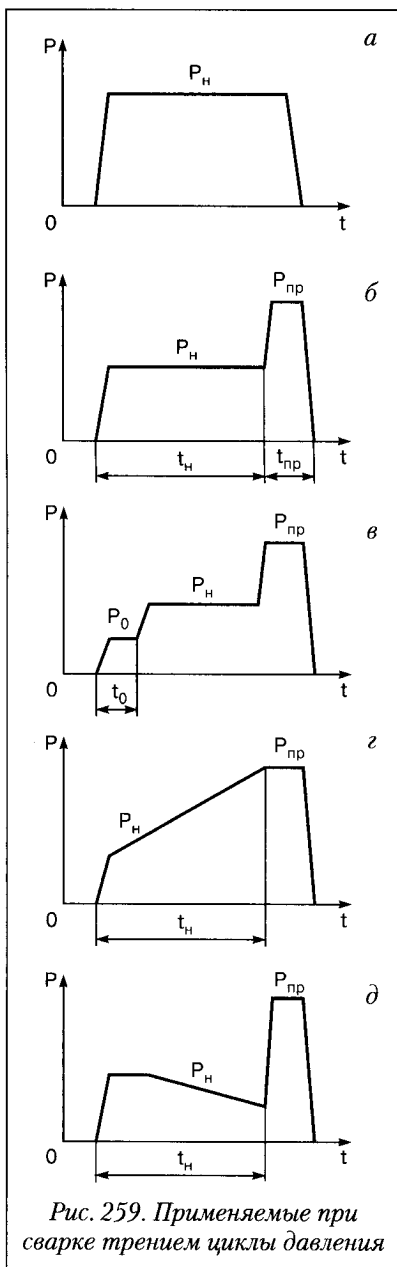
Класс (группа) стали	Марка стали	Диаметр заготовки, мм	Частота вращения, с $^{-1}$	Давление нагрева, МПа	Давление проковки, МПа	Величина суммарной осадки, мм	Время нагрева, с
Углеродистая обыкновенного качества	Ст3	20	25,0	50	50	5	5
	Ст3	40	16,6	100	100	12	20
	Ст5	16	25,0	50	50	5	4,5
	Ст5	85×7,5*	16,6	30	60	10	12
Углеродистая качественная	20	10	50,0	40	40	3	3
	20	20	16,6	50	100	3,5	6,5
	20	50	12,5	50	100	2,5	20
	20	70	8,3	50	100	1,5	30
	35	30	21,0	35	70	7	–
	35	160×15*	15,0	40	100	25	40
	45	10	50,0	40	40	5	4,5
	45	24	16,6	50	100	6	5
	15Г	20	25,0	50	100	5,5	6
	50Г	50×6*	16,6	30	60	5,5	7

Класс (группа) стали	Марка стали	Диаметр заготовки, мм	Частота вращения, с <sup>-1</sup>	Давление нагрева, МПа	Давление проковки, МПа	Величина суммарной осадки, мм	Время нагрева, с
Низколегированная конструкционная	60С2	20	16,6	70	140	5	10
	60С2А	20	25,0	50	100	6	10
	80С	14	16,6	90	180	8	4
	25Г2С	22	25,0	45	45	4	10
Легированная конструкционная	20Х	12	50,0	40	40	4	4
	20Х	20	16,6	50	120	6	8
	40Х	15	21,0	30	70	6	—
	40Х	20	16,6	60	120	5	8,5
	40ХН	12	50,0	40	80	4	4
	20ХНМА	20	16,6	100	220	7,5	7
	40ХНМА	25	16,6	100	100	4	8
	30ХГСА	10	25,0	80	80	5	2
	30ХГСА	25	16,6	80	160	5	5-6
38ХМЮА	10	25,0	120	120	4	3	
Высоколегированная коррозионно-стойкая	2Х13	20	16,6	100	200	5,5	6
	4Х13	10	25,0	120	120	3-4	3
	4Х9С2	12	50,0	40	80	3,5-4,0	3,5
	1Х17Н2	20	16,6	70	140	4,8	8-9
	1Х118Н9Т	18	16,6	70	170	5,0	8
	1Х18Н9Т	127×10*	15,0	50	170	17,0	30
Жаропрочная, теплоустойчивая	3Х19Н9МВБТ	20	16,6	120	240	5-6	11
	ХН35ВТЮ			120	240	5,5	16
				6	15		
	Х17Г9АН4			60	210	5	18
	10Х16Н25М6			110	220		15
20Х3МВФ	100	200					
Шарикоподшипниковая	ШХ15	25		50	140		11
Инструментальная	9ХС	30		100	200		15

\* Заготовки из труб.

**Таблица 160. Режимы сварки трением разноименных материалов**

<i>Свариваемые стали</i>	<i>Диаметр заготовок, мм</i>	<i>Частота вращения, с<sup>-1</sup></i>	<i>Давление нагрева, МПа</i>	<i>Давление проковки, МПа</i>	<i>Величина суммарной осадки, мм</i>	<i>Время нагрева, с</i>
20 + 30	20	16,6	50	100	5,7	7
20 + 45	20	16,6	50	100	5,0	10
15Г + 20	20	16,6	50	100	6,0	6,5
15Г + 45	20	16,6	50	150	5,0	7
50Г + 20	20	16,6	50	150	5,0	7
50Г + 45	20	16,6	50	150	5,0	7,5
20Х + 20	20	16,6	50	120	5,5	8
20Х + 45	20	16,6	50	120	5,0	8
40Х + 20	25	16,6	50	100	5,0	12
20ХНМА + 20	20	16,6	40	150	7,0	10
35Г2С + 40Х	54×5,5*	12,5	50	100	8,0	8
Х9С2 + 40Х	12	50,0	40	80	3,5	3,5
Х12М + 45	20	50,0	80	80	7,0	3
Х17Н2 + 40ХН	20	16,6	60	210	3,0	9
Х17Н2 + Х17Н13М2Т	20	16,6	60	210	4,0	4
1Х18Н9Т + 20	25	16,6	60	210	3,2	9
1Х18Н9Т + 45	20	50,0	80	80	7,0	4
1Х18Н9Т + 45	25	16,6	60	210	2,5	9
1Х18Н9Т + 40Х	25	16,6	60	210	4,0	9
1Х18Н9Т + 12ХМФ	25×2,5*	16,6	60	210	9,0	5
1Х18Н9Т + Х17Г9АН4	20	16,6	60	210	5,5	12
3Х19НМВТ + 40Х	20	16,6	60	210	2,5	9
33Х19Н9МВТ + ОХМ	20	16,6	60	210	2,0	10–14
ХН35ВТЮ + 20	20	16,6	60	210	2,5	9
ХН35ВТЮ + 50Г	20	16,6	70	210	4,0	12
ХН35ВТЮ + 40Х	20	16,6	60	210	3,5	10
ХН35ВТЮ + 20Х3МВФ	16	16,6	120	240	2,5	12
ХН35ВТЮ + 40Г	20	16,6	60	210	3,5	12
Х12Н20В + 40Г	20	16,6	60	210	3,5	12
20Х3МВФ + 40Г	20	16,6	60	210	5,0	5
20Х3МВФ + 40Х	20	16,6	60	210	5,5	5



пенчатому циклу изменения давления во времени (рис. 259, б). В неотчетливых случаях может быть использован простейший цикл давления (рис. 259, а), при котором  $P_{пр} = P_{н}$ .

В некоторых случаях с целью улучшения повторяемости свойств сварных соединений стадии нагрева предшествует «притирка», за время  $t_0$  которой происходит очистка поверхностей трения от однородных включений и сглаживание неровностей этих поверхностей. Такой цикл давления имеет трехступенчатую форму (рис. 259, в). Давление во время «притирки» может быть порядка  $0,5P_{н}$ .

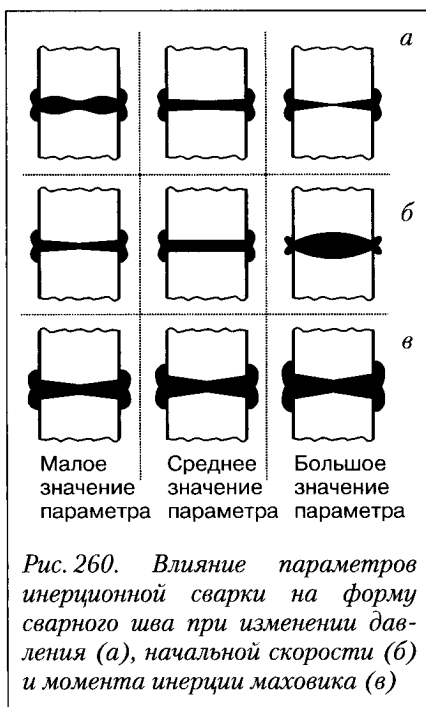
Для уменьшения начального момента трения во время нагрева или при использовании недостаточной мощности двигателя (например, при сварке заготовок большого сечения) применяют цикл давления, при котором нагрев начинается с малых усилий, а затем это компенсируется повышением давления (рис. 259, г).

Циклограмму (рис. 259, д) используют для минимизации мощности двигателя и уменьшения скорости осадки нагрева и суммарной осадки при ведении процесса в условиях несколько повышенных температур стыка, что можно выгодно использовать, например, при сварке заготовок режущего инструмента.

На течение инерционной сварки трением и ее результат оказывают значительное влияние основные параметры процесса: давление, прикладываемое к свариваемым заготовкам, начальная окружная скорость на периферии свариваемых заготовок и момент инерции маховика. Их варьирование влияет на форму кривой момента, мощность тепловыделения и температуру в стыке, а также на продолжительность образования сварного соединения.

На *рис. 260* приведены данные о влиянии давления, начальной окружной скорости и момента инерции маховика на форму сварных соединений и зону термического влияния применительно к сварке стальных образцов диаметром 25 мм [342]. При этом оптимальным для инерционной сварки можно считать значение давления нагрева в пределах между малым и средним его значениями (*рис. 260, а*). При низком давлении расширяется зона термического влияния, а при высоком — прогревается главным образом периферийная часть заготовок и возникает опасность образования центрального непровара. По данным фирмы «Катерпиллар Трактор Ко», приемлемыми считаются давления  $60 \leq P(\text{МПа}) \leq 130$ . Для различных материалов рекомендуемые значения давления  $P$  приведены в *табл. 161*.

Согласно *рис. 260, б*, от начальной окружной скорости в большой мере зависит распределение теплоты в стыке. Относительно равномерное тепловыделение соответствует среднему значению окружной скорости. При малых скоростях выделение теплоты сосредоточено в периферийной зоне, а при больших — в центральной части. Однако при сварке трубных заготовок имеет место обратная картина, т. е. с увеличением начальной окружной скорости макси-



*Рис. 260. Влияние параметров инерционной сварки на форму сварного шва при изменении давления (а), начальной скорости (б) и момента инерции маховика (в)*

**Таблица 161. Рекомендуемые значения осевого давления**

Наименование материала	Давление $P$ , МПа
Низкоуглеродистая сталь	110
Среднеуглеродистая сталь	130
Низколегированная сталь	140
Сверхпрочные сплавы	460
Мартенситностареющая сталь	185
Коррозионнотойкая сталь	170
Инструментальная сталь	370
Медь или латунь	47
Титан или его сплавы	76
Алюминий (СAA 1100)	55
Алюминий (AA 6061)	78

мальное тепловыделение в стыке смещается от центра (середина стенки трубы) к периферии (внешний и внутренний диаметр трубы).

Для свариваемых заготовок сплошного сечения из углеродистой стали оптимальными считают начальные окружные скорости, лежащие в пределах  $2 \leq v \leq 4$ , а для трубных заготовок из легированной и углеродистой конструкционной стали этот диапазон  $5 \leq v \leq 7$ .

Как следует из *рис. 260, в*, момент инерции маховика не оказывает влияния на форму образующегося сварного соединения. Рост момента инерции приводит лишь к увеличению объема металла, выдавливаемого в грат, и времени сварки. При этом необходимо отметить, что увеличение времени сварки во многих случаях нежелательно и может существенно повлиять на качество сварного соединения, особенно при сочетании материалов с резко отличающимися теплофизическими свойствами. Чрезмерный рост объема металла, выдавливаемого в грат, также нежелателен. Значения конкретного момента инерции маховика, начальной окружной скорости и давления уточняются экспериментальным путем после получения соответствующих ориентировочных расчетов по приведенной ниже методике.

Кинетическая энергия  $W_k$ , накапливающаяся во вращающихся частях машины, может быть выведена из выражения

$$W_k = J_{\Sigma} \cdot \omega^2 / 2, \quad (44)$$

где  $J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции, состоящий из моментов инерции маховика и присоединенных к нему вращающихся частей машины (свариваемой детали, зажимного устройства, шпинделя, якоря приводного двигателя и т. д.),  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega$  — начальная угловая скорость вращения,  $\text{рад}/\text{с}$ .

С другой стороны, зная диаметр свариваемых заготовок, требуемое значение кинетической энергии можно определить по формуле

$$W_{\text{к}} = \omega_{\text{уд}} \cdot S, \quad (45)$$

где  $\omega_{\text{уд}}$  — требуемая для сварки удельная энергия,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ ;  $S$  — площадь поперечного сечения свариваемой заготовки,  $\text{м}^2$ .

Опираясь на данные ИЭС им. Е. О. Патона, ориентировочные значения удельной энергии для различных материалов приведены в *табл. 162*. Выбрав нужное значение удельной энергии  $\omega_{\text{уд}}$ , определяют кинетическую энергию  $W_{\text{к}}$ .

Начальную угловую скорость можно рассчитать по выражению

$$\omega = 2v/d, \quad (46)$$

где  $v$  — начальная линейная (окружная) скорость на периферии свариваемых заготовок,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $d$  — диаметр свариваемых заготовок,  $\text{м}$ .

Подставив найденные значения  $W_{\text{к}}$  и  $\omega$  в формулу (44), получим

$$J_{\Sigma} = 2W_{\text{к}}/\omega^2. \quad (47)$$

Если полученное значение момента инерции  $J_{\Sigma}$  окажется больше максимального значения суммарного момента инерции машины, следует соответствующим образом увеличить начальную угло-

**Таблица 162. Значения удельной энергии**

<i>Наименование материала</i>	<i>Удельная энергия <math>\omega_{\text{уд}}</math>, МДж/м<sup>2</sup></i>
Низкоуглеродистая сталь	50
Среднеуглеродистая сталь	70
Низколегированная сталь	60–70
Сверхпрочные сплавы	130–140
Мартенситностареющая сталь	100
Коррозионностойкая сталь	100–120
Титан и его сплавы	50–60
Алюминий и его сплавы	20–40



вую скорость  $\omega$  и наоборот. Таким образом, варьируя значения  $J_{\Sigma}$  и  $\omega$ , можно получить требуемое значение  $W_k$ .

Многолетняя практика применения конвенционной и инерционной сварки трением позволила накопить большой опыт промышленного использования сварки трением различных одноименных, а также разноименных материалов и сплавов [340, 342, 346–348].

Равнопрочные соединения получают при сварке одноименных низкоуглеродистой, среднеуглеродистой, низко- и среднелегированной сталей; хорошо сваривается жаропрочная сталь. Хорошо свариваются стали всех названных выше классов в различных сочетаниях между собой, а также быстрорежущая сталь марок P9 и P18 с конструкционной сталью марок 40 и 40X (и близких к ним). Хорошо свариваются алюминий со всеми его сплавами, медь, латунь и другие цветные металлы.

Однако определенные затруднения представляет сварка трением разнородных металлов и сплавов [342, 347, 348].

Главной отличительной особенностью сварки трением разнородных металлов и сплавов равно- и неравновеликого сечения является асимметрия температурного и деформационного полей, причина которой заключается в неодинаковой интенсивности отвода теплоты в заготовки из-за различных теплофизических характеристик свариваемых металлов и их механических свойств. При этом особые трудности представляет сварка материалов, вступающих при совместном нагреве в химическое взаимодействие и образующих переходный слой интерметаллидов, который резко ухудшает механические свойства соединений или вообще делает невозможной непосредственную сварку данных материалов.

При разработке технологии сварки трением в зависимости от сочетания материалов предъявляются различные требования к подготовке свариваемых поверхностей, выбору диапазона изменения параметров режима сварки и использованию различных технологических приемов, обеспечивающих оптимальные термические и деформационные условия для образования сварного соединения.

В качестве таких приемов следует выделить:

- различные варианты комбинирования конвенционной и инерционной сварки;
- наложение тангенциальных импульсов движения на вращающуюся заготовку;
- использование присадочного материала в виде промежуточной вставки или покрытий;

- предварительный подогрев более тугоплавкой заготовки;
- применение осадочной матрицы для более пластичной заготовки.

Последний прием эффективно используют при сварке быстрорежущей стали с конструкционной, аустенитной с углеродистой, стали с алюминием и др.

Осадочная матрица представляет собой (рис. 261) массивную шайбу, в отверстие которой при сварке помещают выступающий из невращающегося зажима конец заготовки из более пластичного материала [342]. Ориентировочные размеры матрицы:

$D = (3-5)d_s$ ,  $d_m = d_s + (1-2)$  мм,  $b = (0,75-1,25)d_s$ ,  $k = 1,5-3$  мм,  $\alpha = 30-45^\circ$  – зависят как от материала свариваемой заготовки, так и от ее диаметра  $d_s$ .

Так как в процессе работы матрица нагревается, то ее изготавливают из жаростойкой стали и дополнительно охлаждают в процессе работы.

Матрицу обычно устанавливают на торцевой стороне зажима невращающейся заготовки. В процессе сварки матрица предупреждает свободное радиальное течение пластичного материала и создает условия всестороннего сжатия в стыке при приложении осевого усилия (рис. 262).

Эффект всестороннего сжатия, аналогичный сварке с матрицей, может быть получен путем соединения неравновеликих заготовок. Для этого диаметр заготовки из более пластичного материала вы-

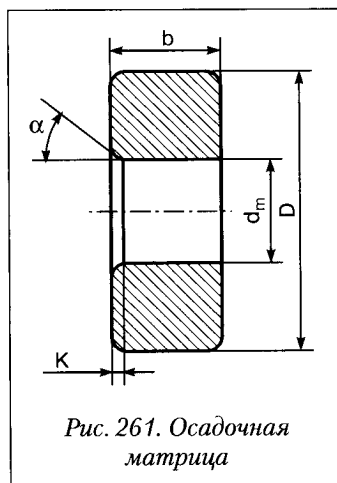
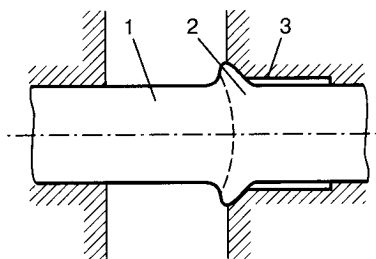


Рис. 261. Осадочная матрица

Рис. 262. Схема сварки детали, изготовленной из материалов с различными физико-химическими свойствами:

- 1 – быстрорежущая сталь;
- 2 – конструкционная сталь;
- 3 – осадочная матрица



бирают (если это допустимо по соображениям конструкции) на 20–50% больше диаметра другой заготовки. В процессе сварки более твердая заготовка внедряется в тело мягкой и вблизи поверхности трения к концу процесса нагрева образуются условия всестороннего сжатия и отсутствия радиальной деформации мягкой заготовки, как и при сварке с матрицей.

Следует отметить, что использование осадочной матрицы усложняет конструкцию и технологию сварки, а также увеличивает вероятность образования трещин в сварном соединении вследствие интенсивного теплоотвода.

В инструментальном производстве при изготовлении концевой металлорежущего инструмента широко применяют **сварку быстрорежущих сталей с конструкционными**. При этом рабочую часть инструмента изготавливают из высоколегированных сталей Р6М5, 02Р6М5, Р9, Р18, Р9К5, а хвостовую — из недорогих конструкционных сталей 45 и 40Х. Особые трудности получения качественного соединения этих сталей связаны с резким различием их химического состава и физико-механических свойств, что обуславливает склонность к образованию периферийного кольцевого непровара, дефектов «блестящие кольца» и переходного слоя, снижающего показатели механических свойств сварных соединений. Присутствие в стыке промежуточного слоя рассматривается как дефект соединения. Для получения соединения хорошего качества необходимо в процессе сварки промежуточный слой из стыка удалить в грат, что обеспечивается повышенными давлениями нагрева и в особенности проковки.

Торцы заготовок концевой инструмента, подлежащих сварке, должны иметь одинаковый диаметр. Допускаемая разница диаметров не более 3 мм. Рекомендуется на торце большего диаметра протачивать шейку длиной 2–3 мм. Торцевое биение заготовки из быстрорежущей стали не должно превышать 0,1 мм, торцевое биение заготовки из конструкционной стали — 0,5 мм.

Сварку трением заготовок режущего инструмента следует выполнять с применением осадочной матрицы.

Разработана технология комбинированной сварки трением концевой инструмента, позволяющая с помощью инерционного завершения нагрева обеспечить удаление в грат переходного слоя и значительно снизить вероятность появления дефектов [347]. После соответствующей термообработки обеспечиваются показатели механических свойств сварных соединений на уровне показателей свойств конструкционной стали.

Для изготовления деталей гидравлических систем (корпусов гидроцилиндров, шток-поршней, плунжеров, валов аксиально-поршневых машин), рабочие части которых выполнены из легированных высокопрочных сталей марок 12ХН2А, 30ХГСА, 35ХГСА, 30ХГСН2А, 38Х2МЮА, 25Х5М, применяют сварку трением с заготовками меньшего диаметра (тавровые соединения) из сталей марок 45, 40Х. При этом качество получаемых соединений во многом зависит от начальных условий сварки и в первую очередь от перпендикулярности торца детали из высокопрочной стали.

Эффективным способом, позволяющим повысить стабильность качества соединений, является комбинированная сварка трением, при которой заготовка начинает нагреваться как при конвенционной сварке трением, а затем привод отключается и конвенционная сварка заменяется инерционной, которая завершает процесс [347, 348].

При изготовлении роторов турбокомпрессоров, клапанов двигателей внутреннего сгорания и других изделий возникает необходимость **сварки жаропрочных сталей с конструкционными**. Колеса роторов турбокомпрессоров изготавливают из аустенитной жаропрочной стали 14Х20Н25В5М, а валы — из перлитной стали 40Г. Получение качественных соединений обеспечивается применением инерционной сварки со ступенчатым изменением давления при нагреве [347, 348]. На первом этапе при повышенных частотах вращения и низком осевом усилии равномерно нагревают свариваемые поверхности перлитной и аустенитной сталей, а на втором — при повышенном осевом усилии формируется сварное соединение.

Тарелки клапанов изготавливают из сталей с высокими жаропрочными и антикоррозионными свойствами (45Х14Н14В2М, 55Х20Г9АН4), а штоки — из сталей с высокой теплопроводностью (40Г, 40Х9С2). Проблемы сварки таких материалов — образование периферийного кольцевого непровара, высокая вероятность появления закалочных трещин, необходимость проведения термообработки непосредственно после сварки.

Установлено, что при инерционной сварке за счет изменения осевого усилия по определенной программе удастся регулировать термический цикл таким образом, чтобы исключить образование дефектов и избежать возникновения хрупких закалочных структур [347, 348].

При изготовлении электротермического оборудования возникает необходимость **сварки биметаллических переходников «сталь-медь»**. Особенностью сварки трением такого сочетания состоит в том, что при нагреве один из материалов (сталь) практически не

деформируется, а вся осадка осуществляется за счет другого (меди). Поэтому к подготовке свариваемых поверхностей предъявляются достаточно жесткие требования.

Одной из проблем, возникающих при сварке стали с медью, является вероятность образования мартенситной структуры в ЗТВ стали.

Путем соответствующего выбора параметров режима можно добиться получения соединений с достаточно узкой ЗТВ, имеющей ферритно-мартенситную структуру, которая практически не влияет на пластические свойства соединений. Для обеспечения оптимальных условий формирования соединений ряда сочетаний «сталь-медь» используют осадочную матрицу, которую устанавливают со стороны медной заготовки [347].

Трудности при получении качественного соединения алюминия со сталью связаны с резким различием их физико-механических свойств и химическим взаимодействием, приводящим к образованию хрупкой интерметаллидной прослойки. Избежать охрупчивания стале-алюминиевых соединений удастся в тех случаях, когда толщина интерметаллидной прослойки не превышает 1 мкм.

Определено оптимальное сочетание параметров режима сварки — давления, скорости вращения и времени нагрева, исключающих появление хрупкой составляющей в стыке.

Способом сварки трением с использованием промежуточных прослоек успешно соединяют трудносвариваемые пары материалов: антифрикционная бронза — сталь, сталь-титан, сталь-ниобий, металл-керамика и др.

**Механические характеристики сварных соединений.** Механические свойства сварных соединений, выполненных сваркой трением, зависят от структуры металла стыка и зон термического влияния, а также макроскопических дефектов шва и режима сварки. В соединении, выполненном сваркой на оптимальных режимах, нет раковин, пор, неметаллических включений и пленок окислов.

Характер образующейся структуры металла стыка определяется свойствами основного металла, способом предыдущей обработки заготовок, подлежащих сварке, и термической обработкой, которой подвергаются заготовки до и после сварки. В подавляющем большинстве случаев у правильно выполненного соединения механические свойства близки к механическим свойствам основного металла [340–343].

**Контроль качества сварных соединений.** Качество сварного соединения и сварного узла в целом зависит от ряда факторов:

- качественной подготовки к сварке;
- правильности определения параметров режима сварки;
- качества настройки оборудования на заданный режим;
- стабильности работы оборудования;
- надежности работы отдельных приборов и механизмов.

Влияние различных факторов на качество сварного соединения раскрыто в *табл. 163*.

<b>Таблица 163. Факторы, влияющие на качество сварных узлов при сварке трением</b>			
<i>у: Фактор влияния</i>	<i>Влияние данного фактора на качество</i>	<i>Возможные дефекты сварочного узла</i>	<i>Способы предотвращения (уменьшения) влияния данного фактора на качество</i>
<b>I. ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К СВАРКЕ</b>			
Большие скосы на торцах	Увеличивается с увеличением твердости свариваемого материала	Непровар (преимущественно серповидный)	Контроль нагрева по времени, корректировка времени нагрева в зависимости от величины скоса
	Вызывает значительную осадку при нагреве	Смещение и перекос осей деталей	Применение надежных зажимных механизмов и достаточно жестких узлов крепления сварочного оборудования. Подрез торцов перед сваркой на токарном станке
Значительные заусенцы, выступы в центре (от резки)	Аналогично скосам, но в меньшей степени		
Загрязнение на торцах:			
окалина	Значительное	Непровар	Очистка механическим способом
пыль от галтовки (в углублениях торцов)			
различные смазки			Меньше с увеличением скорости
Загрязнение цилиндрических поверхностей, соприкасающихся с зажимами	Вызывает проворачивание деталей в зажимах, если загрязнения значительные	Задиры на поверхностях деталей	Принудительное крепление деталей
		Непровар (при значительных задирах)	Применение различных насечек на поверхностях зажимов
		Выход из строя зажимов	Очистка деталей перед сваркой

Фактор влияния	Влияние данного фактора на качество	Возможные дефекты сварочного узла	Способы предотвращения (уменьшения) влияния данного фактора на качество
Изменение длины свариваемых деталей	Вызывает изменение вылета деталей из зажимов	Непровар	Контроль вылета деталей перед сваркой шаблонами или универсальным измерительным инструментом
		Смещение и перекося осей деталей	Контроль длины деталей (если установка их ведется по упорам)
Изменение размеров или искажение формы сечения (например, эллиптичность круглых деталей)	Вызывает проворачивание деталей в зажимах	Смещение и перекося осей деталей	Применение специальных зажимов. Механическая обработка деталей перед сваркой
<b>II. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА СВАРКИ</b>			
Изменение вылета деталей из зажимов:			
значительное уменьшение	Полное использование рабочего хода механизма осевого усилия до окончания нагрева торцов	Непровар	Проверка надежности крепления упоров. Проверка вылета деталей из зажимов
значительное увеличение	Ухудшает качество стыка. Большое при наличии сколов на торцах	Смещение и перекося осей деталей	Проверка вылета деталей из зажимов
Изменение скорости вращения деталей	Ухудшает качество стыка	Непровар	Контроль исправности привода вращения и тормоза

Продолжение таблицы 163

Фактор влияния	Влияние данного фактора на качество	Возможные дефекты сварочного узла	Способы предотвращения (уменьшения) влияния данного фактора на качество
Значительное изменение осевого усилия при нагреве:			
меньше	Ухудшает качество более чем на 20%	Непровар	Контроль за давлением в цилиндрах механизма осевого усилия
		Снижение ударной и усталостной прочности	Установка блокирующих устройств (реле давления)
больше		Увеличение осадки и, как следствие, длины сварного узла. Уменьшение времени нагрева, непровар	
Значительное изменение осевого усилия при проковке:			
меньше	Ухудшает качество более чем на 20%	Непровар	Установка блокирующих устройств (реле давления)
больше		Увеличение осадки и, как следствие, длины сварного узла	
Изменение времени проковки:	При правильной настройке реле времени (любого класса точности) практически не влияет на качество	Дефекты маловероятны	—
меньше	Снижает качество соединения	Непровар, снижение ударной и усталостной прочности	Проверка правильности настройки реле. Контроль времени за правильностью хода цикла сварки
больше	На качество не влияет	Дефекты отсутствуют	—



Продолжение таблицы 163

Фактор влияния	Влияние данного фактора на качество	Возможные дефекты сварочного узла	Способы предотвращения (уменьшения) влияния данного фактора на качество
Изменение времени нагрева:	При правильной настройке реле времени (любого класса точности) практически не влияет на качество	Дефекты маловероятны	—
уменьшение	Снижение качества соединения	Непровар	Проверка правильности настройки реле. Контроль времени за правильностью хода цикла сварки
увеличение		Перегрев металла стыка	
Осадка при нагреве:	Качество зависит от точности работы механизма контроля осадки	Дефекты маловероятны	—
меньше	Снижение качества соединения	Непровар	Проверка правильности настройки механизма контроля осадки
больше		Перегрев металла стыка	Контроль за стабильностью его работы (по величине грата)
		Увеличение времени сварки	Проверка надежности крепления деталей в зажимах

Для обеспечения требуемого качества сварного узла в целом необходим контроль на всех стадиях его изготовления.

Контрольные операции в порядке последовательности их выполнения подразделяют на предварительные, текущие и послеоперационные.

При предварительном контроле проверяют:

- наличие необходимой технической документации;
- знание сварщиком правил работы на сварочном оборудовании;
- исправность сварочного оборудования и необходимого инструмента;
- правильность настройки оборудования на заданный режим;
- качество подготовки деталей к сварке.

Текущий контроль включает:

- постоянное наблюдение за исправностью и правильностью срабатывания всех узлов и механизмов оборудования;
- проверку качества подготовки свариваемых торцов деталей перед установкой в зажимы;
- постоянное наблюдение за сохранением заданных параметров режима сварки;
- внешний осмотр сварного стыка непосредственно после сварки.

Послеоперационный контроль (контроль готового узла) заключается в проверке качества сварного соединения, размеров и формы узла, а также поверхностей деталей. В зависимости от условий работы узла могут применять как неразрушающие методы контроля сварных соединений, так и разрушающие. К неразрушающим методам относятся внешний осмотр, сравнение с эталоном, ультразвуковая дефектоскопия, магнитный и рентгенографический методы, контроль параметров режима сварки.

Одним из наиболее распространенных методов является внешний осмотр. При достаточном навыке этим методом можно с большой точностью определять качество сварного соединения по форме и размеру графа. Разновидностью внешнего осмотра является сравнение с эталоном. Эталоны сварного соединения выбирают при отработке режима после всех необходимых испытаний и исследования сварного соединения образцов или готовых узлов.

Магнитный и рентгеновский методы применяют редко.

Ультразвуковую дефектоскопию применяют для выборочного или 100%-ного контроля ответственных сварных узлов во всех случаях, когда конструкция узла позволяет использовать данный метод контроля. Допускается проведение контроля без удаления графа, однако в некоторых случаях необходимо снятие графа со сваренной детали [342].

Наиболее оперативным и достаточно точным неразрушающим методом контроля качества сварки является контроль параметров сварки, который подразделяют на пассивный и активный.

Пассивный контроль заключается в измерении на протяжении процесса сварки основных параметров режима [361]. При отклонении контролируемого параметра от заданного допуска срабатывает специальное устройство, подающее звуковой или световой сигнал, а в некоторых случаях — команду на прекращение работы машины. Таким образом может выполняться отбраковка дефектных деталей. При необходимости может выполняться запись изменения основ-

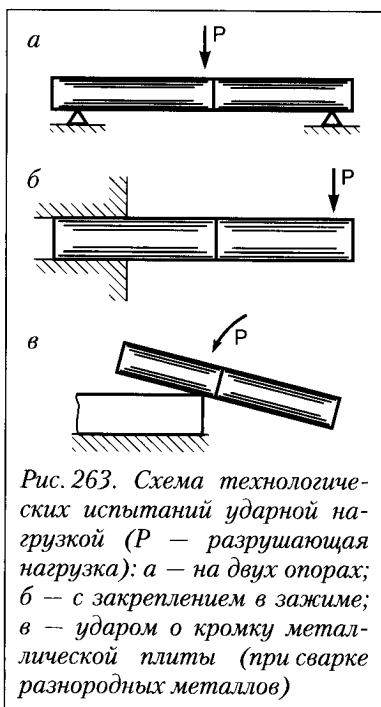


Рис. 263. Схема технологических испытаний ударной нагрузкой ( $P$  — разрушающая нагрузка): а — на двух опорах; б — с закреплением в зажиме; в — ударом о кромку металлической плиты (при сварке разнородных металлов)

ных параметров сварки во времени. При значительных отклонениях параметров производят переналадку машины.

При активном контроле процесса сварки трением регуляторы с обратными связями автоматически поддерживают параметры сварки с заданной точностью. Благодаря этому повышается стабильность качества соединений.

Из разрушающих методов контроля соединений, выполненных сваркой трением, наиболее распространен метод технологической пробы. Схема испытаний деталей показана на рис. 263.

Технологическую пробу выполняют на сварных соединениях без снятия грата, если снятие грата не оговорено техническими требованиями на деталь. Технологическая проба позволяет вы-

явить макродефекты и относительную прочность стыка по сравнению с прочностью основного металла.

Механические испытания на растяжение, кручение и ударную вязкость являются основными при отработке режима. Эти испытания производят как на реальных узлах, так и на образцах, сварное соединение которых идентично реальному. Виды механических испытаний выбирают в зависимости от характера и величины нагрузок, действующих на сварное соединение при эксплуатации узла.

При выборе метода, объема и периодичности контроля руководствуются технологическими картами или техническими условиями на изготовление изделия.

**Послесварочная обработка.** К технологическим операциям, выполняемым после сварки, относится *удаление грата* и *термическая обработка*.

На неотвеченных деталях и деталях, предназначенных для эксплуатации в условиях статических нагрузок, удаление грата не обязательно. В остальных случаях грат после сварки подлежит уда-

лению. Удаление графа можно выполнять как на отдельном рабочем месте, так и непосредственно на сварочной машине. Обычно отдают предпочтение последнему способу, который позволяет удалять граф при высокой температуре, что ускоряет эту операцию и уменьшает износ режущего инструмента. Кроме того, нет необходимости в дополнительном оборудовании, а сварку и удаление графа выполняет один и тот же рабочий.

Существуют различные способы и устройства для удаления графа на сварочной машине [342].

В соединениях, выполненных сваркой трением, металл обычно имеет измельченную структуру, что предопределяет высокие механические характеристики соединения. Однако после сварки в ряде случаев применяют дополнительную термообработку.

Термический цикл сварки трением значительно более мягкий, чем при стыковой контактной сварке. В то же время на некоторых режимах конвенциональной и особенно инерционной сварки углеродистых и легированных сталей имеет место существенное повышение твердости сварного соединения, что может приводить к образованию трещин и даже разрушений. На рис. 264 показаны кривые распределения температуры в зоне соединения при конвенциональной и инерционной сварке трением стали 60 и распределение твердости в зоне сварки [342].

В то время как при конвенциональной сварке трением зона влияния температуры выше 873 К имеет ширину более 10 мм, при инерцион-

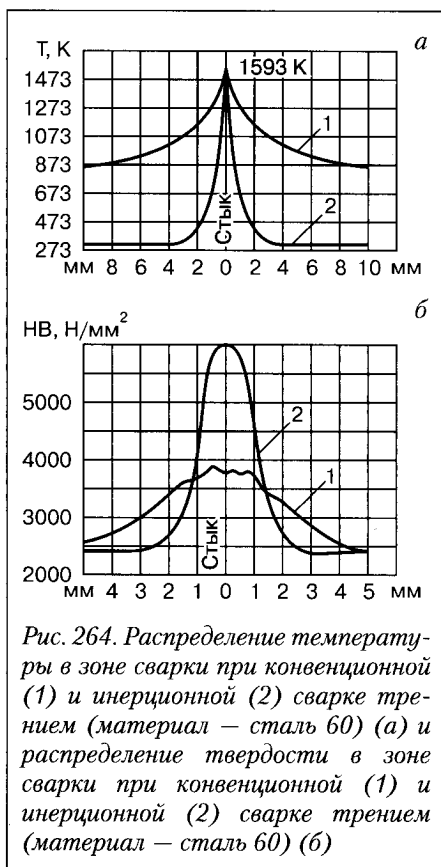


Рис. 264. Распределение температуры в зоне сварки при конвенциональной (1) и инерционной (2) сварке трением (материал — сталь 60) (а) и распределение твердости в зоне сварки при конвенциональной (1) и инерционной (2) сварке трением (материал — сталь 60) (б)

**Таблица 164. Режимы термической обработки  
свариваемых деталей**

<i>Марка свариваемых сталей</i>	<i>Вид термообработки</i>	<i>Температура нагрева, °С</i>	<i>Выдержка, мин</i>	<i>Способ охлаждения</i>	
Ст. 5	Нормализация	850–880	1 на 1 мм сечения	На воздухе	
45		840–870			
50Г2	Отжиг	810–850		В печи до температуры 500°С, окончательно — на воздухе	
60С2		750–760		В печи до температуры 600°С, окончательно — на воздухе	
18ХГТ	Нормализация + высокий отпуск	880–950		1 на 1 мм сечения	На воздухе
20Х	Нормализация	880–900			
40Х	Отжиг	830–860			
40ХНМА		840–880			В печи до температуры 500°С, окончательно — на воздухе
30ХГСА		840–860			
38ХМЮА	Отжиг	870–880		1 на 1 мм сечения + (60–120)	В печи до температуры 600°С, окончательно — на воздухе
38Х2МЮА		870–880			
70С2ХА		840–850	1 на 1 мм сечения + (90–120)		
ШХ15	790–810	В печи до температуры 650°С, окончательно — на воздухе			
45+20	Нормализация	870–880	1 на 1 мм сечения	На воздухе	
20Х+20		880–900			
20Х+45		870–880			
Х12М+45	Отжиг	870–880	1 на 1 мм сечения + (90–120)	В печи до температуры 650°С, окончательно — на воздухе	
ШХ15+20		810–850			
ШХ15+45		810–840			
40Х+20	Нормализация	860–880	1 на 1 мм сечения	На воздухе	

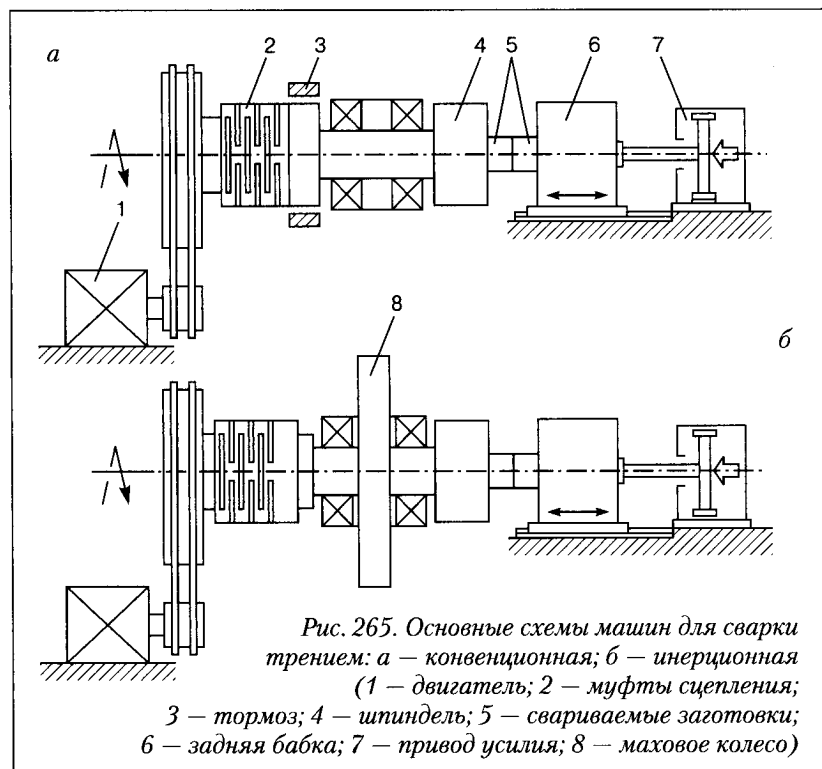
ной сварке эта зона шириной не более 1–3 мм. Аналогичные различия имеются и в распределении твердости (рис. 264, б).

В табл. 164 приведены режимы термической обработки сварных деталей из сталей, склонных к закалке при СТ.

При правильно выбранном режиме сварки и термической обработки прочность сварного соединения, как правило, соответствует прочности основного металла.

**Оборудование для сварки трением.** В зависимости от способа сварки трением машины разделяют на конвенционные, т. е. осуществляющие конвенционную (обычную) сварку трением, инерционные, т. е. осуществляющие инерционную сварку трением, и комбинированные.

Конструкция конвенционных машин (рис. 265, а) и инерционных (рис. 265, б) подобна [342]. Общими узлами и системами в них являются передняя бабка с вращающимся зажимом, суппорт с не-



вращающимся зажимом, привод для создания усилия нагрева и проковки, привод вращения шпинделя, система управления.

В машинах для инерционной сварки трением в качестве привода вращения шпинделя применяют маховик (или совокупность маховиков), которые разгоняют до заданной частоты вращения, и накопленная в маховике энергия в процессе его торможения в виде теплоты рассеивается в соединении свариваемых заготовок. Машины для инерционной сварки отличаются высокой производительностью и малой энергоемкостью.

Конвенционные машины обеспечивают высококачественное и стабильное соединение при простой схеме управления.

В настоящее время расширяется применение комбинированных машин для сварки трением, в которых используют преимущества обеих машин.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан ряд модификаций машин для конвенционной и инерционной сварки трением, характеристики которых приведены в *табл. 165* и *166* [342, 347].

В современных машинах для комбинированной сварки трением программным контроллером осуществляется непрерывная регистрация параметров режима сварки и управления. Это позволяет [347]:

<b>Таблица 165. Машины для конвенционной сварки трением</b>						
<i>Характеристика</i>	<i>СТ-102</i>	<i>СТ-104</i>	<i>СТ-107</i>	<i>СТ-108</i>	<i>СТ-111</i>	<i>СТ-120</i>
Мощность привода вращения, кВт·А	40	21	55	2×90	55	30
Наибольшее усилие осадки, кН	200	120	500	1200	500	120
Диаметр свариваемых заготовок, мм:						
пруток	16–50	15–30	25–80	–	20–80	10–30
труба	100	До 70	До 120	180	–	До 40
Частота вращения шпинделя, об/мин	750, 1000	940–1875	670, 1080	375, 630	240–980	1000–3900
Производительность, шт./ч	До 120	10	До 100	До 38	100	До 120
Масса, кг	4650	3800	8130	24260	6800	3200

**Таблица 166. Машины для инерционной сварки трением**

Характеристика	СТ-100	СТ-103	СТ-105	СТ-109	СТ-110	СТ-113
Мощность привода вращения, кВт·А	2,2	6,3	11	15	8	6,3
Наибольшее усилие осадки, кН	60	70	120	80	20	50
Диаметр свариваемых заготовок, мм	15–25	18–22	15–30	16–27	7–10	12–22
Частота вращения шпинделя, об/мин	3000	2805	2840	2200	5000	2805
Производительность, шт./ч	До 50	50	50	60	280	50
Масса, кг	940	1225	1600	2950	1955	1170

- осуществлять компьютерное программирование режимов сварки при модификации свариваемых деталей;
- отслеживать все параметры процесса сварки, сравнивать их с эталонными и принимать решение о годности сварной детали, что обеспечивает их идентификацию;
- регистрировать современными приборами в графической и цифровой форме основные параметры сварки трением (перемещение, скорость, давление);
- оперативно осуществлять диагностику и перекоммутацию электро- и гидроприводов, а также системы управления в целом;
- задавать граничные условия протекания процесса сварки трением.

Основными мировыми производителями оборудования для сварки трением являются фирмы «Tomпson» (Великобритания), МТИ (США), «Kuka» (Германия).

В настоящее время фирма «Kuka» предлагает потребителям семь типов машин для сварки трением с усилием осадки от 5 до 2500 кН и ряд типов специализированных машин. Все машины этой фирмы оборудованы каноническим приводом (без использования маховиков). Общей особенностью конструкции для всех крупных машин «Kuka» (с усилием осадки более 300 кН) являются крупногабаритные рамы с симметричными направляющими и зажимами, обеспечивающими высокую точность центровки и достаточную жесткость. Зажимы дают возможность устанавливать в них детали сложной формы, в том числе литые, за счет изменения количества зажимных кулачков и их расположения на корпусе. По-



средством привода можно изменять в широких пределах скорость вращения. Компоновка основных узлов машины позволяет использовать их в сочетании с роботами.

Американская фирма «Ram Stud» выпускает набор модульных инструментов, предназначенных для приварки трением к плоскости деталей (шпилек, болтов, бонок) диаметром 8–14 мм и длиной до 200 мм. Масса одного инструмента 25 кг, размеры 160×400 мм, скорость вращения шпинделя достигает 8000 об/мин. В конструкции используют пневмо- и гидропривод. С помощью этого оборудования можно приваривать как однородные, так и разнородные материалы, например, алюминий к стали и титану, меди, нержавеющей стали, а также алюминиевые стержни к керамике.

**Промышленное использование сварки трением.** Сварку трением широко применяют в ведущих отраслях производства [340–343]:

- в *автомобилестроении* при изготовлении деталей рулевого управления, карданных валов легковых и грузовых автомобилей, полуосей, картеров задних мостов автомобилей, клапанов двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидросистем и др.;
- в *тракторостроении* при изготовлении деталей рулевого управления, планетарных передач, валов отбора мощности, катков, траков, роторов турбонагнетателей дизельного двигателя и др.;
- в *электропромышленности* при изготовлении деталей высоковольтной аппаратуры, выводов бумагомастных конденсаторов, штанг электродержателей, алюминиево-медных переходников и др.;
- в *инструментальном производстве* при массовом изготовлении концевых режущего инструмента (фрезы, сверла, метчики).

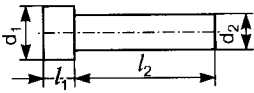
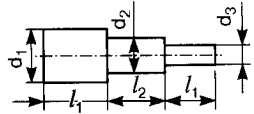
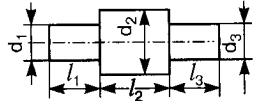
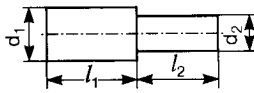
Особенно эффективным является использование сварки трением при изготовлении круглых деталей ступенчатого по длине профиля.

Типичные детали станков и машин, получаемые сваркой трением, можно представить в виде четырех основных групп (*табл. 167*), отличающихся формой и размерами [359].

Основными данными, определяющими экономическую целесообразность изготовления деталей сваркой трением взамен традиционной обработки резанием из проката, являются [360]:

- экономия заработной платы за счет уменьшения объема черновой механической обработки в предлагаемом способе (сварка трением);
- экономия затрат на основные материалы (металлопрокат) за счет снижения норм расхода в предлагаемом способе;

**Таблица 167. Типичные группы деталей станков и машин,  
подлежащих сварке трением**

Группа деталей	Эскиз детали	Размеры					
		$d_1$	$d_2$	$l_1$	$l_2$	$d_3$	$l_3$
I		40– 200	24– 80	6– 100	80– 600	–	–
II		36– 120	30– 100	50– 200	60– 200	24– 60	30– 120
III		24– 80	36– 200	60– 200	30– 500	24– 80	30– 200
IV		30– 160	24– 100	60– 400	30– 2000	–	–

- уменьшение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования, занятого на черновой механической обработке;
- снижение капитальных затрат на приобретение металлорежущих станков и создание производственных площадей.

Стоимостные оценки эффективности изготовления заготовок деталей способом сварки трением получены расчетом элементов затрат. Установлено [360], что наиболее существенными для определения стоимости оценки (по нисходящей степени важности) являются:

- типоразмер детали, который отличается площадью продольного сечения базовой и предлагаемой заготовки и массой снимаемой стружки, кг/деталь;
- объем выпуска деталей (заготовок), тыс. шт/год;
- удельная трудоемкость механической обработки детали в базовом варианте, мин/кг стружки.

С использованием этих данных осуществлена укрупненная оценка целесообразности предлагаемого способа (табл. 168).

В связи с существенным увеличением стоимости конструкционных материалов в настоящее время сварку трением целесообразно

**Таблица 168. Показатели экономической эффективности изготовления заготовок способом сварки трением**

Объем выпуска заготовок, тыс.шт./год	Масса снима- емой стружки при механиче- ской обработ- ке, кг/шт.	Машина МСТ-41					Машина МСТ-51								
		Удельная трудоемкость механической обработки, мин/кг стружки													
		1	3	5	10	15	1	3	5	10	15				
5	1														
	3		Неэффективно												
	5														
	10									Неэффективно					
	15														
	20			Эффективно											
	30														
	40														
	50										Эффективно				
	70														
20	1														
	3		Неэффективно						Неэффективно						
	5														
	10														
	15														
	20		Эффективно												
	30										Эффективно				
	40														
	50														
	70														
100	1		Неэффективно												
	3														
	5														
	10														
	15		Эффективно						Эффективно						
	20														
	30														
	40														

использовать при изготовлении сварно-штампованных, сварно-кованных и сварно-литых деталей из разных материалов с целью экономии более дорогого или дефицитного из них.

## 5.2. Сварка трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием (рис. 266) протекает следующим образом. Первоначально вращающийся инструмент в месте стыка погружают таким образом, чтобы штырь специального профиля внедрил в заготовки, а заплечик коснулся их поверхности. После полного погружения штыря на всю толщину свариваемого металла в результате трения штыря и заплечика о заготовку выделяется тепло, которое доводит металл вокруг инструмента до пластического состояния. Затем инструменту сообщают поступательное движение со скоростью сварки, и материал заготовок, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, огибает штырь и образует соединение. Такой шов несимметричен относительно своей продольной оси, так как материал вытесняется инструментом с одной стороны на другую. На заключительном этапе (в конце шва) инструмент поднимают до полного выхода штыря из стыка и останавливают.

Сварку трением с перемешиванием (СТП) применяют в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых и магниевых сплавов. Имеются сведения об успешной сварке данным способом медных, никелевых и титановых сплавов, а также сталей.

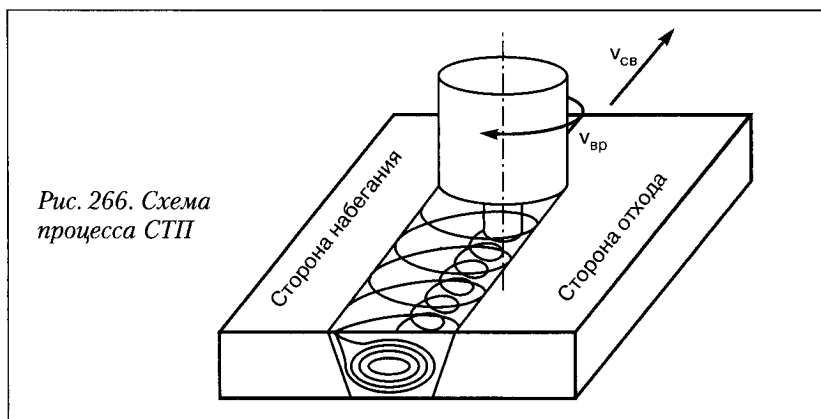


Рис. 266. Схема процесса СТП

К достоинствам способа сварки трением с перемешиванием обычно относят следующее [350–355]:

- свойства основного металла сохраняются лучше, чем при сварке плавлением;
- меньший уровень остаточных напряжений и деформаций сварных соединений;
- возможность получения соединений во всех пространственных положениях;
- нет необходимости применять присадочные материалы, защитные газы и флюсы;
- отсутствие вредных аэрозолей и ультрафиолетового излучения при сварке;
- возможность получения качественных швов на сплавах, трудно свариваемых плавлением;
- относительную простоту автоматизации и роботизации процесса;
- высокую эффективность использования электроэнергии.

Основные недостатки способа:

- необходимость применения громоздкого сварочного оборудования;
- наличие небольшого прослабления шва (0,1–0,2 мм);
- недостаточная мобильность;
- образование в конце кольцевого шва отверстия, равного диаметру штыря инструмента;
- необходимость применения вводных и выводных планок для получения качественных швов по всей длине заготовок;
- отсутствие стандартов на данный способ сварки и подготовленных специалистов.

Анализ множества научно-технических публикаций, посвященных сварке трением с перемешиванием, за последние 7–9 лет свидетельствует об интенсивных исследованиях этого способа и расширяющемся практическом применении его в различных отраслях промышленности.

**Образование сварного соединения и особенности способа сварки трением с перемешиванием.** Перед сваркой поверхности свариваемых деталей очищают от смазочных веществ, ржавчины и других загрязнений. Оксидную пленку, как правило, не удаляют. Сборку стыкового соединения производят на мощных подкладках с помощью прижимных приспособлений, надежно фиксирующих заготовки. При сборке листов толщиной 1,6 мм зазор не должен превышать 0,2 мм, а для толщин от 12,5 мм — до 1,25 мм.

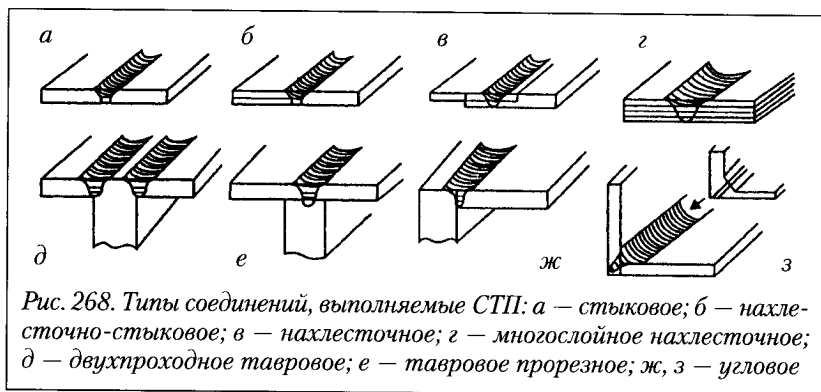
В сварных соединениях принято различать сторону набегания и сторону отхода (см. рис. 266). Сторона набегания — это сторона инструмента [355], где направление его вращения совпадает с направлением сварки, а сторона отхода — противоположная. В связи с такой особенностью сварки швы несимметричны.

Основным отличием макроструктуры швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, является образование в центре соединения ядра, которое независимо от сплава содержит так называемые «годовые кольца» (см. торец соединения на рис. 266). Форма ядра несколько отличается в зависимости от состава свариваемого сплава. Однако все ядра имеют участки, вытянутые в направлении вращения инструмента.

На рис. 267 приведена схема зон сварного соединения алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием [351]. К ядру примыкает сложный профиль, который образует верхнюю часть шва и по ширине несколько превышает ширину заплечика. В этой зоне наблюдается некоторое уменьшение толщины металла (0,1–0,2 мм) за счет контакта заплечика инструмента и поверхности заготовок.

На основании исследования микроструктур сварных соединений различных алюминиевых сплавов выделяют четыре зоны сварного соединения, выполненного сваркой трением с перемешиванием. Непосредственно к зоне А (основному металлу) примыкает зона В, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева. Поэтому зона В названа зоной термического влияния (ЗТВ). Примыкающая к ЗТВ зона С, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву, названа зоной термомеханического влияния. Последующая зона D ограничена ядром сварного соединения, и ее называют зоной динамической рекристаллизации.





Экспериментальные исследования, проведенные TWI, показали, что максимальная температура при сварке трением с перемешиванием составляет около 70% температуры плавления.

С помощью этого способа можно получать стыковые, тавровые и нахлесточные соединения (рис. 268).

Основные параметры процесса:

- скорость сварки (скорость перемещения инструмента);
- частота вращения инструмента;
- усилие прижатия и усилие перемещения инструмента;
- угол наклона инструмента и его размеры.

Режим устанавливают в зависимости от типа материала, формы и толщины свариваемых деталей.

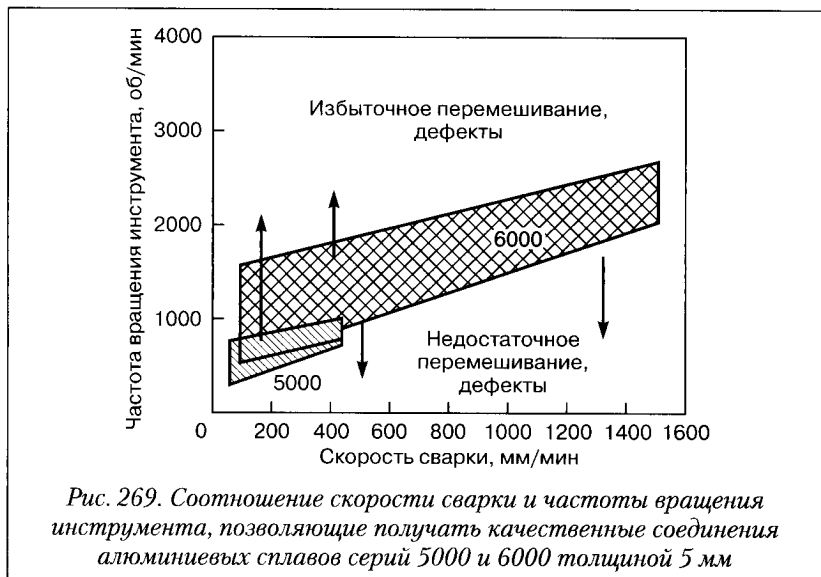
Получение качественного шва зависит от правильного выбора параметров режима сварки. Во многих работах отмечают, что с увеличением частоты вращения инструмента температура в зоне сварки повышается, а с увеличением скорости сварки — понижается.

Установлено, что при увеличении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента для обеспечения оптимальных условий (рис. 269).

Показано, что тепловложение при сварке трением с перемешиванием меньше, чем при аргонодуговой сварке, примерно в 2 раза и для сплава 6N01–Т5 толщиной 4 мм составляет соответственно 190 и 390 Дж/мм (скорость сварки 500 мм/мин) [351].

Усилия прижатия и перемещения инструмента зависят от типа свариваемого материала, его толщины и скорости сварки.

**Сварочный инструмент.** Конструкция инструмента и геометрия отдельных его элементов — рабочего стержня и опорного бурта —



наиболее заметно влияют на формирование структуры шва и соединения в целом [351, 353]. Элементы инструмента контактируют с материалом, доведенным силами трения до пластического состояния, и формируют потоки материала. При этом сам инструмент и особенно его рабочий стержень подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам. По некоторым данным, на тепловложение в инструмент в начальной стадии процесса приходится до 50% вводимой мощности. При установившемся процессе тепловложение в инструмент может снижаться до 10% общей производимой энергии.

Одновременно с вращением рабочий стержень инструмента, погруженный в массу разогретого материала, продвигается со значительным усилием вдоль стыка, преодолевая сопротивление материала. При этом он испытывает высокотемпературный нагрев и находится в сложном напряженном состоянии: кручение и знакопеременный изгиб. Максимальные напряжения от крутящего момента и изгибающих сил приходятся на основание рабочего стержня инструмента.

Приведенные выше обстоятельства обусловили два основных направления при разработке конструкции инструмента:

- повышение эффективности термомеханического взаимодействия инструмента с материалом свариваемого изделия;



- использование для инструмента более прочных и износостойких материалов.

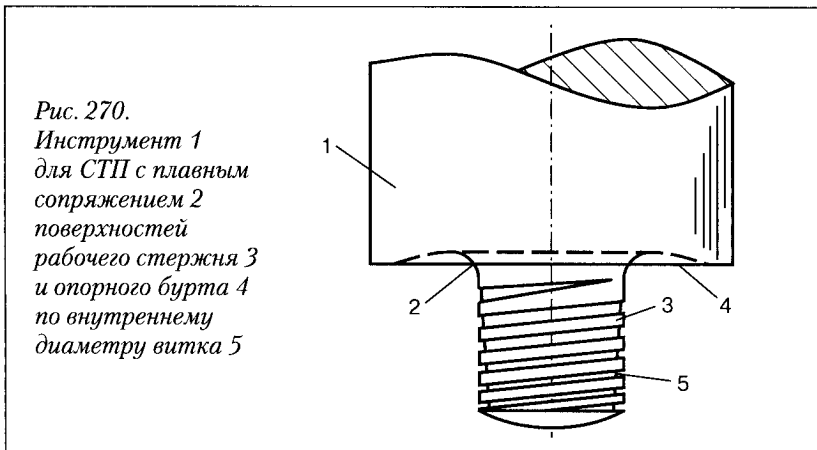
При этом преследовались следующие практические цели:

- повышение ресурса инструмента;
- возможность увеличения толщины соединяемых деталей;
- расширение номенклатуры соединяемых материалов (сплавов Ti, Cu, Mg, стали и др.);
- повышение производительности (скорости сварки);
- решение проблемы устранения кратера в конце шва и дефектов в нем;
- возможность сварки деталей различной формы с соединениями разных типов и др.

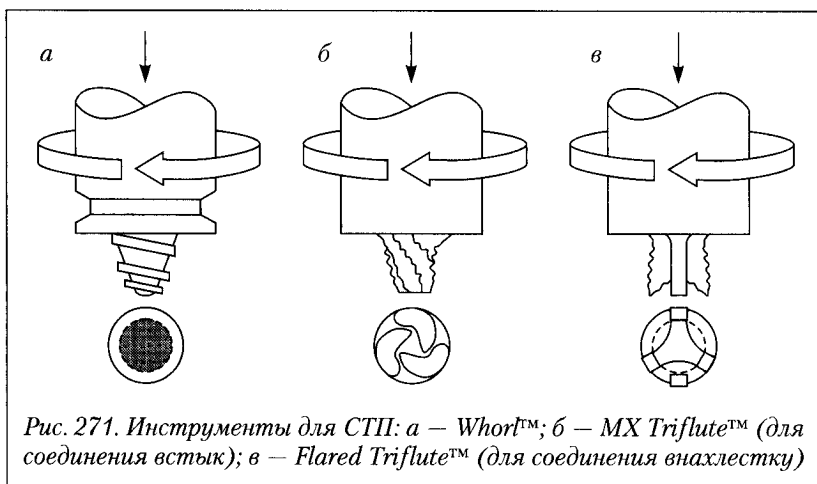
На первых этапах развития сварки трением было определено (Патент Великобритании 2.306.366), что для повышения термомеханического взаимодействия инструмента с материалом свариваемого изделия он должен иметь следующие конструктивные особенности: конусную форму стержня; разную форму его поперечного сечения; наличие на конусной поверхности стержня по меньшей мере одного среза, выступа, витка спиральной нарезки или каких-либо других фрагментов, ускоряющих процессы перемешивания и течения материала. При этом длина стержня зависит от толщины соединяемых кромок, а отношение его диаметра в зоне опорного бурта к длине составляет примерно от 4:1 — при толщине кромок 3–6 мм и до 1:1 — при толщине кромок 15–25 мм.

Акцентируют внимание на необходимости плавного сопряжения поверхностей всех элементов рельефа на рабочем стержне, что снижает опасность его разрушения при сварке. Особенно важно обеспечить плавное сопряжение в месте пересечения поверхностей рабочего стержня и опорного бурта. Инструменты такого типа (Патент США 6.676.004) используют для сварки трением с перемешиванием высокопрочных алюминиевых сплавов толщиной до 25,4 мм (*рис. 270*). Стержень инструмента имеет спиральную нарезку, у которой отношение внешнего диаметра витка к внутреннему возрастает, а шаг спирали уменьшается в направлении от бурта к концу стержня, и поверхность витков плавно сопряжена с внутренним диаметром нарезки.

В Британском институте сварки были разработаны и испытаны инструменты серий Whorl™ и Triflute™ для соединения плит из алюминиевого сплава группы 6000 толщиной 25–40 мм при одностороннем подходе и до 75 мм — при двухстороннем. Благодаря



рельефу рабочего стержня этих инструментов (*рис. 271*) объем стержня значительно меньше объема перерабатываемого им материала (рабочего пространства, охватываемого инструментом). По мнению разработчиков, чем больше разница в объемах рабочего стержня и его рабочего пространства, тем эффективней конструкция инструмента, поскольку при этом создаются условия для более свободного течения разогретого до пластического состояния материала. Ускорения течения металла вокруг инструмента достигают также, когда расстояние между витками винтовой нарезки больше



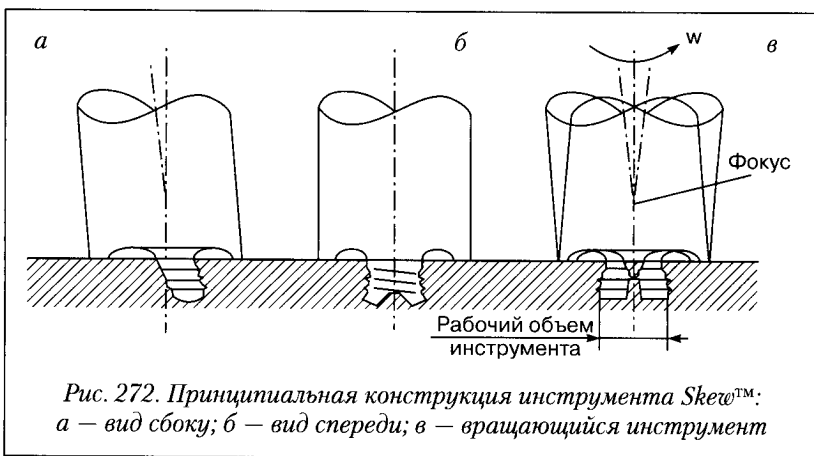
толщины витков и если оно уменьшается от основания к концу стержня (рис. 271, а).

Обычно для решения конкретной технологической задачи разрабатывают свой инструмент. Так, при сварке встык применяют инструмент, который обеспечивает получение наиболее узкого шва (рис. 271, б). Для нахлесточного соединения, особенно изделий, работающих в условиях знакопеременного нагружения, важнейшими условиями обеспечения прочности являются достаточная ширина шва и малая величина отклонения границы соединяемых деталей в зоне ее сближения с границей шва, а также отсутствие скопления частиц оксида на границах.

На рис. 271, в показан рабочий стержень инструмента для сварки внахлестку с тремя прямыми проточками, расширяющийся к концу для увеличения диаметра зоны обработки. Благодаря этим особенностям инструмента ускоряется течение материала вокруг рабочего стержня и под ним, улучшается перемешивание материала, фрагментация и диспергирование оксидов в зоне сварки.

Большее увеличение рабочего пространства стержня при его вращении без увеличения его собственного объема получают за счет наклона оси рабочего стержня инструмента Skew относительно оси шпинделя станка (оси вращения инструмента) (рис. 272).

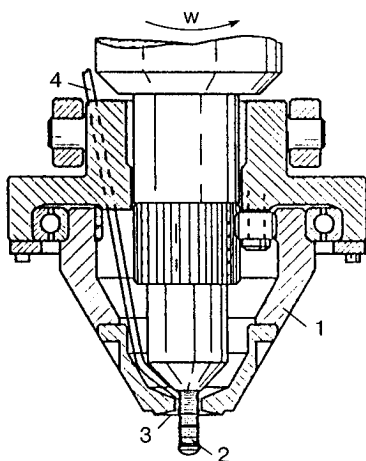
Положение фокуса на оси вращения инструмента влияет на вращение опорного бурта. Особенностью Skew-инструмента является также возможность уменьшения объема стержня за счет удаления его внутренней части, поскольку из-за наклона оси стержня она



практически не включается в работу над свариваемым материалом при вращении стержня. Разработчики утверждают, что по сравнению с обычным инструментом применение Skew-инструмента позволяет на 20% снизить осевое усилие, действующее на инструмент, в 2 раза увеличить скорость сварки и получить соединение с лучшими характеристиками.

Существенным этапом в совершенствовании инструмента было решение проблемы устранения или предупреждения образования кратера в конце шва при выведении стержня из стыка. Была разработана конструкция инструмента с возможностью осевого перемещения стержня относительно корпуса с опорным буртом инструмента (Патент США 5697544, патент Швейцарии 98/00861). Такой инструмент позволяет выполнять сварку, не меняя инструмент для каждой толщины детали, а устанавливая вылет рабочего стержня опорного бурта, соответствующий толщине детали. Благодаря появившейся возможности автоматического регулирования вылета рабочего стержня стала возможной автоматическая сварка деталей с переменным сечением соединяемых кромок. Кроме того, была решена проблема сварки без образования кратера в конце шва или его устранения. Появились новые технологические схемы сварки и конструкции сварочных инструментов, а также сварочных головок с раздельным управлением скоростью и направлением вращения рабочего стержня и опорного бурта. Стало возможным введение присадочного металла в шов вблизи рабочего стержня (рис. 273).

*Рис. 273. Инструмент для СПП с регулируемым вылетом рабочего стержня 2 относительно опорного бурта 3 (с корпусом 1), вращением их в разных направлениях (от одного привода) и подачи в зону сварки присадки (через тракт 4)*



С увеличением толщины соединяемых деталей растет термомеханическая нагрузка на инструмент, требующая применения соответствующих материалов. С этой целью для сварки алюминиевых сплавов используют инструменты, в которых стержень и опорный бурт выполнены из различных материалов: стержень — из инструментальной стали H13, а опорный бурт — из стали MP159 (Co-Ni-Cr). Такой инструмент со спиральной нарезкой рабочего стержня обеспечивает хорошее качество угловых швов толстостенных плит (до 40 мм) из алюминиевых сплавов 5083 и 2195 при сварке на следующем режиме: частота вращения инструмента 225 об/мин, скорость сварки 15,2 мм/мин.

Серьезная проблема возникает при сварке материалов с более высокими, чем у алюминиевых сплавов, термомеханическими характеристиками — титановых сплавов, сталей и других материалов. Основным в решении этой проблемы является создание инструмента, работоспособного при высоких напряжениях и температурах.

В [353] приведены результаты испытаний пяти материалов для опорного бурта инструмента: суперсплава инконель 718; суперсплава нимоник 105; циркониевой инженерной керамики; твердого сплава (94% WC + 6% Co) и интерметаллидного сплава (G-сплав, Ni<sub>3</sub>(Si, Ti, Cr)). Сделан вывод о превосходстве циркониевой инженерной керамики над остальными материалами: расчетная величина тепловложения в шов при ее использовании для опорного бурта на 30–40% выше в зависимости от режима сварки. Это позволяет соответственно повысить скорость сварки. Показано также, что циркониевое покрытие поверхности опорной плиты под стыком также снижает теплоотвод, что позволяет дополнительно повысить скорость сварки с 5 до 15 мм/с.

Фирмой General Electric Co получен патент (Патент Великобритании 2.402.905) на инструмент для сварки высокопрочных материалов — сплавов титана, никеля. Инструмент изготовлен из тугоплавкого вольфрама с добавками рения, молибдена, тантала или ниобия, образующих с вольфрамом упрочняющие твердые растворы. Инструмент можно также изготавливать из жаростойкого карбида вольфрама, полученного спеканием и прессованием.

Имеется информация [353] о сварке инструментом с рабочим стержнем из молибдена плит из алюминиевого сплава толщиной до 40 мм. При этом получено хорошее качество шва, а следы износа инструмента не обнаружены.

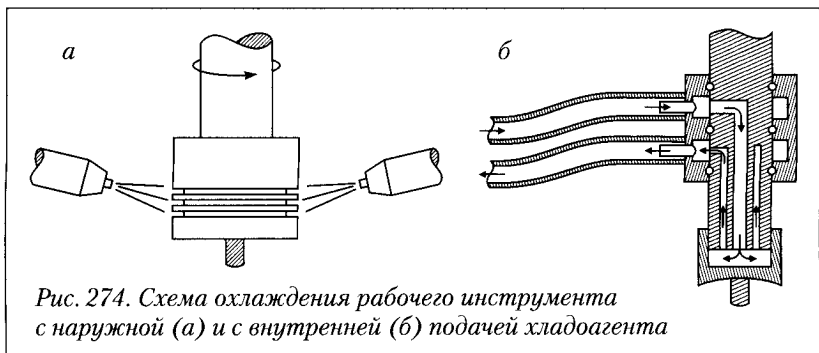


Рис. 274. Схема охлаждения рабочего инструмента с наружной (а) и с внутренней (б) подачей хладагента

Сообщается, что инструмент, содержащий вставку из материала на основе поликристаллического кубического нитрида бора РСВН, был испытан при сварке коррозионностойких сталей 316L и 301, а также сплава 600. Этот инструмент сохранял работоспособность при нагреве до 1200°С. Отмечается повышенная долговечность инструмента: при сварке шва длиной 15 м на стали 316L толщиной 3,2 мм инструмент не разрушился; долговечность на порядок больше, чем у обычного стального инструмента.

Отмечается, что инструменты на основе РСВН обеспечивали качественные сварные швы на всех исследованных медных сплавах, включая CuNi25. Однако отмечается большая хрупкость инструмента.

В [351] приведена информация о том, что при сварке некоторых алюминиевых сплавов для уменьшения прилипания металла к штырю и отвода избыточной теплоты используют инструмент с охлаждением его наружной стороны хладагентом (вода) или обдувом воздухом (рис. 274, а). Существуют также варианты конструкции, когда хладагент подается по каналам, расположенным внутри инструмента (рис. 274, б).

О важной роли инструмента в реализации сварки трением с перемешиванием свидетельствует тот факт, что более чем в 500 патентах, зарегистрированных за последние пять лет, уделяется большое внимание конструкции инструмента.

**Техника и технология сварки.** С целью интенсификации процесса СТП и предупреждения образования дефектов предложены различные способы и технологические приемы.

Заслуживает внимания предложение воздействовать механическими колебаниями сварочного инструмента на массу разогретого

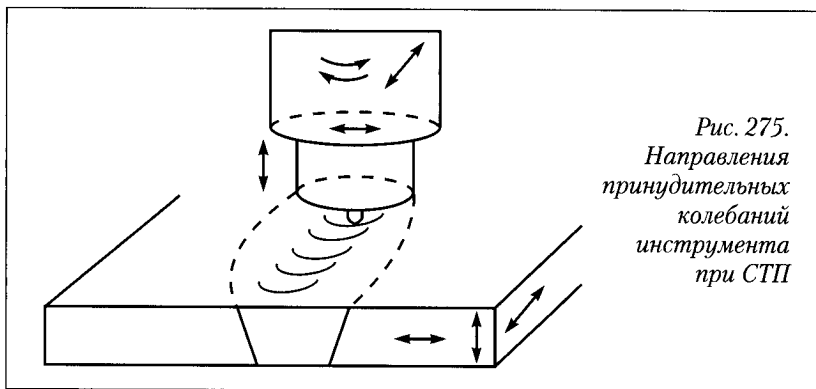


Рис. 275.  
 Направления  
 принудительных  
 колебаний  
 инструмента  
 при СТП

до пластического состояния материала (Патент Германии 19953260) или силой пульсации посредством инструмента специальной формы (Патент РФ 2277465). В первом случае необходимы сложные исполнительные механизмы и повышенная прочность, особенно усталостная, инструмента (рис. 275). Во втором случае пульсация создается за счет небольшого угла отклонения опорного бурта от оси вращения инструмента.

Следует отметить также технологические схемы, предлагающие введение в зону соединения дополнительной тепловой энергии для сварки деталей с большой толщиной соединяемых кромок или из материалов с повышенной температурой перехода в пластическое состояние. В качестве источников дополнительного нагрева предложены лазерный луч (Патент WO 02/074479, Европейский патент 01/08345), высокочастотный индуктор (Патент Норвегии 99/000421), активное сопротивление (Европейский патент 7716/956, Патент Швеции 98/00613). Нагрев дает возможность увеличить скорость сварки и уменьшить частоту вращения инструмента, что снижает вероятность перегрева и оплавления металла под опорным буртом.

Предложен способ СТП с одновременным использованием двух и более инструментов (технология Twin-Stir™, Европейский патент 0615480), примененный в нескольких вариантах технологических схем (рис. 276). Сварка при параллельном перемещении двух инструментов Twin-Stir™; при перемещении инструментов друг за другом по линии стыка Tandem Twin-Stir™; при перемещении инструментов со смещением относительно друг друга как в поперечном, так и в продольном направлениях Staggered Twin-Stir™.

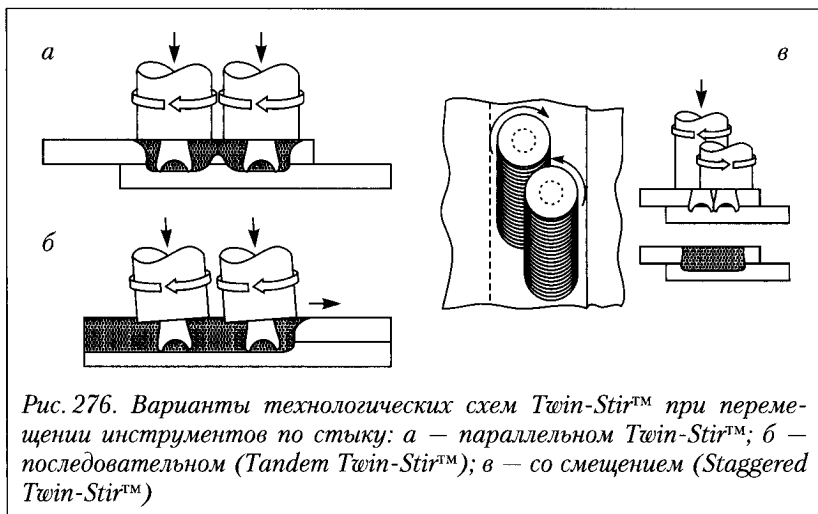


Рис. 276. Варианты технологических схем Twin-Stir™ при перемещении инструментов по стыку: а — параллельном Twin-Stir™; б — последовательном (Tandem Twin-Stir™); в — со смещением (Staggered Twin-Stir™)

При сварке с параллельно расположенными инструментами (рис. 276, а) можно повысить скорость сварки при меньшей скорости вращения инструмента, уменьшить асимметрию швов, а также уменьшить усилие перемещения и крутящий момент на инструменте. При сварке с перемещением инструментов друг за другом (рис. 276, б) происходит дополнительный нагрев первым инструментом, что облегчает работу второго инструмента и позволяет увеличить толщину соединяемых деталей, а также измельчить структуру и остаточные оксиды в шве.

При сварке с поперечным смещением двух инструментов относительно друг друга шов первого инструмента частично перекрывают швом второго инструмента (рис. 276, в), что позволяет формировать нахлесточное соединение шириной до 4,3 толщины верхнего свариваемого листа. В зоне перекрытия двух швов дополнительно разрушаются остаточные оксиды и измельчается структура. Эффект достигается при встречном вращении инструментов.

Разработана технологическая оснастка сварки Re-Stir™, с помощью которой осуществляется циклическое возвратно-вращательное движение инструмента. Это решает проблему асимметрии швов, присущую традиционной сварке трением с перемешиванием.

Разработан способ сварки трением с перемешиванием разнородных материалов (рис. 277). Согласно этому способу оптимальным является положение инструмента, при котором стержень погружен



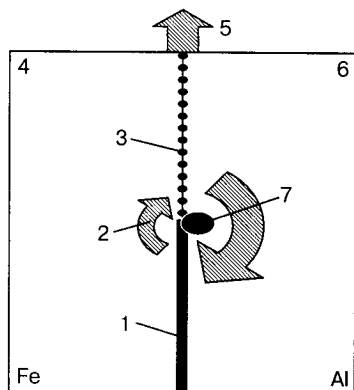


Рис. 277. Технологическая схема СПП алюминиевого сплава со сталью:

- 1 — активизируемая зона;
- 2 — направление вращения;
- 3 — неактивированная зона;
- 4, 6 — сторона сложения и разности векторов скоростей сварки и вращения инструмента соответственно;
- 5 — направление сварки;
- 7 — инструмент

в менее прочный материал (алюминиевый сплав) и немного углублен (на 0,2 мм) в более прочный материал (сталь).

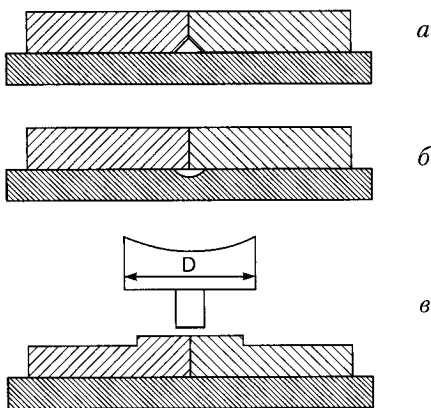
Точечные швы выполняют по двум технологическим схемам. Согласно первой вращающийся инструмент погружают в деталь, доводя до пластического состояния и перемешивая металл под буртом. После этого инструмент вынимают, оставляя в детали характерное углубление (PFSW). По второй схеме выполняют точечную сварку с заполнением шва (RFSW). В этом случае используют инструмент, у которого бурт и наконечник имеют отдельные системы привода. Вращающийся инструмент опускают в деталь (при этом наконечник выдавливает и перемешивает находящийся под ним металл), а затем его вынимают, и металл под буртом заполняет углубление, образуя шов.

**Качество швов и свойства сварных соединений.** Установлено, что основным специфическим дефектом соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, является несплавление [351]. Основными причинами возникновения этого дефекта являются либо локальное увеличение толщины свариваемого металла, либо нарушение переноса металла в корневую часть соединения.

Улучшения перемешивания металла в корневой части соединения можно достичь путем выполнения скоса кромок с обратной стороны пластин (рис. 278, а), которое улучшает заполнение этой области при течении металла в пластическом состоянии.

Устранению дефектов шва способствует и применение подкладок с канавкой (рис. 278, б), в которую выдавливается металл, фор-

*Рис. 278. Подготовка свариваемых кромок со скосом в корневой части (а);  
выполнение канавки в подкладке (б)  
и создание местного утолщения в зоне сварки (в)*



мируа небольшой валик. Затем его удаляют механической обработкой, обеспечивая высокое качество корневой части соединения.

Как отмечалось выше, одним из недостатков соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, является незначительное утончение металла в области соединения из-за контакта заплечика инструмента и поверхности заготовки. Обычно эта величина равна 0,1–0,2 мм, однако в некоторых случаях это может оказать влияние на прочность соединений. Для устранения этого недостатка рекомендуют создавать в месте стыка утолщение (рис. 278, в), равное по ширине диаметру заплечика.

При правильно выбранных режимах сварки трением с перемешиванием, как правило, отсутствуют дефекты, превышающие допустимый нормативными документами критический размер.

В табл. 169 приведены результаты влияния скорости вращения инструмента и скорости сварки на качество швов сваренных с двух сторон образцов из холоднокатаной электролитически очищенной бескислородной меди (Cu–OF) толщиной 10–11 мм [358]. Качество шва считалось хорошим, если единственным дефектом было появление на нем оксида.

Приведенные результаты показывают, что при правильном соотношении скорости вращения инструмента и скорости сварки формируется хороший шов.

Высокое качество швов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, позволяет отказаться от их 100%-ного контроля, а применять взамен выборочный контроль.

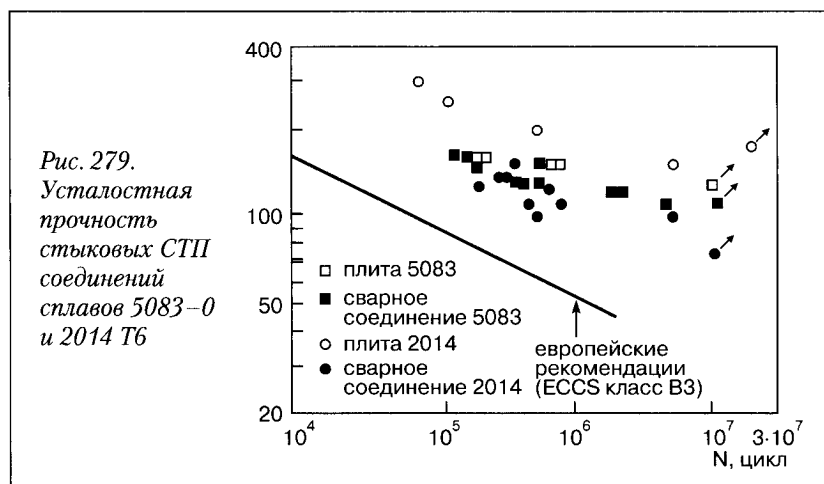
**Таблица 169. Результаты влияния скорости сварки и скорости вращения инструмента на качество швов при сварке бескислородной меди**

Скорость сварки, мм/мин	Скорость вращения инструмента, об/мин					
	1400	1120	900	710	450	355
50	—	—	—	—	—	Большая полость
100	—	—	—	—	Полость	Большая полость
150	—	—	—	Малая полость	—	Большая полость
200	—	—	Хороший шов	—	—	Полость с выходом на поверхность
250	—	Хороший шов	—	—	Полость с выходом на поверхность	Полость с выходом на поверхность
300	Хороший шов	—	—	Полость с выходом на поверхность	—	—
400	—	—	Хороший шов	—	Полость с выходом на поверхность	—
450	—	—	—	Полость с выходом на поверхность	—	—
500	—	Очень малая полость	—	—	Полость с выходом на поверхность	—
600	Хороший шов	—	Полость	Полость с выходом на поверхность	—	—
700	—	—	—	—	—	—
750	—	Малая полость	—	Полость с выходом на поверхность	—	—

Первоначально качество швов оценивают по результатам визуального осмотра, а также по изучению макрошлифов, изготовленных из образцов-свидетелей. В качестве неразрушающих методов контроля применяют цветную дефектоскопию и ультразвуковой контроль. В некоторых промышленных установках фирмы ESAB оборудование для ультразвукового контроля сконструировано со сварочной установкой, и контроль выполняют во время сварки.

При сварке трением с перемешиванием металл не нагревается до температуры плавления. Поэтому в металле шва и в зонах термического влияния степень фазоструктурных превращений намного ниже, чем при сварке плавлением. Это позволяет получать сварные соединения с меньшим уровнем остаточных напряжений, деформаций и с лучшими механическими свойствами.

Анализ данных усталостных испытаний соединений алюминиевых сплавов, выполненных СТП, показал, что их работоспособность во многих случаях выше, чем у соединений, полученных сваркой плавлением, и при этом меньше разброс значений [351]. Результаты испытаний на усталостную прочность однопроходных сварных соединений листов толщиной 6 мм сплавов 5083-О и 2014Т6 (рис. 279) были выше и с меньшим разбросом значений, чем у двухпроходных соединений, выполненных ТИГ или МИГ способами сварки, которые регламентированы нормами BS8118 класс 35 и Европейскими рекомендациями В3 для соединений, выполненных сваркой плавлением. Показатели усталостной прочно-



**Таблица 170. Механические свойства соединений алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием**

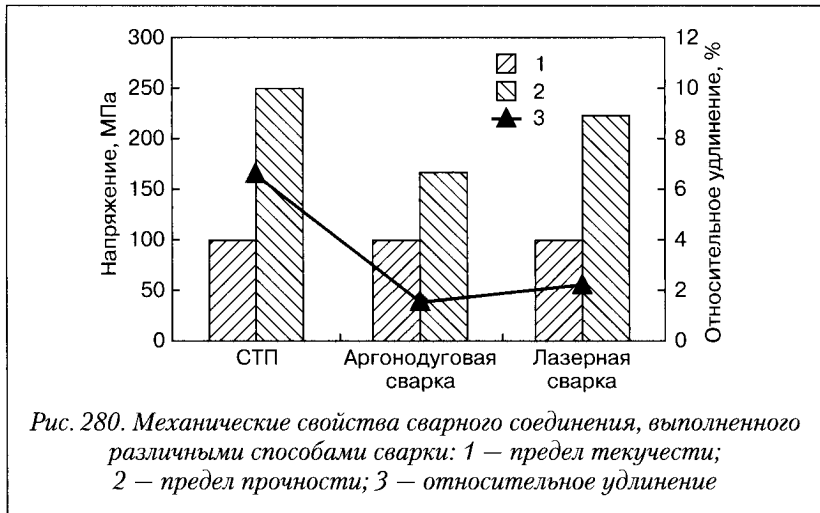
Алюминиевый сплав	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\alpha$ , град.
АМг6	343	180
1420	362	96
1201	294	180
1460	325	180

сти соединений сплавов 6082Т5 и 6005Т4, выполненных СТП, при коэффициенте асимметрии цикла  $R$ , равном  $-1$ , близки к показателям усталостной прочности основного металла и значительно выше, чем у соединений, выполненных другими способами сварки, в частности, МИГ и плазменной сваркой со сквозным проплавлением.

Контроль образцов алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1460 толщиной 1,8–2,5 мм показал, что соединения, выполненные СТП, отличаются высоким уровнем механических свойств (коэффициент прочности сварных соединений составляет 0,7–0,9 уровня прочности основного металла) (табл. 170) [356].

При сварке трением с перемешиванием латуни Л60 получены качественные швы без дефектов и изменения химического состава в зоне перемешивания. При этом твердость металла шва возросла на 15–20% по сравнению с твердостью основного металла [357].

Сварка трением с перемешиванием позволяет сваривать практически все деформируемые и литейные алюминиевые сплавы как в одноименном, так и в разноименном сочетаниях, многие композитные и разноименные материалы, обеспечивая высокое качество швов и необходимые свойства сварных соединений. Поэтому такой способ сварки можно применять для соединения трудносвариваемых, а иногда и не свариваемых способами плавления сочетаний алюминиевых сплавов. Например, при сварке плавлением сплавов 1201 и АМг6 в некоторых зонах шва образуется композиция легирования с таким соотношением содержания меди и магния (а также примесей химических элементов), при котором в процессе кристаллизации металла шва по границам кристаллитов образуются эвтектики. Они содержат фазу  $\text{CuAl}_2$  с низкой температурой затвердевания ( $549^\circ\text{C}$ ) и, локализуя термомеханическую сварочную деформацию, служат очагом кристаллизационного растрескивания. Поскольку при сварке трением с перемешиванием нагревания зоны соединения до температуры солидуса не происходит, то крис-



галлизационные трещины в шве не образуются. Прочность такого соединения находится на уровне 0,75 от прочности сплава АМгб.

Как видно на рис. 280 [355], качество соединений, выполненных СТП, лучше по сравнению с этими же качествами соединений, выполненных аргонодуговой и лазерной сваркой.

**Промышленное использование.** Установки для сварки трением с перемешиванием обычно создают применительно к определенным размерам и форме конструкции. В табл. 171 приведены типы

Тип машины	Свариваемые толщины, мм	Скорость сварки, м/мин	Размеры свариваемых заготовок, м	Примечание
FW 20	1,2...12	2,6	–	Максимальная частота вращения инструмента 15000 об/мин
FW 21	3...15	1,0	2×1,2	–
FW 22	3...15	1,2	3,4×4	–
FW 14	5...50 100 (с двух сторон)	1,0	–	Мощность машины 22 кВт
FW 16	Маленькая транспортируемая машина для демонстрации сварки трением с перемешиванием			

установок для выполнения сварки трением с перемешиванием, разработанные Британским институтом сварки.

Установка имеет приводы для вращения инструмента и его вертикального перемещения, привод для перемещения инструмента в направлении сварки, а также устройство для закрепления в собранном состоянии свариваемых деталей. Основным разработчиком и производителем промышленных установок, имеющих торговый знак SuperStir™, является шведская фирма ESAB.

Преимущества сварки трением с перемешиванием по сравнению с другими способами сварки обуславливают все возрастающие объемы ее применения в различных отраслях промышленности, в первую очередь для соединения алюминиевых сплавов толщиной от 0,2 до 75 мм за один проход. Интенсивная работа зарубежных ученых и специалистов, направленная на совершенствование технологии и установок, позволила использовать этот способ сварки в ряде наукоемких отраслей промышленности: авиакосмической, транспортной, судостроительной, автомобильной, электротехнической и др. (табл. 172).

**Таблица 172. Области применения сварки трением с перемешиванием алюминия и алюминиевых сплавов**

<i>Область применения</i>	<i>Характеристика изделия</i>	<i>Фирма-производитель</i>
Авиа-космическая техника	Топливные баки ракет семейства «Delta»: диаметр от 2 до 6 м; длина швов 15 м; сплав 2014Т6	Boeing (США)
	Внешний бак шаттла: восемь продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и четыре продольных шва на резервуаре для жидкого кислорода	NASA (США)
	Элементы крыльев нового поколения самолетов Airbus	British Aerospace (Великобритания)
Подвижной состав железных дорог	Укрупнение прессованных панелей: заготовки толщиной 1,6–15 мм при максимальных размерах 16×6 м	Marin Aluminium (Норвегия)
	Железнодорожные вагоны	Hitachi (Япония)
Автомобилестроение	Рамы двигателя, кузов, двери и др.	AOS/APS (Швеция) Automotive (США) Mazda Motor Corp. (Япония)

Благодаря использованию сварки трением с перемешиванием решают задачи повышения качества сварных конструкций, производительности и улучшения условий труда.

В настоящее время основными областями применения сварки трением с перемешиванием являются:

- судостроение (палубные надстройки, переборки, элементы корпуса);
- аэрокосмическая промышленность (элементы фюзеляжа, крыльев, топливные и баки для криогенных жидкостей, корпуса ракет);
- железнодорожный транспорт и метро (корпуса вагонов, рамы и основания поездов метро);
- автомобильная промышленность (узлы крепления двигателя, диски колес, рамы автомобилей);
- электротехническая промышленность (корпуса электромоторов, токоподводы, параболические антенны, шины);
- строительная индустрия (алюминиевые мосты и трубопроводы, теплообменники и кондиционеры);
- пищевая промышленность (емкости для пива, упаковка) и др.

### **5.3. Сварка трением пластмасс**

Сварка трением термопластов практически не отличается от сварки трением металлических материалов [342, 362]. Как и при сварке металлов, в зоне соединения термопластических пластмасс (далее пластмасс) протекают следующие процессы: преобразование энергии для активации свариваемых поверхностей; взаимодействие этих поверхностей при контакте друг с другом; формирование структуры материала в зоне контакта.

Сущность процесса сварки пластмасс состоит в сближении макромолекул соединяемых поверхностей в момент, когда между ними проявляются силы межмолекулярного взаимодействия. Перемешивание вязкого расплава в зоне соединения при сварке трением способствует образованию сварного соединения.

Практическое применение находят две разновидности сварки пластмассовых деталей: сварка трением вращения (прямой и косвенный способ) и сварка вибротрением [342, 362–365].

Сварку вращением прямым способом выполняют при осевом перемещении и вращении одной детали относительно другой.



Сварку вращением косвенным способом выполняют с применением промежуточного элемента, что является предпочтительным при соединении длинных и громоздких деталей.

Сварку трением пластмасс с относительным вращением свариваемых заготовок, как и металлов, осуществляют по двум схемам: обычной (конвенционной) и инерционной.

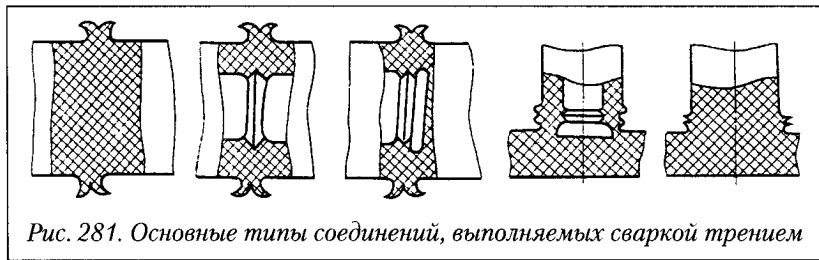
Способ сварки трением обладает рядом достоинств по сравнению с другими способами сварки пластмасс [362, 364, 365]:

- высокой производительностью;
- экономичностью и простотой процесса;
- равномерностью и интенсивностью нагрева и отсутствием перегрева и разложения материала;
- эффективным удалением поверхностных загрязнений и пузырей из зоны сварки;
- отсутствием термоокислительных реакций на свариваемых поверхностях благодаря предупреждению доступа атмосферы;
- небольшим гратом и легкостью его удаления;
- отсутствием загрязнений, вводимых теплоносителями;
- отсутствием потребности в присадочном материале;
- простотой сварочного оборудования, а также его автоматизации и роботизации в условиях автоматизированного производства.

При разработке технологии сварки трением пластмасс особое внимание необходимо уделять анализу характеристик материала (температурный интервал вязкотекучести, коэффициент трения, теплопроводность). Необходимо учитывать, что выделяемая при трении теплота мало рассеивается и в основном сохраняется в сварочной зоне вследствие низкой теплопроводности пластмасс. Следует стремиться к повышению точности изготовления заготовки и ее установки в сварочную машину, чтобы получить равномерный нагрев.

На сварку пластмасс заметное отрицательное влияние оказывает влага, поэтому перед сваркой их следует сушить, нагревая. Прочность соединений влажных деталей может снизиться в несколько раз.

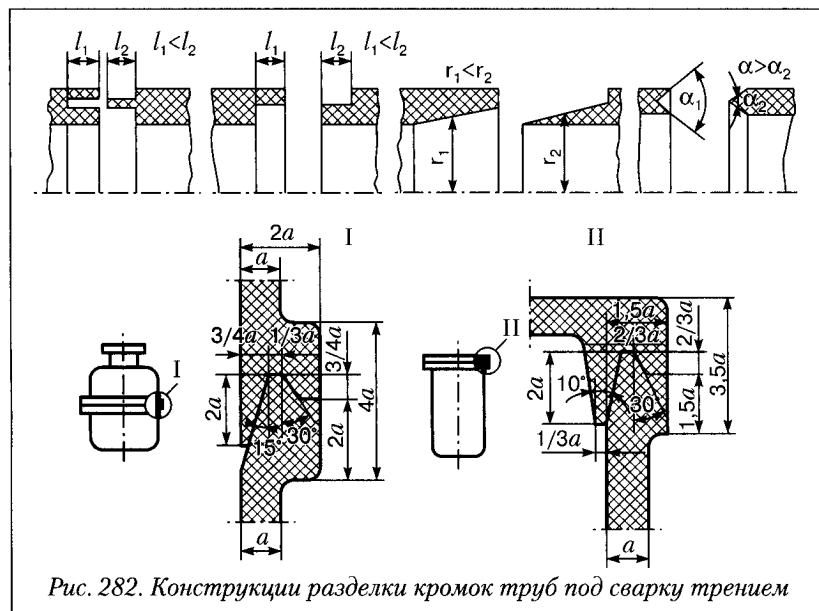
Требования, предъявляемые к геометрическим размерам свариваемых заготовок, обусловлены необходимостью получения симметричных тепловых полей в стыке и возможностью зажатия заготовок. При зажатии заготовок необходимо учитывать их габаритные размеры, а для полых заготовок — толщину стенок. Поэтому для выравнивания сечения в стыке предусматривают соответствующие выступы на более массивных деталях (рис. 281) [363]. Длина выступа должна составлять 0,7–1,0 от толщины свариваемых кромок.



При соединении заготовок больших диаметров сплошного сечения для обеспечения равномерности нагрева по свариваемому сечению и исключения непроваров в центральной части стыка рекомендуют их обрабатывать с уклоном 1–1,5° или с выпуклостью по оси, чтобы уменьшить площадь сечения в начале стадии нагрева.

Для обеспечения точной центровки заготовок труб по всему периметру стыка на их торцах выполняют специальную разделку (рис. 282) [363].

Трением сваривают большинство типов пластмасс, имеющих стабильную вязкость в широком диапазоне температур: это полиамиды, полиметилметакрилаты, полиформальдегиды, полистиро-



лы, поликарбонаты и др. Линейная скорость при сварке пластмасс обычно находится в пределах 0,5–1,5 м/с, но может достигать и 3 м/с. Давление при проковке составляет 0,5–1,5 МПа. Давление при нагреве выбирают из условия 0,2–0,6 от давления проковки.

Вследствие того, что загрязнения со стыкуемых поверхностей интенсивно разрушаются и частично удаляются при нагреве в процессе их трения, припуски на нагрев и проковку принимаются меньшими, чем при тепловой контактной сварке.

Установлено, что при сварке трением вращения косвенным нагревом необходимы скорости в 3–7 раз выше, чем при сварке трением вращения прямым нагревом, и их значение в среднем находится в пределах 10–12 м/с. Значения же осевых усилий принимают при этом более низкие (рис. 283) [364].

Сварка трением косвенным нагревом позволяет соединять различные по геометрической форме детали, в том числе большой длины. Правда, к недостаткам этого метода следует отнести тот факт, что при удалении вращающейся вставки из стыка в контакт с окружающей атмосферой вступают нагретые торцы, в результате чего утрачивается очень важное преимущество процесса сварки трением.

Свойства соединений, выполненных сваркой трением, зависят от усилия и продолжительности осадки. При слишком малых осе-

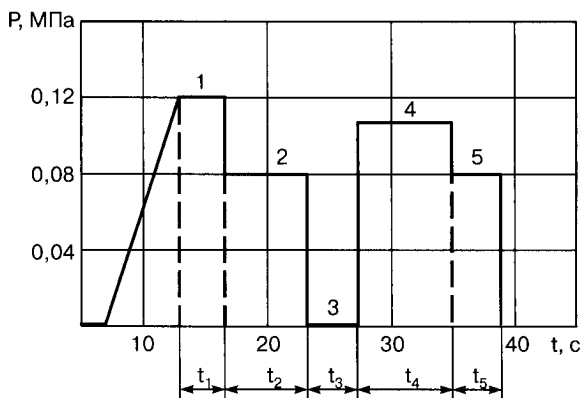


Рис. 283. Изменение давления при сварке трением косвенным нагревом для различных стадий процесса: 1 — прижим образцов к диску; 2 — процесс трения; 3 — удаление диска из зазора между деталями; 4 — осадка; 5 — выдержка под давлением

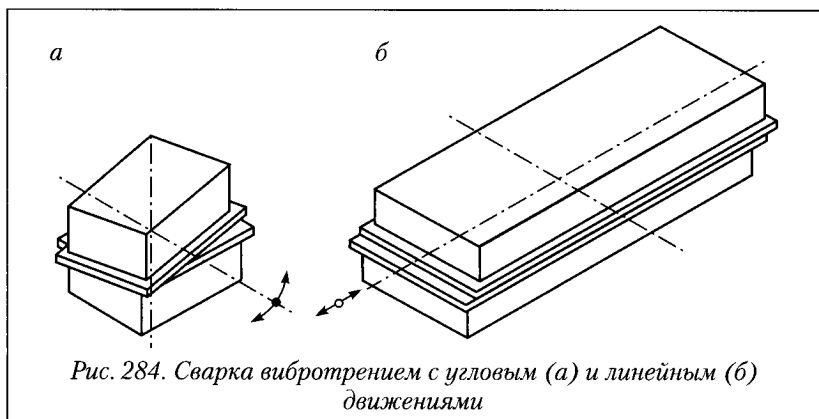


Рис. 284. Сварка вибротрением с угловым (а) и линейным (б) движениями

вых усилиях нельзя получить качественные соединения. Избыточная осадка приводит к чрезмерному выдавливанию пластифицированного слоя из соединения, что также снижает его качество.

Так как зона проплавления при сварке трением пластмасс из-за низкой их теплопроводности неглубокая, то остывание расплава малой толщины происходит быстрее, чем при других способах сварки.

Чтобы исключить зарождение трещин в зоне соединения, необходимо прекратить вращение, и после осадки стык должен остывать в машине примерно до температуры плюс  $40^{\circ}\text{C}$  в зажатом состоянии под давлением осадки.

Сварку вибротрением выполняют с угловым и линейным относительным движением (рис. 284) [365]. Детали совершают не непрерывное вращательное движение, а угловое или линейное, в результате чего в месте соединения выделяется теплота. При этом одна из заготовок колеблется с амплитудой 1–4 мм и частотой 100–250 Гц.

Способ сварки вибротрением позволяет избежать взаимодействия расплава в зоне соединения с атмосферой и строго дозировать тепловыделение при равномерном трении по всей контактируемой поверхности соединения. Этим способом сваривают детали из полиамидов, полиацеталей, фторопластов с отношением длины к ширине 1:5.

Сварку пластмасс трением вращения осуществляют на машинах, предназначенных для соединения металлических деталей, на модернизированных универсальных токарных, сверлильных станках и на специализированных машинах. Для сварки косвенным способом наиболее часто применяют специальные машины, в том числе сконструированные на базе серийных станков. Линейную и

угловую сварку вибротрением осуществляют на специальном оборудовании.

Применение сварки трением пластмасс обширно: это трубы, сосуды, фитинги, буксы, крышки, картеры и роторы насосов, поршни, детали клапанов, детали стиральных машин, елочные украшения, поплавки, бобины для пряжи, корпуса пиротехнических изделий, шкивы, корпуса электрических батарей, помпы, фильтры, крыльчатки и другие изделия.

#### 5.4. Наплавка (наварка) трением

Промышленный интерес представляют следующие способы наплавки (наварки) трением: прутком (расходуемым инструментом), гранулированным материалом и перемешиванием.

Сущность способа наплавки расходуемым инструментом заключается в том, что при трении торца прутка наплавляемого материала о поверхность заготовки происходит их разогрев до пластического состояния и образование металлических связей между ними [342, 343, 366]. При этом способе наплавки (рис. 285) пруток 2 наплавляемого материала с усилием  $P$  прижимают торцом к поверхности заготовки 1 и приводят его во вращение [366]. Под действием осевой нагрузки  $P$  и вращения прутка со скоростью  $v_n$  происходит направленный тепловой износ торца прутка и торец делается пластичным. После этого наплавляемая заготовка приводится в движение со скоростью  $v_3$ . При этом на деталь наносят (наплавляют) слой металла 3 определенной толщины. В процессе наращивания слоя на конце прутка образуется грибовидная головка, удаляемая резцом 4. Ее образование связано с особенностями распределения удельного давления  $P$  и удельной тепловой мощности по сечению прутка, а также скорости его подачи [367].

Для получения качественного наплавленного слоя каждому давлению  $P$  должны соответствовать определенные скорости вращения прутка  $v_n$  и детали  $v_3$ .

Давление (МПа) прутка на заготовку выбирают в зависимости от типа стали и сплава в диапазоне:

<i>Низкоуглеродистая сталь</i> . . . . .	3–5
<i>Среднеуглеродистая сталь</i> . . . . .	4–5
<i>Высокоуглеродистая сталь</i> . . . . .	5–8
<i>Твердые сплавы</i> . . . . .	30–70

Окружная скорость вращения прутка диаметром 10–12 мм при наплавке углеродистых сталей составляет 1,0–1,25 м/с; при наплавке твердых сплавов — 0,5–1,0 м/с. Скорость наплавки углеродистых сталей на цилиндрическую поверхность 0,65–1,25 мм/с; при наплавке твердых сплавов на плоские поверхности — 5,0–5,5 мм/с.

Производительность наплавки (толщину наплавленного слоя) на круглую деталь регулируют за счет смещения  $e$  оси прутка относительно оси вращения заготовки (см. рис. 285). При увеличении смещения  $e$  в направлении вращения и одновременном увеличении подачи  $S_{\text{пр}}$  прутка толщина наплавленного слоя увеличивается.

На рис. 286 показаны кривые зависимости производительности наплавки  $G_p$  (г/оборот) от скорости вращения прутка из стали 45 диаметром 12 мм при различном давлении  $P$  [366].

Наплавка производилась на деталь диаметром 16 мм из стали Ст3; скорость вращения детали 1,183 об/мин.

При наплавке твердых сплавов на плоские поверхности заготовок толщина наплавленного слоя колеблется в пределах 0,1–0,3 мм и зависит в большей степени от соотношения скорости вращения прутка  $v_{\text{п}}$  и относительного перемещения заготовки  $v_3$  [368]. Наплавку производили стеллитом марки ВЗК на сталь У9 со скоростью 5,5 мм/с.

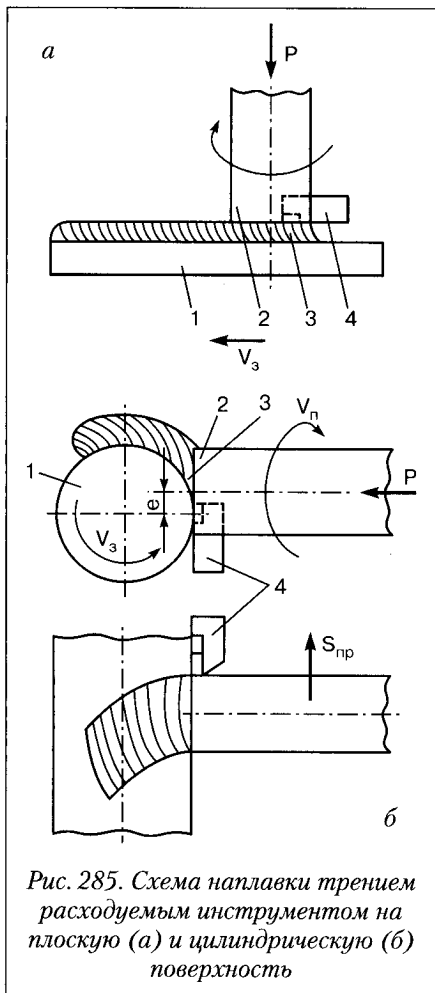


Рис. 285. Схема наплавки трением расходуемым инструментом на плоскую (а) и цилиндрическую (б) поверхность

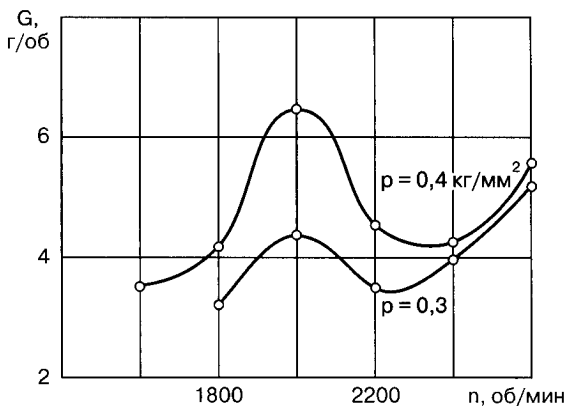


Рис. 286. Зависимость производительности наращивания (Ст.3) от скорости вращения прутка. Диаметр детали 15 мм, прутка — 12 мм; смещение 1 мм; скорость вращения детали 1,183 об/мин

Слои стеллита, наплавленного трением, в отличие от стеллита, наплавленного дуговой сваркой, не имеют дендритной структуры. Микротвердость твердого раствора наплавленного стеллита меняется в пределах 700–900 кг/мм<sup>2</sup>, понижаясь с приближением к основному металлу. Микротвердость карбидных включений, определенная на наиболее крупных частицах, достигает 1500 кг/мм<sup>2</sup>.

В работе [369] приведены особенности наплавки трением чугуна на сталь 20 и 40. При наплавке происходит диффузионное перераспределение углерода. В результате обеднения из-за потери углерода внутренних слоев наплавленного чугуна и соответственно обогащения им поверхностных слоев стали образуется зона заэвтектоидной стали. Затем в направлении от наплавленного слоя к сердцевине наблюдается плавный переход от структуры заэвтектоидной стали к эвтектоидной и доэвтектоидной исходного состояния.

Микроструктура чугуна, наплавленного на сталь 40, состоит из перлита и ледебуритной эвтектики. Микротвердость наплавленного слоя чугуна составляет в среднем 360 кг/мм<sup>2</sup>. Максимальную микротвердость (420–480 кг/мм<sup>2</sup>) имеет зона заэвтектоидной стали с мелкодисперсным строением на границе наплавленного слоя со сталью. Дальнейший переход к стали доэвтектоидной структуры сопровождается постепенным уменьшением микротвердости до 260 кг/мм<sup>2</sup> в исходной стали.

В работе [343] было показано, что наплавку трением можно успешно осуществить с применением прутков из различных высокопрочных, коррозионностойких и цветных металлов при изготовлении трубных фланцев из композиционных материалов, золотников, гильотинных и других ножей, дисковых тормозов, специальных износостойких плит и др. изделий. Установлено также [343], что при использовании бескислородной атмосферы или атмосферы с низким парциальным давлением кислорода давление в ходе наплавки трением может составлять лишь  $17 \text{ Н/мм}^2$ .

Считается перспективным способ наплавки трением, при котором через трубчатый расходоуемый пруток подают гранулированный присадочный материал [343].

Для наплавки трением цилиндрических поверхностей используют токарный станок, на суппорте которого располагают узел наплавки, включающий механизм крепления, вращения и подачи расходоуемого инструмента (прутка), а заготовку крепят в патроне станка [366]. Для наплавки плоских поверхностей заготовок применяют специальные установки, по компоновке близкие к сверлильным станкам [342].

Оборудование для наплавки плоских деталей может быть упрощено за счет наклонного расположения наплавляемой поверхности или наплавляемой заготовки (рис. 287) [343]. При этом способе скорость относительного перемещения расходоуемого прутка и под-

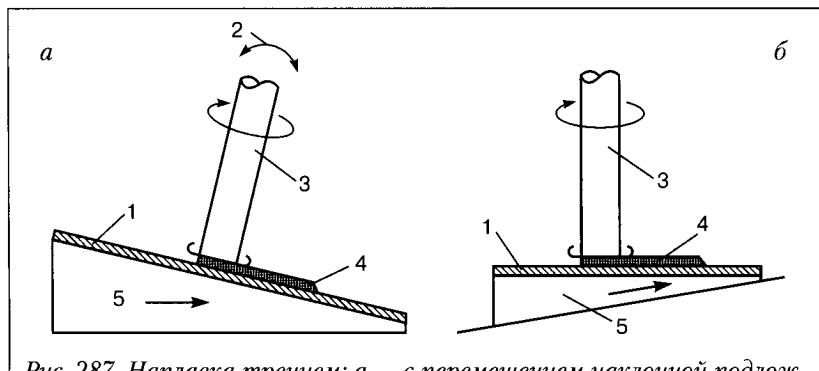


Рис. 287. Наплавка трением: а — с перемещением наклонной подложки; б — с перемещением горизонтальной подложки на наклонной базе (1 — подложка; 2 — регулируемый угол наклона; 3 — расходоуемый пруток; 4 — наплавленный слой; 5 — перемещающееся изделие; 6 — наклонная основа для движения изделия)



ложки или поверхности, по которой последняя перемещается, можно рассчитать предварительно и поддерживать на постоянном уровне. В данном варианте отпадает необходимость в наличии специальной системы подачи присадочного прутка.

К основному недостатку способа наплавки трением с применением прутка относят тот факт, что из-за вращения прутка исключается возможность использования для наплавки длинных прутков. Поэтому процесс ведут с частыми паузами.

Авторы [341] считают перспективным выполнение наплавки вибротрением (рис. 288), которая позволяет избежать указанного недостатка. При выполнении наплавки этим способом пруток 1 в виде проволоки или полосы непрерывно подают роликами из бухты в зону наплавки 3. Концевая часть расходоуемого прутка прижимается с усилием  $P$  к наплавляемой поверхности 2 и совершает колебательные движения со скоростью  $V_1$ , в результате чего генерируется теплота трения, под воздействием которой наплавляемый металл делается пластичным.

При перемещении заготовки со скоростью  $V_2$  образуется наплавленный валик.

Известно несколько схем наплавки гранулированными металлами (стружка, порошок) (рис. 289) [370–376]. Схемы на рис. 289, б, в, д объединяет то, что теплота при трении создается непосредственно на поверхности контакта между основным и наплавляемым металлом. При этом роль более тугоплавкого элемента трущейся пары выполняет заготовка обрабатываемой детали (чаще всего стальная или чугунная). На схемах рис. 289, а, г теплота при трении создается в стороне от поверхности контакта заготовки и наплавляемого металла или сплава.

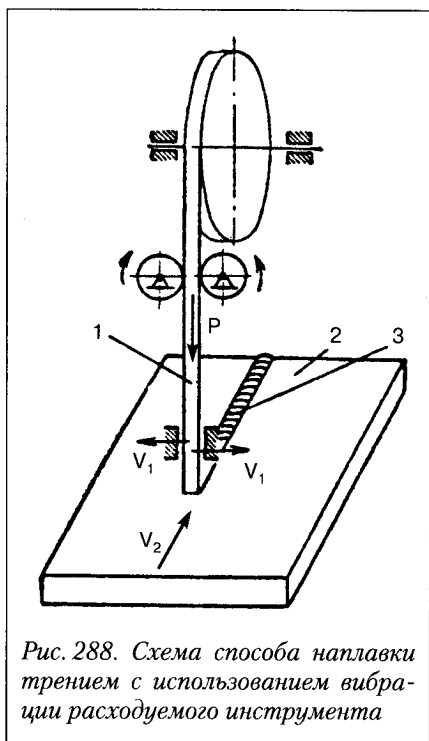


Рис. 288. Схема способа наплавки трением с использованием вибрации расходоуемого инструмента

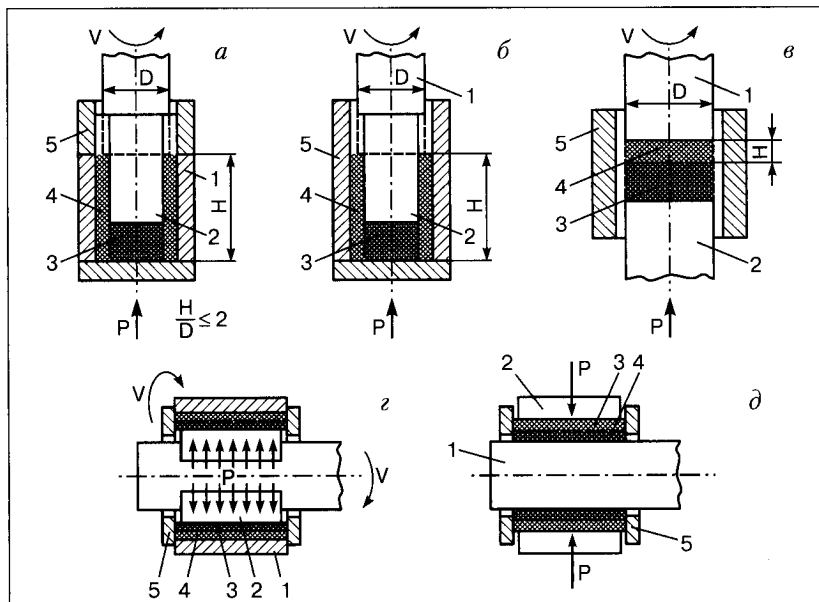


Рис. 289. Принципиальные схемы процесса наплавки трением гранулированным материалом: а, г — на внутренние поверхности; б, д — на наружные поверхности; в — на торцовую поверхность ( $H/D \leq 1/2$ );  $V$  — окружная скорость;  $P$  — рабочее давление;  $H$  — высота наплавленного слоя (1 — заготовка; 2 — инструмент; 3 — наносимый материал до наплавки; 4 — наплавленный металл; 5 — приспособление)

В этом случае роль более тугоплавкого элемента трущейся пары выполняет специальный инструмент.

Эффективная реализация наплавки по названным выше схемам возможна только при изготовлении заготовки или прутка из материалов, имеющих более высокую температуру плавления, чем наплавляемый металл или сплав. Под воздействием давления  $P$  происходит относительное перемещение гранул наносимого металла, гранулированный металл уплотняется, быстро нагревается, происходит его спекание и формирование наплавленного слоя.

При наплавке слоя металла на внутреннюю поверхность заготовки 1 (рис. 289, а) ее закрепляют в приспособлении 5, засыпают необходимое количество гранулированного металла или сплава, который спрессовывают в брикет с помощью продольного перемещения приспособления 5. Наплавку осуществляют вращением ин-

струмента 2 с одновременным продольным перемещением приспособления для создания рабочего давления на поверхности трения инструмента. Под воздействием интенсивного тепловыделения от трения инструмента о наплавляемый металл последний разогревается и вытесняется в зазор между боковой поверхностью инструмента и заготовкой, величина которого соответствует заданной толщине слоя наносимого металла. При достижении приспособлением крайнего верхнего положения весь нагретый металл покрывает наплавляемую поверхность в виде слоя 4 заданной длины. Инструмент, не прекращая вращения, извлекают из приспособления за счет поступательного перемещения последнего в обратном направлении.

При наплавке слоя металла или сплава на наружную боковую поверхность цилиндрической заготовки 1 (рис. 289, б) специальный инструмент не применяют. Предварительное уплотнение массы наплавляемого металла, а также создание рабочего давления на поверхности трения обеспечивают продольным перемещением приспособления 5. Наносимый металл нагревается в результате трения торцовых и боковых поверхностей заготовки 1 о брикет гранулируемого материала. Пластичный наплавляемый металл формирует на боковой поверхности заготовки 1 слой заданной толщины. При достижении приспособлением 5 крайнего положения, что свидетельствует о вытеснении всего металла из накопительного пространства 3, останавливают вращение заготовки и продольное перемещение приспособления; приспособление 5 раскрывают и извлекают из него биметаллическую заготовку.

При наплавке слоя металла на торцовую поверхность заготовки 1 (рис. 289, в) во внутреннюю полость приспособления 5 помещают необходимый объем наплавляемого металла или сплава 3, после чего вводят заготовку 1. С помощью продольного перемещения инструмента (пуансона) 2 гранулированный металл предварительно уплотняют (брикетируют).

Наплавку выполняют, вращая заготовку 1 и продольно перемещая инструмент 2 для создания рабочего давления на поверхности трения заготовки. В результате интенсивного тепловыделения от трения заготовки о брикет наносимого металла последний, находясь в закрытом пространстве приспособления, нагревается и покрывает торцовую поверхность заготовки. Инструмент 2 достигает крайнего положения при заданной высоте  $H$  наносимого слоя металла, вращение заготовки прекращается и наплавленный металл 4 остывает на поверхности заготовки 1 в условиях всестороннего

сжатия, обеспечивающего получение биметаллического соединения высокой прочности и наплавленного металла высокой плотности.

Основным условием, необходимым для достижения эффекта наплавки гранулированного металла или сплава по рассмотренным выше схемам, является изготовление обрабатываемой заготовки или инструмента из материала, имеющего более высокую температуру плавления, чем наплавляемый материал. Под воздействием давления происходит относительное перемещение гранул наносимого металла, гранулированный металл уплотняется, быстро нагревается, происходит его спекание и формирование наплавленного слоя.

Одним из условий получения качественного наплавленного слоя является чистота гранулированного металла. Размеры отдельных частиц стружки или порошка могут колебаться от 0,5 до 1 мм.

Установлено [374, 375], что при наплавке цветных сплавов (бронза и латунь) на стальные и чугунные заготовки основные параметры режима наплавки находятся в пределах: скорость относительного движения на поверхности трения  $v = 2,5-6,0$  м/с; давление на торцовую поверхность трения  $P = 20-60$  МПа.

Технологический процесс изготовления биметаллической заготовки наплавкой трением состоит из следующих этапов:

- подготовка заготовки к наплавке;
- подготовка наплавляемого металла или сплава;
- собственно процесс наплавки;
- контроль качества наплавки.

Основные сведения о биметаллических заготовках, полученных наплавкой трением, приведены в *табл. 173* [373, 374].

В *табл. 174* приведены технико-экономические показатели процесса наплавки трением цветных сплавов (бронза, латунь) на основу из черных металлов (сталь, чугун) в сравнении с другими способами наплавки.

Гранулированным металлом наплавляют элементы подвижных сопряжений и узлов различных машин и механизмов: антифрикционные кольца и втулки торцовых и сальниковых уплотнений, опорные втулки и поршни насосов, подшипниковые втулки шатунов компрессоров, резьбовые и шпindelные гайки, золотники и клапаны трубопроводной арматуры и др.

Авторами [357] разработана технология наплавки трением с перемешиванием меди и ее сплавов (*рис. 290*). Наплавляемую медную заготовку *4* и присадочный материал в виде пластины *1* закрепляют с помощью прижимов. Вращающийся рабочий инстру-

мент состоит из штыря 3 и заплечика 2. От трения инструмента о поверхность присадочной пластины и наплавляемой заготовки выделяется теплота, необходимая для перехода присадочного материала и части металла детали в пластичное состояние. При перемеще-

**Таблица 173. Биметаллические заготовки, полученные наплавкой трением**

<i>Материал заготовки</i>	<i>Наплавленный металл (сплав)</i>	<i>Место наплавки</i>	
Сталь 20	Алюминий АЛ1	Торцовая, наружная цилиндрическая	
	Медь М1	Торцовая, наружная цилиндрическая, внутренняя цилиндрическая	
	Бронза БрОЦС663		
	Бронза БрОФ 10-1	Торцовая, внутренняя цилиндрическая	
	Бронза БрАЖ 9-4	Торцовая, наружная цилиндрическая	
	Бронза БрАЖ 10-3-1.5		
	Латунь Л-62	Торцовая, наружная цилиндрическая, внутренняя цилиндрическая	
	Латунь ЛМцС 58-2-2		
	Латунь ЛК 80-3	Торцовая, наружная цилиндрическая	
	Латунь ЛС 59-1	Торцовая, внутренняя цилиндрическая	
	Ковкий чугун КЧ 30-6	Торцовая, наружная цилиндрическая	
Белый чугун			
Сталь 1Х18Н9	Белый чугун	Торцовая	
	Сормайт 1		
Ковкий чугун КЧ 30-6	Бронза БрАЖ 9-4		
	Латунь Л-62		
Серый чугун СЧ 18-36	Бронза БрАЖ 9-4		
	Латунь Л-62		
	Латунь ЛМцМ 58-2-2		
Бронза БрАЖ 9-4	Бронза БрОФ 10-1		Торцовая, внутренняя цилиндрическая
	Латунь ЛМцС 58-2-2		
Бронза БрКд-1	Бронза БрКд-1		Торцовая

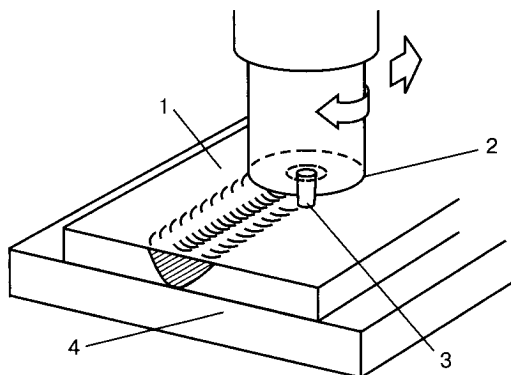
*Примечание. Толщина наплавленного слоя для всех названных образцов составляла 2–5 мм.*

**Таблица 174. Сравнительные технико-экономические показатели различных способов наплавки бронзы и латуни**

Способ наплавки	Производительность, кг/ч	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	Удельная мощность, МВт/м <sup>2</sup>	Средние потери металла, %
Электродуговая штучными электродами	0,7–3,0	6,5–8,0	0,8–1,0	20
Автоматическая дуговая под флюсом	2–8	3–3,5	–	4–19
Газовая	0,5–0,7	–	–	10
Токами высокой частоты	–	–	5,0–10,0	5
Трением	3–12	2,5–4	2,5–4,0	2–4

*Рис. 290. Схема процесса НТП:*

*1 – присадка;  
2 – заплечик;  
3 – штырь со специальным профилем;  
4 – медная заготовка*



нии инструмента образуется прорезной шов. Последовательным наложением таких швов с перекрытием образуется необходимая площадь наплавки.

Наплавку трением с перемешиванием осуществляют при скорости вращения шпинделя 900–1250 об/мин и скорости перемещения штыря 50–70 мм/мин.

Установлена возможность получения поверхностного слоя меди и ее сплавов высокого качества без дефектов и неоднородностей в зоне перемешивания. Размер зерна в зоне перемешивания в 5–10 раз меньше, чем зерна основного металла. Предполагается использовать наплавку трением с перемешиванием для восстановления медных кристаллизаторов машин непрерывной разливки стали.

## Список литературы

1. **Патон Б.Е.** Проблемы сварки на рубеже веков // Автомат. сварка. – 1999. – №1. – С.4-14.
2. **Бернадский В.Н., Маковецкая О.К.** Состояние и перспектива современного рынка сварочной техники // Обзорная информация ИЭС. – 2008. – №2. – 24 с.
3. **Техническое** состояние строительных металлических конструкций в Украине / А.В. Шимановский, В.Н. Гордеев, А.Н. Оглобля и др. // Автомат. сварка. – 2001. – №9. – С.33-38.
4. **Патон Б., Халатов А.** Какие промышленные газотурбинные двигатели нужны украинской ГТС? // Зеркало недели. – 2008. – №26 (705).
5. **Лашенко Г.И., Демченко Ю.В.** Энергосберегающие технологии послесварочной обработки. – К.: Екотехнологія, 2008. – 168 с.
6. **Лобанов Л.М., Бондаренко Ю.К.** Проблемы обеспечения качества сварных конструкций и изделий в Украине // Документ МИС (ПВ) V. – 1180. – 2000. – 18 с.
7. **Походня Н.К.** Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автомат. сварка. – 2003. – №3. – С. 9-20.
8. **Лашенко Г.И.** Сварочное производство и национальная экономика // Сварщик. – 2009. – №1. – С. 34-39.
9. **Лашенко Г.И.** Анализ направлений исследований и разработок в области сварки и родственных технологий // Сварщик. – 2009. – №2. – С. 40-44.
10. **Сварные** строительные конструкции. Т. 1. Основы проектирования конструкций. Под ред. Л.М.Лобанова. – К.: Наукова думка. – 1993. – 416 с.
11. **Аснис А.Е., Иващенко Г.А.** Повышение прочности сварных конструкций. – К.: Наукова думка, 1985. – 256 с.
12. **Назаров Ю.П., Ведяков И.И., Одесский П.Д.** Вопросы применения в строительных конструкциях сталей с ванадием // Сталь. – 2007. – №5. – С. 106-109.
13. **Применение** проката 10ХСНДА, 15ХСНДА в металлоконструкциях железнодорожно-автомобильного мостового перехода через р. Днепр в Киеве // Автомат. сварка. – 2008. – №9. – С. 33-37.
14. **Кирьян В.И., Миходуй Л.И.** Проблемы использования новых сталей повышенной прочности в сварных конструкциях // Автомат. сварка. – 2002. – №3. – С. 10-17.
15. **Перспективы** применения стали 09Г2СЮч в мостостроении / В.И.Кирьян, Л.И.Миходуй, С.Л.Жданов и др. // Сварщик. – 1999. – №2. – С. 4, 7.
16. **Цыган Б.Г., Цыган А.Б.** Вагоностроительные конструкции. Изготовление, модернизация, ремонт. – Кременчуг: Изд-во «Кременчуг», 2005. – 751 с.
17. **Скульский В.Ю., Царюк А.К.** Проблемы выбора свариваемой стали для высокотемпературных компонентов энергоблоков ТЭС (Обзор) // Автомат. сварка. – 2004. – №3. – С. 3-7.
18. **Герольд Х.** Новые аспекты в исследовании свариваемости – предпосылки для технологии и обеспечения качества процесса сварки // Автомат. сварка. – 2008. – №11. – С. 143-150.

19. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б.Е.Патона. М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
20. **Алюминий** и его сплавы в современных сварных конструкциях / А.Я.Ищенко, Т.М.Лабур, В.Н.Бернадский и др. — К.: Экотехнология, 2006. — 112 с.
21. **Сварка** и свариваемые материалы: Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. / Под ред. Э.Л.Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
22. **Сварка** в машиностроении: Справочник. Т. 2 / Под ред. А.И.Акулова. — М.: Машиностроение, 1978. — 462 с.
23. **Рязанцев В.И., Федосеев В.А., Мацнев В.Н.** Создание сварного кузова автомобиля из алюминиевых сплавов // Сварочное пр-во. — 1999. — №11. — С. 36-42.
24. **Блашук В.Е.** Титан: сплавы, сварка, применение // Автомат. сварка. — 2004. — №3. — С. 39-46.
25. **Ахонин С.В.** Международная конференция «Титан-2008 в СНГ» // Автомат. сварка. — 2008. — №9. — С. 60-61.
26. **Сварка** полимерных материалов: Справочник / Под общ. ред. К.И.Зайцева, Л.Н.Мацюк. — М.: Машиностроение. — 1988. — 312 с.
27. **Руге Ю.** Техника сварки: Справ. изд. В. 2-х ч. — М.: Металлургия, Машиностроение. — 1984. — 552 с.
28. **Лашенко Г.И.** Обеспечение точности изготовления сварных конструкций // Сварщик. — 2003. — №1. — С. 16-18; №2. — С. 18-19; №3. — С. 17-21; №4. — С. 10-11; №5. — С. 18-20; №6. — С. 12-14.
29. **Бернадский В.Н.** Тонколистовые сварные составные заготовки «Tailored Blanks» в автомобилестроении // Автомат. сварка. — 2001. — №6.
30. **Ногаев Б.П., Рагунович С.П.** Выбор баз при изготовлении сварных конструкций // Сварщик. — 2002. — №5. — С. 12-14.
31. **Жданов Н.М., Као Куй Чыонг.** Перемещение кромок жесткозакрепленных пластин при выполнении прихваток // Автомат. сварка. — 1978. — №11.
32. **Совершенствование** процесса сборки ортотропных плит для автоматической сварки / С.В.Гурьев, И.В.Муравьев, В.Г.Гребенчук и др. // Сварщик. — 2005. — №1. — С. 6-7, 13.
33. **Образование** горячих трещин при окончании дуговой сварки с повышенной скоростью / В.И.Махненко, С.Л.Мандельберг, Л.А.Петун и др. // Автомат. сварка. — 1967. — №8. — С. 6-10.
34. **Предотвращение** образования горячих трещин на концевых участках швов большой протяженности при односторонней многодуговой сварке под флюсом / Э.Л.Макаров, Х.Херольд, М.Штрайтенбергер и др. // Сварочное пр-во. — 1999. — №10. — С. 3-8.
35. **Сварка** в машиностроении: Справочник. Т. 3 / Под ред. В.А.Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
36. **Севбо П.И.** Комплексная механизация и автоматизация сварочного производства. — К.: Техніка, 1974. — 416 с.
37. **Лашенко Г.И.** Механизация дуговой сварки плавящимся электродом // Сварщик. — 2004. — №2. — С. 29-31.
38. **Чертко А.И., Бельфор М.Г., Лашенко Г.И.** Комплексные рабочие места и участки для механизированной и автоматической дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1988. — №4. — С. 39-44.
39. **Фартушный В.Г., Лашенко Г.И., Никитюк Ю.А.** Оборудование для сварки, наплавки, плазменного упрочнения и напыления. Каталог-справочник. — К.: Экотехнология, 2002. — 60 с.
40. **Комплексная** механизация и автоматизация производства сварных вагонов бункерного типа / Б.Г.Цыган, Л.И.Пирогов, А.В.Донченко и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №8. — С. 34-41.



41. **Штанцель Ю.А., Кононов Н.М.** Комплексно-механизированный участок сварки хребтовых балок грузовых вагонов на ОАО «Днепровагонмаш» // Сварщик. — 1998. — №1. — С. 9-10.
42. **Распорский В.П., Кононов Н.М.** Механизированные установки для сварки полувагонов // Сварщик. — 2006. — №4. — С. 6-8.
43. **Высоколян Н.В.** Особенности технологии сборки и сварки элементов кузова пассажирских вагонов с несущей оболочкой // Сварщик. — 2006. — №3. — С. 6-8.
44. **Комплексное** механизированное производство сварных баллонов для сжиженного газа / Е.Л.Могилевский, Е.Н.Соколов, И.Ш.Винокур и др. // Сварочное пр-во. — 1969. — №11.
45. **Поточное** производство сварных баллонов для сжиженного пропан-бутана / В.З.Анненков, А.П.Гончаров, А.Е.Аснис и др. // Автомат. сварка. — 1986. — №4. — С. 59-32.
46. **Кудрявцев Ю.И., Кудрявцев А.Ю.** Автоматические линии для изготовления сеток непосредственно с бухт арматурной проволоки // Сварочное пр-во. — 2005. — №8. — С. 30-33.
47. **Тимченко В.А., Сухомлин А.А.** Роботизация сварочного производства. — К.: Техника, 1988. — 175 с.
48. **Сварочные роботы** / Под ред. Т. Гердена. — М.: Машиностроение, 1988. — 288 с.
49. **Фаргушный В.Г., Лашенко Г.И., Корон И.Г.** Манипуляторы изделия в робототехнологических комплексах для дуговой сварки и лазерной обработки // Сварочное пр-во. — 1992. — №2. — С. 22-23.
50. **Опыт** создания и промышленной эксплуатации робототехнологических комплексов для дуговой сварки / С.В.Дубовецкий, С.В.Можаев, А.Е.Фролов, Д.В.Плющ // Сварщик. — 2002. — №4. — С. 14-15.
51. **Тимченко В.А.** Роботы в сварочном производстве // Сварщик. — 1998. — №2. — С. 10-11.
52. **Людмирский Ю.Г., Солтовец М.В.** Опыт организационно-технологического проектирования роботизированных комплексов для дуговой сварки // Технология машиностроения. — 2008. — №4. — С. 61-66.
53. **Методика** определения допустимого отклонения линии соединения от заданного положения при сварке / В.А.Тимченко, С.В.Дубовецкий, П.Ф.Федотов и др. // Автомат. сварка. — 1988. — №4. — С. 32-35.
54. **Атрошкин С.М.** Роботизированный комплекс для TIG сварки // Сварщик. — 2005. — №6. — С. 22-23.
55. **Vollautomatische Schweiß-Fertigungs-anlage für Siemens** // Blech-Rohre-Profile. — 2003. — №1. — С. 11.
56. **Бернадский В.Н.** Промышленные роботы в современном производстве // Автомат. сварка. — 2001. — №11. — С. 37-42.
57. **Лашенко Г.И., Урецкий Е.А., Погудин А.В.** Контактная точечная сварка робота модульной конструкции // Сварочное пр-во. — 1991. — №3. — С. 2-5.
58. **Йосио Кондо.** Управление качеством в масштабах компании. Становление и этапы развития. — К.: АДЕФ-Украина, 2007. — 235 с.
59. **Марченко А.Е.** Стандарты ISO серии 9000:2000 — базис для улучшения качества сварочных электродов // Автомат. сварка. — 2002. — №11. — С. 30-37.
60. **Лобанов Л.М., Бондаренко Ю.К., Ярцев А.В.** Проблемы компетентности персонала в системе управления качеством сварочного производства (обзор) // Сварщик. — 2007. — №5. — С. 38-44.
61. **Хофе фон Д.** Новое в стандарте ISO 3834:2005 // Автомат. сварка. — 2008. — №11. — С. 162-165.
62. **Юрлов Б.В., Илюшенко В.М.** Актуальные проблемы повышения качества в сварочном производстве // Сварщик. — 2007. — №5. — С. 19-27.

63. **Проценко П.П., Пономарев В.Е.** О становлении международной квалификационной системы подготовки персонала сварочного производства в Украине // Сварщик. — 2008. — №6. — С. 42-44.
64. **Холопов Ю.В.** Ультразвуковая сварка. — Л.: Машиностроение, 1972. — 152 с.
65. **Управление качеством сварных конструкций на основе системно-процессного моделирования** // Технология машиностроения. — 2008. — №5. — С. 48-54.
66. **Бондаренко Ю.К., Ярцев А.В.** Рекомендации по обеспечению эффективности координации работ в сварочном производстве // Сварщик. — 2005. — №1. — С. 33-35.
67. **Проценко Н.А.** Выбор поставщиков сварочных материалов // Автомат. сварка. — 2002. — №11. — С. 42-45.
68. **Марченко А.Е.** Об изменениях в стандартах ISO серии 9000, ожидаемых после 2008 г. // Сварщик. — 2008. — №1. — С. 48-51.
69. **Проценко Н.А.** Особенности требований гармонизированного стандарта на сварочную проволоку для сварки в среде защитных газов // Сварщик. — 2006. — №5. — С. 46-47.
70. **А. Занирато, А. Сурнин.** Современная технология изготовления сплошной проволоки для сварки в защитных газах // Сварщик. — 2003. — №6. — С. 32-33.
71. **Ю. Лес, В. Зенк.** Опыт повышения качества электродной проволоки для высокопроизводительной сварки в активных защитных газах // Сварщик. — 2005. — №5. — С. 16-19.
72. **Особенности производства сварочной омедненной проволоки в ОАО «Межгосметиз-Мценск»** // Сварщик. — 2005. — №3. — С. 12-15.
73. **Воропай Н.М., Бринюк М.В.** Технологические свойства омедненной сварочной проволоки // Сварщик. — 2002. — №4. — С. 16-20.
74. **Воропай Н.М.** Электролитно-плазменная обработка поверхности сварочной проволоки. Часть 1 // Сварщик. — 2004. — №5. — С. 30-33, 37.
75. **Воропай Н.М.** Электролитно-плазменная обработка поверхности сварочной проволоки. Часть 2 // Сварщик. — 2004. — №6. — С. 20-21.
76. **Беликов А.Б.** Неомедненная проволока ОК AristoRod™ для МАГ-сварки // Сварочное пр-во. — 2007. — №4. — С. 50-52.
77. **Турык Э.В.** Сравнительная оценка качества сплошной электродной проволоки G3Si1 по EN440 // Сварщик. — 2003. — №2. — С. 28-31, 37.
78. **Бринюк М.В., Семенов С.Е.** Улучшение потребительских характеристик сварочной проволоки // Сварщик. — 2001. — №6. — С. 14-15.
79. **Кот А.Н.** Новые разработки концерна ESAB ОК AristoRod и MarathonPac для сварки МАГ // Автомат. сварка. — 2005. — №4. — С. 40-42.
80. **Порошковые проволоки для электродуговой сварки: Каталог-справочник** / Под ред. И.К.Походни. — Киев: Наукова думка, 1980. — 180 с.
81. **Сварка и родственные процессы на выставке в Эссене** // Автомат. сварка. — 2002. — №1. — С. 29-44.
82. **Применение ультразвука в промышленности** / Под ред. А.И.Маркова. — М.: Машиностроение, 1975. — 240 с.
83. **Дампилов В.Г., Шамин С.А., Березин А.Н.** Влияние ультразвуковых колебаний на процесс волочения порошковой проволоки // Сварочное пр-во. — 2005. — №2. — С. 41-42.
84. **Розерт Р., Алимов А.Н., Микитенко А.М.** Организация производства бесшовных порошковых проволок в Украине // Автомат. сварка. — 2005. — №4. — С. 43-46.
85. **Шлепаков В.Н., Гиук С.П., Наумейко С.М.** Новые порошковые проволоки малого диаметра для сварки низкоуглеродистых низколегированных сталей в защитных газах // Сварщик. — 1999. — №5. — С. 6.

86. **Алимов А.Н.** Механизированная сварка порошковой проволокой — путь повышения эффективности изготовления сварных конструкций // Сварщик. — 2002. — №5. — С. 42-43, 45.
87. **Шлепаков В.Н., Билинец А.В.** Порошковые проволоки с металлическим сердечником для сварки в защитных газах // Автомат. сварка. — 2003. — №3. — С. 53-54.
88. **Шлепаков В.Н., Наумейко С.М.** Самозащитная порошковая проволока малого диаметра для сварки металлоконструкций из углеродистых и низколегированных сталей в монтажных условиях // Сварщик. — 2004. — №1. — С. 35.
89. **Шлепаков В.Н., Наумейко С.М.** Самозащитные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2005. — №4. — С. 31-33.
90. **Лашенко Г.И.** Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. — К.: «Екотехнологія», 2006. — 384 с.
91. **Чвурнуг Б.** Влияние состава защитного газа на показатели высокопроизводительной сварки плавящимся электродом в защитных газах // Автомат. сварка. — 2000. — №9-10. — С. 163-166.
92. **Потапьевский А.Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. — К.: «Екотехнологія», 2007. — 192 с.
93. **Римский С.Т.** Руководство по технологии механизированной сварки в защитных газах. — К.: «Екотехнологія», 2006. — 60 с.
94. **Ивашенко Г.М., Пашенко В.А.** Модернизация оборудования для обеспечения сварочных постов смесью аргона с углекислым газом // Сварщик. — 2001. — №4. — С. 10-11.
95. **Влияние** двухслойного кольцевого потока защитных газов на процесс сварки плавящимся электродом / Г.Грибовский, Б.Кравчук, В.А.Ленивкин // Сварочное пр-во. — 1996. — №4. — С. 6-8.
96. **Павлюк С.К., Комарова С.Л.** Оценка уровня конкурентоспособности защитных атмосфер при сварке плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей // Сварочное пр-во. — 2005. — №8. — С. 33-38.
97. **Головко В.В.** Что надо знать при выборе флюса для сварки. Часть 2 // Сварщик. — 1999. — №5. — С. 7-9.
98. **Гончаров И.А., Пальцевич А.П., Токарев В.С.** Низководородный сварочный флюс, обеспечивающий повышенную стойкость сварных швов к поробразованию // Сварщик. — 2002. — №1. — С. 12-13.
99. **Головко В.В.** Применение агломерированных флюсов при сварке низколегированных сталей (Обзор) // Автомат. сварка. — 2003. — №6. — С. 37-41.
100. **Чертко А.И.** Основы рационального проектирования оборудования для автоматической и механизированной сварки и наплавки. — Киев: Наукова думка, 1988. — 240 с.
101. **Андреев В.В.** Источники питания сварочной дуги. 1. Общие сведения. Классификация источника питания, области применения // Сварщик. — 1999. — №2. — С. 26-28.
102. **Оборудование** для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В.В.Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.
103. **Файнберг Л.И.** Оценка стабильности дуговой сварки под флюсом при использовании различных источников питания // Автомат. сварка. — 1998. — №9. — С. 24-26.
104. **Сварочные** источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б.Е.Патон, И.И.Заруба, В.В.Дыменко, А.Ф.Шатан. — К.: «Екотехнологія», 2007. — 248 с.

105. **Основные** тенденции развития производства сварочного оборудования в объединении «СЭЛМА-ИТС» и его применение в России и странах СНГ / М.В.Карасев, Е.А.Копиленко, Г.В.Павленко и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №5. — С. 52-57.
106. **Технологические** свойства сварочных выпрямителей КМГ-401 и КИУ-501 / А.Д.Глуценко, Л.С.Гриценко, С.В.Дух и др. // Сварщик. — 2001. — №6. — С. 10-15.
107. **Андреев В.В., Демченко Ю.В.** Что такое инверторный источник питания? // Сварщик. — 1999. — №1. — С. 16-17.
108. **Сварка** и родственные технологии на выставке в Эссене // Автомат. сварка. — 2002. — №1. — С. 29-44.
109. **Рывкин А.Л.** Источники питания для дуговой сварки // Сварочное пр-во. — 2005. — №3. — С. 29-34.
110. **Инверторные** источники питания сварочной дуги ПО «Коммунар» / Н.А.Горайнов, Г.В.Печенкин, В.К.Рисованный и др. // Сварщик. — 2000. — №4. — С. 8-9, 11.
111. **Рудык С.Д., Турчанинов В.Е.** Профессиональный инверторный сварочный аппарат для дуговой сварки покрытыми электродами «Импульс 2» // Сварщик. — 2000. — №6. — С. 14-15.
112. **Дмитрик В.В., Пругула С.И.** Токоподводящие мундштуки из порошковых материалов для сварочных горелок // Автомат. сварка. — 2005. — №3. — С. 45-47.
113. **Ленивкин В.А., Дюргеров В.Г., Сагиров Х.Н.** Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
114. **Оборудование** ОАО «КЗЭСО» для дуговой и электрошлаковой сварки / Я.И.Микитин, В.И.Окул, С.В.Дух и др. // Автомат. сварка. — 2004. — №9. — С. 53-57.
115. **Новые** разработки НПО «СЭЛМА-ИТС» для дуговой сварки в защитных газах / М.В.Карасев, Д.Н.Работинский, Г.В.Павленко и др. // Автомат. сварка. — 2004. — №5. — С. 40-45.
116. **Воропай Н.М., Илюшенко В.М.** Современные технологии дуговой сварки в защитных газах // Сварщик. — 1998. — №4. — С. 8-9.
117. **Квасов Ф.В.** Особенности механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла // Сварочное пр-во. — 1999. — №8. — С. 27-31.
118. **Бондаренко В.Л.** Дуговая сварка с импульсной подачей проволоки — процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» // Автомат. сварка. — 2004. — №12. — С. 55-58.
119. **Свецинский В.Г.** Механизированная дуговая сварка сталей в защитных смесях газов на основе аргона // Сварщик. — 1998. — №3. — С. 13-14.
120. **Римский С.Т., Галинич В.И., Филинюк И.Я.** Преимущества механизированной сварки конструкционных сталей в смесях защитных газов на основе аргона // Сварщик. — 2001. — №5. — С. 6-7, 11.
121. **Горбач В.Д., Головченко В.С.** Этапы совершенствования технологии сварки под флюсом в судостроении (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — №3. — С. 29-34.
122. **Шаферовский В.А., Серенко А.Н.** Сварка толстостенных конструкций с программированием параметров режима // Сварщик. — 2008. — №3. — С. 8-16.
123. **Осипов Н.Я.** Модернизированные марки сварочных плавленных флюсов АН-348-АП и АН-47Д // Сварщик. — 2000. — №4. — С. 3, 7.
124. **Сварочно-технологические** свойства нового флюса марки АН-47ДП / А.В.Залевский, В.И.Галинич, Н.Я.Осипов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — №11. — С. 46-51.

125. **Походня И.К., Головки В.В.** Флюсы для сварки низколегированных высокопрочных сталей, разработанные в ИЭС им. Е.О.Патона // Сварщик. — 1999. — №1. — С. 8-9.
126. **Головки В.В.** Применение агломерированных флюсов при сварке низколегированных сталей (Обзор) // Автомат. сварка. — 2003. — №6. — С. 37-41.
127. **Пименов А.В.** Керамические флюсы // Сварочное пр-во. — 2005. — №2. — С. 28-29.
128. **Особенности** термического цикла сварки под флюсом пульсирующей дугой / И.К.Походня, В.В.Головки, В.Ф.Грабин, В.Г.Васильев // Автомат. сварка. — 1997. — №9. — С. 3-8.
129. **Меркулов Б.А.** Способы модулирования тока периодической подачей электродной проволоки // Сварочное пр-во. — 1985. — №3. — С. 4-6.
130. **Multiple-wire welding boosts steel pipe output** // Welding Journal. — 2002. — №6. — P. 44-48.
131. **Рыбаков А.А.** Современное состояние производства труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Сварщик. — 2009. — №5. — С. 16-20.
132. **Грант Уильям Б., Кузьменко Г.В., Кузьменко В.Г.** Электродуговая сварка закладным электродом // Сварщик. — 1999. — №1. — С. 13-14.
133. **Дуговая** сварка неподвижным плавящимся электродом сталей аустенитного класса / В.О.Бушма, В.М.Боровик, В.В.Новокрещенов и др. // Сварочное пр-во. — 1999. — №11. — С. 3-5.
134. **Сварка** и родственные процессы на выставке в Эссене // Автомат. сварка. — 2002. — №1. — С. 29-44.
135. **Сварка** в машиностроении: Справочник в 4-х т. Т. 1 / Под ред. Н.А.Ольшанского. — М.: Машиностроение, 1978. — 504 с.
136. **Влияние** состава защитного газа на тепловые условия работы неплавящихся электродов / А.В.Савинов, В.И.Атаманюк, И.Е.Лапин и др. // Сварочное пр-во. — 2007. — №6. — С. 10-14.
137. **Лапин И.Е., Косович В.А.** Неплавящиеся электроды для дуговой сварки. — Волгоград: Политехник, 2001. — 190 с.
138. **Шлифование** вольфрамовых электродов // Сварщик. — 2002. — №5. — С. 46-47.
139. **Будник В.П.** Особенности сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе при прямой полярности // Автомат. сварка. — 2003. — №1. — С. 38-40.
140. **Ерохин А.А., Букаров В.А, Ищенко Ю.С.** Влияние угла заточки вольфрамового катода на образование подрезов и газовых полостей при сварке // Сварочное пр-во. — 1972. — №5.
141. **Ерохин А.А.** Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
142. **Вагнер Ф.А.** Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. — М.: Энергия, 1980. — 120 с.
143. **Усио М., Сугитани Ю.** Разработка высокопроизводительных комплексов для дуговой сварки в Японии // Автомат. сварка. — 2003. — №10-11. — С. 204-210.
144. **Бондаренко В.Л.** Дуговая сварка с присадочной подогреваемой проволокой (TIG-Notwire) на оборудовании ООО «Фрониус-Факел» // Автомат. сварка. — 2000. — №6. — С. 46-50.
145. **Аргонодуговая** сварка неплавящимся электродом с колебаниями дуги / А.Г.Покляцкий, А.Я.Ищенко, А.А.Гринюк и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №2. — С. 18-22.
146. **Разработка** способа сварки ТИГ с применением двух проволок и электромагнитного управления сварочной ванной / Ю.Фуджита, Ю.Манабе, Ю.Зенитани и др. // Автомат. сварка. — 2000. — №9-10. — С. 152-156.

147. **Сварка** с электромагнитным перемешиванием / В.П.Черныш, В.Д.Кузнецов, А.Н.Брискман, Г.М.Шеленков. — К.: Техніка, 1983. — 127 с.
148. **Белоус В.Ю., Прилуцкий В.П., Замков В.Н.** Влияние управляющего магнитного поля на вольфрамовый электрод при сварке титана в узкий зазор // Автомат. сварка. — 2004. — №4. — С. 13-16.
149. **Рыжов Р.Н., Семенюк В.С., Титов А.А.** Особенности формирования и кристаллизации швов при сварке ТИГ с отклонением дуги магнитным полем // Автомат. сварка. — 2004. — №4. — С. 17-20.
150. **Ржанов Б.П.** Применение внешнего магнитного поля для снижения дефектности швов и повышения производительности сварки при изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов / Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Киев, 1982. — 16 с.
151. **Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д., Мальшев А.В.** Применение шестиполосной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2004. — №2. — С. 45-49.
152. **Применение** активных флюсов и активных газов для повышения эффективности дуговой и плазменной сварки / Б.Е.Патон, М.М.Савицкий, В.С.Гвоздецкий и др. // Автомат. сварка. — 2003. — №5. — С. 3-6.
153. **Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко И.В.** Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах сталей и сплавов // Автомат. сварка. — 2001. — №7. — С. 37-43.
154. **Замков В.Н., Прилуцкий В.П.** Теория и практика TIG-F сварки (А-TIG) (Обзор) // Автомат. сварка. — 2004. — №9. — С. 12-15.
155. **Металлургия** и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. С.М.Гуревича. — К.: Наукова думка, 1979. — 300 с.
156. **Способы** применения активаторов для сварки сталей в инертном газе / М.М.Савицкий, А.Ф.Лупан, Г.М.Мельничук и др. // Автомат. сварка. — 2000. — №3. — С. 48-49.
157. **Техника** и режимы аргонодуговой сварки сталей с активирующими флюсами / Д.Байич, Г.М.Мельничук, А.Ф.Лупан и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №10. — С. 34-37.
158. **Прилуцкий В.П.** Исследование и разработка технологии аргонодуговой сварки титановых сплавов с применением присадочной порошковой проволоки. Автореферат дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1982. — 16 с.
159. **Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко И.В.** Аэрозольный активатор ПАТИГ С-А для А-ТИГ сварки стали // Сварщик. — 1998. — №3. — С. 21-22.
160. **А-ТИГ** сварка никелевого сплава Нимоник-75 / К.А.Ющенко, И.В.Коваленко, Д.В.Коваленко и др. // Сварщик. — 2000. — №4. — С. 26-27.
161. **Особенности** процесса автоматической аргонодуговой сварки сталей с алюминиевым покрытием / В.П.Сидоров, А.И.Ковтунов, Т.В.Чермашенцева и др. // Сварочное пр-во. — 2007. — №7. — С. 26-28.
162. **Илющенко В.М., Лукьянченко Е.П.** Разработка флюсов-паст для сварки меди и некоторых ее сплавов. В сб.: «Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ». Краснодар, 22-26 июня 1998 г. — М.: Ассоциация «Электрод». — 1998. — С. 146-148.
163. **Разработка** высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / Кидзи Н., Кобаяси К., Исии Д., Ямаока Х. // Автомат. сварка. — 2003. — №10-11. — С. 59-63.
164. **Гао Х., Ву Л., Донг Х.** Исследование механизма проплавления при двухсторонней сварке ТИГ // Автомат. сварка. — 2003. — №10-11. — С. 77-81.

165. **Рябцев И.А.** Наплавка деталей машин и механизмов. — К.: «Экотехнология», 2004. — 160 с.
166. **Рябцев И.А., Кондратьев И.А.** Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования. — К.: «Экотехнология», 1999. — 64 с.
167. **Сидоров А.И.** Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. — М.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
168. **Королев Н.В., Разиков Н.М.** Экономные и эффективные электродные материалы для упрочняющей наплавки // Сварщик. — 2002. — №2. — С. 15.
169. **Хасун А., Моригаки О.** Наплавка и напыление. — М.: Машиностроение, 1985. — 239 с.
170. **Кондратьев И.А., Рябцев И.А., Черняк Я.П.** Исследование свойств наплавленного металла типа мартенситностареющих сплавов // Автомат. сварка. — 2004. — №10. — С. 16-18.
171. **Быковский О.Г., Пиньковский И.В., Патютин А.В.** Повышение кавитационно-эрозионной стойкости наплавленных деталей гидромашин // Автомат. сварка. — 2000. — №8. — С. 5-9.
172. **Глазов В.В., Дьяков А.Н.** Опыт Института сварки России в разработке технологий наплавки // Сварочное пр-во. — 2006. — №2. — С. 20-24.
173. **Совершенствование** технологии наплавки деталей металлургического оборудования / С.В.Гулаков, В.В.Чигарев, В.П.Иванов и др. // Автомат. сварка. — 2004. — №10. — С. 54-57.
174. **Новый** способ наплавки кромок рабочих органов машин / С.В.Гулаков, В.А.Муратов, И.С.Кулябин и др. // Автомат. сварка. — 1998. — №3. — С. 50-51.
175. **Демченко В.Ф., Козлитина С.С.** Компьютерные системы информационной поддержки сварочного производства // Автомат. сварка. — 2004. — №10. — С. 31-35.
176. **Демченко В.Ф., Рябцев И.А., Козлитина С.С.** Компьютерное проектирование технологий наплавки металлургического оборудования // Сварщик. — 1999. — №2. — С. 14-15.
177. **Кудинов В.В.** Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977. — 184 с.
178. **Исследование** процесса плавления и распыления материала электродов при дуговой металллизации / В.А.Вахалин, С.Б.Масленков, В.Е.Белашенко и др. // Физика и химия обработки материалов, 1981. — №3. — С. 58-63.
179. **Коробов Ю.С.** Совершенствование технологии электродуговой металллизации на основе моделирования взаимодействия металла с газами и исследования свойств покрытий: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. — Екатеринбург, 2004. — 32 с.
180. **Константинов В.М., Губанов А.С.** Влияние легирующих элементов стальной проволоки на структуру и свойства покрытий при электродуговом напылении // Сварочное пр-во. — 2007. — №5. — С. 13-18.
181. **Морозов М.Е., Вахалин В.А.** Повышение эффективности процесса электродуговой металллизации // Труды ВНИИАвтогенмаш. Выпуск XVI. — М.: Машиностроение, 1969. — С. 135-147.
182. **Коробов Ю.С.** Оценка сил, действующих на распыляемый металл при электрометаллизации // Автомат. сварка. — 2004. — №7. — С. 23-27.
183. **Агеев В.А., Белашенко В.Е.** Газодинамические аспекты интенсификации процесса эвакуации и диспергирования расплавленного металла при электродуговой металллизации // Интенсификация автогенной обработки, термической резки и напыления // Труды ВНИИАвтогенмаш. — 1988. — С. 64-73.
184. **Петров С.В., Сааков А.Г.** Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. — Киев: ТОПАС, 2000. — 220 с.

185. **Коробов Ю.С., Бороненков В.Н.** Расчет параметров движения, нагрева и окисления частиц при электродуговой металлизации // Сварочное пр-во. — 1998. — №3. — С. 9-13.
186. **Порошковые** проволоки систем FeCrV+Al и FeCrV+Al+C для электродуговой металлизации / В.И.Похмурский, М.М.Студент, В.М.Довгуньк и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №3. — С. 32-35.
187. **Какуевецкий В.А.** Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин. — К.: Техника, 1898. — 176 с.
188. **Полуавтоматическая** линия для восстановления тяжело нагруженных колчатых валов / С.В.Петров, А.Г.Сааков, Г.И.Лашченко и др. // Сварщик. — 2002. — №2. — С. 40-41.
189. **Газопламенная** обработка металлов / Под ред. Д.Л.Глиманенко. — М.: Профгехиздат, 1962. — 556 с.
190. **Харламов Ю.А.** Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин // Тяжелое машиностроение. — 2000. — №2. — С. 10-13.
191. **Клейман А.Ш.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники электрометаллизационными покрытиями из порошковых проволок на основе ферросплавов / Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Кишинев: Кишиневский СХИ им. Фрунзе. — 1990. — 20 с.
192. **Матвейшин Е.Н.** Нанесение слоев с высокой прочностью сцепления методами дуговой металлизации // Автомат. сварка. — 2000. — №8. — С. 20-22.
193. **Коробов Ю.С.** Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное пр-во. — 2005. — №2. — С. 47-49.
194. **Справочник** сварщика. Под ред. В.В.Степанова. — М.: Машиностроение, 1967. — 430 с.
195. **Гутман Л.М., Юзькив Я.М.** Технология резки металлов электродами АНР-2 // Автомат. сварка. — 1976. — №6. — С. 52-55.
196. **Шапиро И.С., Вишняков В.Ю., Сидлин З.А.** Совершенствование резки арматурной стали // Сварочное пр-во. — 1989. — №8. — С. 5-7.
197. **Кононенко В.Я.** Технологии подводной сварки и резки. — Киев: Экотехнология, 2004. — 136 с.
198. **Нефьодов Ю.М.** Технология механизированного подводного дугового резания сталей порошковым дротом / Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд техн. наук. — Київ, 1993. — 16 с.
199. **Иванов Б.Г., Журавецкий Ю.И., Левченков В.И.** Сварка и резка чугуна. — М.: Машиностроение, 1977. — 208 с.
200. **Антонов И.А.** Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 164 с.
201. **Дидус Ю.А.** Ручные резаки фирмы «Абикор Бинцель» для воздушно-дуговой строжки // Сварщик. — 2001. — №2. — С. 32-33.
202. **Зварювання** та споріднені процеси. Терміни та визначення / Держстандарт України 3761.2-98. — К.: Держстандарт, 1999. — 53 с.
203. **Гвоздецкий В.С., Макаренко Н.А.** Плазменная сварка (Обзор) // Автомат. сварка. — 2000. — №12. — С. 26-30.
204. **Рагунович С.П., Цыганов В.А., Шелег В.К.** Электродуговая сварка на форсированных режимах // Автомат. сварка. — 2000. — №9-10. — С. 113-116.
205. **Щенко К.А., Савченко В.С., Наконечный А.А.** Плазменно-порошковая сварка металлических и композиционных материалов // Тез докл. международ. конф. «Сварные конструкции». — Киев, 2000. — С. 144-145.



206. **Алексеев А.В., Шевченко А.Э.** Физико-технологические характеристики двухдугового плазменного источника нагрева // Сварочное пр-во. — 1992. — №8. — С. 20-22.
207. **Бернадский В.Н.** Гибридные технологии сварки и соединения // Сварщик. — 2009. — №6. — С. 23-31.
208. **Микроплазменная сварка** / Б.Е.Патон, В.С.Гвоздецкий, Д.А.Дудко и др. — К.: Наукова думка, 1979. — 248 с.
209. **Патон В.Е., Воропай Н.М., Гвоздецкий В.С.** Комплекс оборудования для механизированной сварки сотовых алюминиевых конструкций // Автомат. сварка. — 2002. — №3. — С. 36-40.
210. **Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А.** Плазменная наплавка. — К.: Экотехнология, 2007. — 292 с.
211. **Нефедов Б.Б., Лялякин В.П.** Развитие плазменной сварки-наплавки за рубежом // Сварочное пр-во. — 1998. — №3. — С. 21-27.
212. **Сом А.И.** Новые плазмотроны для плазменно-порошковой наплавки // Автомат. сварка. — 1999. — №7. — С. 44-48.
213. **Bonaifi V., Plegge T., Sommer D.** Hochleistung-Plasma-Pulver-Auftragsschweissen-Leisstungs-steigerung und Standzeitverbesserung Verschleiss und Korrosionsbeanspruchter Bauteile // Schweissen und Schneiden. — 1992. — №12. — S. 675-677.
214. **Переплетчиков Е.Ф.** Плазменно-порошковая наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания // Автомат. сварка. — 2002. — №1. — С. 45-46.
215. **Технология плазменной порошковой наплавки выпускных клапанов двигателей автомобиля «ВАЗ»** / С.Р.Аманов, А.В.Каригин, Д.Ю.Копылов и др. // Сварочное пр-во. — 2005. — №2. — С. 33-40.
216. **Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А.** Плазменно-порошковая наплавка деталей запорной арматуры различного назначения // Сварщик. — 2007. — №4. — С. 6-11.
217. **Цветков Ю.В., Самохин А.В.** Плазменная нанопорошковая металлургия // Автомат. сварка. — 2008. — №11. — С. 171-175.
218. **Борисов Ю.С., Каплина Г.С., Астахов Е.А.** Газотермические покрытия из нанокристаллических порошков. «Сварка и родственные технологии — в третье тысячелетие». Сб. тезисов стэнд. докл. — Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ. — 2008. — С. 199-200.
219. **Лашенко Г.И.** Плазменное упрочнение и напыление. — К.: «Экотехнологія», 2003. — 64 с.
220. **Дехелян Д., Маркошан Н.** Изготовление изделий из тугоплавких металлов способом газотермического напыления // Автомат. сварка. — 2003. — №10-11. — С. 158-162.
221. **Газотермические покрытия из порошковых материалов** / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — К.: Наукова думка, 1987. — 544 с.
222. **Кудинов В.В., Иванов В.М.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.
223. **Технология** восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей вращения и плоских поверхностей плазменным напылением / Г. М. Русеев, В. В. Овсянников, С. М. Киселев, Н. Ф. Галюк // Автоматическая сварка. — 2000. — № 12. — С. 61-62.
224. **Микроплазменное напыление биокерамических покрытий** / Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, В. Г. Бобрик и др. // Автоматическая сварка. — 2000. — №12. — С. 63-67.
225. **Краснов А. Н., Шаривкер С. Ю., Зильбербер В. Г.** Низкотемпературная плазма в металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.

226. **Борисов Ю.С., Кислица А.Н.** Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов // Автоматическая сварка. — 2002. — №3. — С. 54-55.
227. **Борисов Ю.С., Петров С.В.** Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автоматическая сварка. — 1995. — № 1. — С. 41-44.
228. **Влияние** условий плазменного напыления на структуру покрытий из сплава Fe-Mo-Cr-Ni-B / А. Л. Борисова, В. Г. Бобрик, Ю. С. Борисов и др. // Автоматическая сварка. — 1995. — № 7. — С. 28-34.
229. **Харламов Ю. А., Борисов Ю. С.** Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка. — 2001. — № 6. — С. 19-25.
230. **Рациональные** режимы дробеструйной очистки чугунных отливок / М. Я. Мерович, И. Г. Ясковский, Ю. А. Чукалин, И. Я. Балакин. — Л.: ЛДНТП, 1972. — 26 с.
231. **Борисов Ю. С., Коржик В. Н.** Аморфные газотермические покрытия. Теория и практика (Обзор) // Автоматическая сварка. — 1995. — № 4. — С. 3-11.
232. **Разработка** процесса получения порошков для газотермического напыления из стружки серого чугуна / Ю. С. Борисов, В. Н. Коржик, М. Т. Панько, М. Л. Князь // Автоматическая сварка. — № 6. — С. 7-12.
233. **Панько М. Т.** Розробка технології повітряно-газового плазмового напылення зносостійких покриттів із порошків на основі стружки із сірого чавуну // Автореф. дисерт. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук. — К., 1996.
234. **Пашенко В. Н.** Особенности применения многокомпонентных газовых смесей в плазматронах для нанесения покрытий // Автоматическая сварка. — 1998. — № 6. — С. 23-26.
235. **Повышение** сопротивления усталости стальных деталей с газотермическим покрытием в результате ультразвуковой обработки / Ю. С. Борисов, А. Г. Ильенко, А. Л. Гайдаренко, В. Б. Марголин // Автоматическая сварка. — 1991. — №1. — С. 35-37.
236. **Влияние** струйно-абразивной обработки в процессе плазменного напыления на эрозионную стойкость покрытий на основе никеля / С. Л. Рево, Н.Н. Дашевский, А. Л. Борисова // Автоматическая сварка. — 1996. — №2. — С. 20-23.
237. **Особенности** оплавления напыленных покрытий из никелевых самофлюсующихся сплавов / Ю. С. Борисов, Е. Н. Тарасенко, В. А. Неуймин и др. // Автоматическая сварка. — 1995. — № 5. — С. 22-25.
238. **Ковалевский А. А.** Изготовление технологической оснастки с применением метода плазменного напыления. Обзор. — Рига: ЛатИНТИ. — 1977. — 39 с.
239. **Соколов Ю. В., Коган Г. В.** Технологические аспекты процесса изготовления матриц пресс-форм напылением и пути его совершенствования. — М.: БелНИИ ИНТИ, 1990. — 28 с.
240. **Мякота И. С., Поляков С. П., Борисов Ю. С.** Изготовление корковых изделий из сплавов системы Cu-Al-Fe методом плазменного напыления // Автоматическая сварка. — 1999. — № 7. — С. 37-43.
241. **Киселев Л. А.** Восстановление деталей воздушно-плазменным напылением // Машиностроение. — 1991. — № 9. — С. 38-39.
242. **Галатин Р. Р., Корж В. Н.** Опыт повышения эффективности изготовления узлов трения путем плазменного напыления покрытий из бронзы // Автоматическая сварка. — 1996. — № 1. — С. 58-59.
243. **Сааков А. Г., Петров С. В.** Катализатор комплексной очистки отработавших автомобильных газов // Мир техники и технологий. — 2002. — № 8. — С. 52-53.

244. **Фартушный В. Г., Лащенко Г. И., Никитюк Ю. А.** Оборудование для сварки, наплавки, плазменного упрочнения и напыления. Каталог-справочник. — К.: Экотехнология, 2002. — 60 с.
245. **Девкин М.М., Севастьянов Н.Д.** Очистка поверхностей деталей металлическим песком / Под ред. Л. Ф. Лиокумовича. — М.: Машиностроение, 1968. — 65 с.
246. **Лащенко Г. И.** Струйно-абразивная обработка поверхностей металлоконструкций и деталей // Мир техники и технологий. — 2002. — № 8. — С. 54-56.
247. **Лащенко Г. И.** Плазменная резка металлов и сплавов. — К.: «Экотехнология», 2003. — 64 с.
248. **Быховский Д. Г.** Плазменная резка. — Л.: Машиностроение, 1972. — 168 с.
249. **Васильев К.В.** Плазменно-дуговая резка. — М.: Машиностроение, 1974. — 112 с.
250. **Васильев К. В., Никифоров Н. И.** О факторах, определяющих ширину плазменно-дугового реза // Сварочное производство. — 1977. — № 6. — С. 40-41.
251. **Васильев К. В., Черняк Р. В.** Исследование плазмообразующих добавок при воздушно-плазменной резке // Сварочное производство. — 1994. — №2. — С. 5-10.
252. **Головченко В. С., Доброленский В. П., Мисюров И. Л.** Тепловая резка металлов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1975. — 272 с.
253. **Ширшов И. Г., Котиков В. Н.** Плазменная резка. — Л.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
254. **Эсибян Э. М.** Плазменно-дуговая аппаратура. — К.: Техніка, 1971. — 164 с.
255. **Лащенко Г.И.** Анализ энергетических характеристик процессов термической резки низкоуглеродистых сталей // Автоматическая сварка. — 1997. — № 11. — С. 37-41.
256. **Kitamura K.** Mit umrsten zum Fine Plasma // Technische Rundschau. — 1994. — №47. — S. 16-19.
257. **Вайнбойм Д.Н., Гольфарб В.М., Юрк А.Д.** Резка металлов сжатой воздушной дугой с циркониевым катодом // Сварочное производство. — 1967. — №8. — С. 1-3.
258. **Черняк В.Р.** Тепловые характеристики плазменной дуги при обдуве воздушно-углеводородной смесью // Автоматическая сварка. — 1982. — №10. — С. 10-14.
259. **Лащенко Г.И., Лысенко М.Т., Богданов В.М.** Воздушно-плазменная резка металла, уложенного над водной поверхностью // Сварочное производство. — 1985. — №4. — С. 7-9.
260. **Modsen H., Huster H.** Plasmaschneiden unter Wasser mil den Plasmaanlagen PA 12 UWP und PA 50 UWP // Schweisstechnik. — 1989. — № 2. — S. 51-55.
261. **Васильев К. В.** Влияние богатых кислородом плазмообразующих смесей на качество и производительность резки // Интенсификация автогенной обработки, термической резки и напыления. — К.: Труды ВНИИавтогенмаша, 1988. — С. 15-22.
262. **Васильев К. В., Кожевников В. В., Кохликян Л. О.** Промышленное применение высокоэффективного процесса супервоздушной плазменной резки // Сварочное производство. — 1982. — № 6. — С. 13-14.
263. **Manochar M., Snyder J-P.** Dross Formation during Plasma Arc Cutting of steels // Welding Journal. — 1994. — №11. — С. 45-51.
264. **Малин В. Е., Шухмайстер В. Л., Котик В. Т.** Повышение качества кромок за счет снижения скорости воздушно-плазменной резки // Сварочное производство. — 1976. — №9. — С. 42-43.
265. **Шухмайстер В. Л., Котик В. Т.** Повышение качества кромок при воздушно-плазменной резке // Сварочное производство. — 1981. — № 3. — 28 с.

266. **J. Gorka, A. Klimpel.** Analiza jakosci cieca plasma powitrzna // Biuletyn instytutu spawalnictwa. — 1997. — № 5. — С. 100-103.
267. **Походня И. К.** Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение. — 1972. — 256 с.
268. **Насыщение** газами кромок, выполненных воздушно-плазменной резкой, и его влияние на образование пор в швах / К.В. Васильев, Г.А. Асиновская, Л.О. Кохлякян, Л. М. Федорова // Автоматическая сварка. — 1974. — №9. — С. 67-70.
269. **Кобелева Н. К., Дроздов А. П., Жикол В. М.** Предотвращение пор при сварке деталей из корпусных сталей, вырезанных воздушно-плазменной резкой // Сварочное производство. — 1975. — № 3. — С. 33-35.
270. **Пухиря В. И., Вихарев А. Ф., Тарасов В. М.** Пыле- и газовыделение при плазменной резке металлов // Сварочное производство. — 1982. — №10. — 35 с.
271. **Степанов В. В., Пыкин Ю. А., Нечаев В. И.** Акустические параметры при плазменно-механической резке труб // Сварочное производство. — 1982. — №10. — С. 36-37.
272. **Фильченков Д. И., Диженин В. А.** Плазменная резка с использованием водяной подушки // Сварочное производство. — 1982. — № 10. — 28 с.
273. **J. Czech, J. Matusiak, M. Wozniak.** Ekologiczne ciecie plazmowe metali za pomoca maszyn sterowanych numerycznie // Biuletyn instytutu spawalnictwa. — 1997. — № 3. — S. 42-45.
274. **Левченко О. Г., Метлицкий В. А.** Организация рабочего места при плазменной резке // Сварщик. — 1998. — № 2. — С. 28-30.
275. **Арсенюк В. В.** Новый способ изготовления термохимических катодов для плазмотрона // Автоматическая сварка. — 2000. — № 6. — С. 36-39.
276. **Kjelberg.** Plasmасhneidenanlagen. Проспект KGB-PAS 75CNC Д-9805.
277. **Эсибян Э. М.** Выбор способов и оборудования для термической резки металлов // Сварщик. — 1999. — № 3. — С. 9-10.
278. **Павленко Г. В., Сорока В. Л.** Установки для плазменно-дуговой резки ОАО «Фирма СЭЛМА» // Сварщик. — 1999. — № 3. — С. 9-10.
279. **Веселков В. Д., Филиппов Е. В., Незнаев В. И.** Опыт создания гибкого автоматизированного участка термической резки // Сварочное производство. — 1988. — №5. — С. 17-19.
280. **Смирнов В. В., Роговой М. Д., Повстан В. И.** Работы Института сварки России в области плазменного оборудования и технологий (Обзор) // Автоматическая сварка. — 2000. — № 12. — С. 17-20.
281. **Дзюба В. Л., Корсунов К. А.** Плазмотроны для резки металла больших толщин // Сварщик. — 2002. — № 6. — 3 с.
282. **Киселев Ю. Я.** Плазменно-воздушная резка металлов с использованием медных электродов. — Кишинев: Штиница, 1977. — 88 с.
283. **Васильев К.В.** Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях (Обзор) // Автомат. сварка. — 2000. — №12. — С. 21-25.
284. **Ведерников А.В.** Водоинжекционная плазменная резка // Мир техники и технологий. — 2003. — №4. — С. 28.
285. **Ведерников А.В.** Плазменная резка с раздельной подачей двух газов // Сварщик. — 2003. — №5. — С. 16-17.
286. **Данилов А.И.** Современное оборудование для плазменной резки // Сварочное пр-во. — 2006. — №1. — С. 38-41.
287. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
288. **Григорьянц А.Г., Лебедев Ф.В.** Физические основы технологических лазеров. — М.: Высшая школа, 1987. — 191 с.

289. **Технологические лазеры:** Справочник: В 2 т. Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г.А.Абилснитов, В.С.Голубев, В.Г.Гонтарь и др. — М.: Машиностроение, 1991. — 432 с.
290. **Коваленко В.С.** Лазерная технология на новом этапе развития // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 4-9.
291. **Брандт М.** Промышленные лазеры: принцип работы и возможные области применения // Сварщик. — 2001. — №3. — С. 30-32.
292. **Грезев А.Н.** Плазмообразование при лазерной сварке // Сварочное пр-во. — 2005. — №5. — С. 20-25.
293. **Особенности** сварки тонколистовых низкоуглеродистых сталей импульсно-периодическим излучением CO<sub>2</sub>-лазера / В.Ю.Хаскин, С.Ю.Павловский, В.П.Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2001. — №2. — С. 42-45.
294. **Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н.** Лазерная сварка металлов. — М.: Высшая школа, 1988. — 207 с.
295. **Лазерная** сварка тонколистовых сталей с использованием специальных приемов / В.Д.Шелягин, В.Ю.Хаскин, А.В.Спора и др. // Автомат. сварка. — 2003. — №1. — С. 41-44.
296. **Гибридная** лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б.Е.Патон, В.С.Гвоздецкий, И.В.Кривцун и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №3. — С. 5-9.
297. **Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю.** Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2002. — №6. — С. 28-32.
298. **Гибридная** сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В.Д.Шелягин, В.Ю.Хаскин, В.П.Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2002. — №10. — С. 38-41.
299. **Schweissen im XXL-Format** // Maschinenmarkt. — 2003. — №7. — S. 28-29.
300. **Graf T., Stauffer H.** Laser-gibrid welding drives VW improvements // Welding journal. — 2003. — №1. — P. 42-48.
301. **Райзен У., Ольмок С.** Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом // Автомат. сварка. — 2009. — №4. — С. 46-51.
302. **Лазерная** сварка стыковых соединений с высокочастотным подогревом кромок / В.Ю.Хаскин, В.Д.Шелягин, В.П.Гаращук и др. // Автомат. сварка. — 2001. — №11. — С. 28-31.
303. **Бондарев А.А., Бондарев Андр.А.** Лазерная сварка алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 21-27.
304. **Назаренко О.К., Морочко В.П.** Применение мощных CO<sub>2</sub>-лазеров в зарубежном сварочном производстве (Обзор) // Автомат. сварка. — 1989. — №4. — С. 43-49.
305. **Исследование** влияния скорости лазерной сварки на структуру и свойства алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием / Шиганов И.Н., Шахов С.В., Тарасенко Л.В. и др. // Сварочное пр-во. — 2005. — №7. — С. 17-22.
306. **Ebert T., Hansen D.** Daurhafte Bindung // Laser-Prax. — 2001. — №3. — S. 8, 10-11.
307. **Лазерная** сварка и пайка в автомобилестроении / Ф. Альберт, А. Гримм, С. Кагелер и др. // Автомат. сварка. — 2008. — №6. — С. 37-42.
308. **Rudiger K.** Leichbau mit Licht // Maschinenmarkt. — 2002. — №35. — S. 22-23.
309. **Bergmann J.P., Kunst M.** Remote-Schweissen Verzinkter Stahle mit einem Kohlendioxidlaser // Praktiker. — 2003. — №10. — S. 323-326.
310. **Lee A., Henderson D., Moses R.** Laser beam welding of tubes for automative hydroforming applications // Welding journal. — 2003. — №3. — P. 39-41.

311. **Разработка** системы сварки с CO<sub>2</sub>-лазером мощностью 45 кВт для осуществления непрерывной горячей прокатки // Новости черной металлургии за рубежом. — 2001. — №4. — С. 79.
312. **Зайффарт П., Гофман Я.** Лазерные технологии в судостроении — реальность и перспективы // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 11-17.
313. **Laser in Schiffbau** // Blech Rohre Profile. — 2003. — №4. — S. 24-27.
314. **Laserstrahlgeschweisste** Edelstahl-Waggon // Blech Rohre Profile. — 2002. — №6. — S. 11.
315. **Laserstrahlgeschweisste** Edelstahl-Waggon // Werkstat Fertigung. — 2003. — №2. — S. 4.
316. **Панченко В.Я., Голубев В.С.** Развитие лазерных технологий обработки материалов в ИПЛИТ РАН // Автомат. сварка. — 2002. — №4. — С. 42-47.
317. **Лазерные** установки в современных сварочных технологиях. Исследования и применение / Я.Пилярчик, М.Банасик, Д.Дворак и др. // Автомат. сварка. — 2008. — №11. — С. 88-92.
318. **Гарашук В.П., Хаскин В.Ю.** Перспективы использования лазерных технологий в промышленности Украины // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 18-20.
319. **Штауфер Х., Хакль Х.** Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 29-32.
320. **Земан В., Добай-Тумидаевич Б.** Техничко-экономические аспекты лазерной сварки и резки // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 62-67.
321. **Особенности** лазерно-порошковой наплавки самофлюсующихся порошков различных фракций / С.Г.Горный, А.К.Лозовой, Н.Н.Одинцов и др. // Сварочное пр-во. — 1988. — №12. — С. 2-3.
322. **Курьяников Е.И., Ерофеев В.А.** Оптимизация технологических параметров лазерной газопорошковой наплавки на основе математического моделирования // Сварочное пр-во. — 2007. — №4. — С. 21-25.
323. **Григорьянц А.Г., Мисюрлов А.И., Чжан Цин.** Формирование наплавленных слоев с использованием лазерного импульсно-периодического излучения // Сварочное пр-во. — 2007. — №8. — С. 18-21.
324. **Особенности** лазерной наплавки сканирующим лучом с подачей порошка / С.Г.Горный, А.К.Лозовой, В.А.Лопата и др. // Автомат. сварка. — 1987. — №9. — С. 67-68.
325. **Головко Л.Ф., Дувейк Д., Орешник В.И.** Обеспечение качества слоев, полученных лазерной наплавкой или упрочняющей обработкой // Автомат. сварка. — 2001. — №12. — С. 47-52.
326. **Kolenic F., Blazicek P., Kosecek M.** Лазерная наплавка металлическими порошками // Сварщик. — 2007. — №2. — С. 35-39.
327. **Хаскин В.Ю.** Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения (Обзор) // Автомат. сварка. — 2008. — №12. — С. 24-32.
328. **Архипов В.Е., Биргер Е.М.** Лазерная наплавка покрытий // Машиностроитель. — 1985. — №6. — С. 27-29.
329. **Архипов В.Е., Биргер Е.М.** Технологические особенности лазерной порошковой наплавки // Сварочное пр-во. — 1986. — №3. — С. 8-10.
330. **Григорьянц А.Г., Соколов А.А.** Лазерная резка металлов. — М.: Высшая школа, 1988. — 127 с.
331. **Хаскин В.Ю., Бернацкий А.В.** Сварка тонкостенных стальных изделий с неплотно прилегающими кромками, выполняемая методом лазерной наплавки // Сварщик. — 2008. — №4. — С. 14-15.
332. **Кайдалов А. А.** Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов. — К.: Экотехнология, 2007. — 456 с.

333. **Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М.** Малоотходные процессы резки лучом лазера. — К.: Техніка, 1987. — 112 с.
334. **Schaefer R.** Laser cutting the hype // Weld. and Metal Fabr. — 1999. — №7.
335. **Bates C.** Cutting through the hype-comparing precision plasma cutting with laser cutting // Weld. and Metal Fabr. — 1999. — №10.
336. **Dickmann K., Sowada I.** Kostenanalyse am Beispiel des Laserstrahlschneidens // Schweissen und Schneiden. — 1998. — №7.
337. **Разработка** лазерных технологических комплексов / А.Н.Сафонов, В.Е.Кашин, А.Н.Грезев и др. // Электротехника. — 1988. — №10. — С. 14-15.
338. **Технология** лазерной наплавки и термообработки деталей колесных пар подвижного состава / И.Д.Козубенко, В.Ю.Хаскин, В.Д.Черниенко // Автомат. сварка. — 2001. — №3. — С. 35-37.
339. **Бернадский В.Н., Рябцев И.А.** Мобильные установки для ручной и механизированной сварки и обработки металлов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — №9. — С. 44-47.
340. **Виль В.И.** Сварка металлов трением. — Л.: Машиностроение, 1976. — 176 с.
341. **Вавилов А.Ф., Воинов В.П.** Сварка трением. — М.: Машиностроение, 1964. — 155 с.
342. **Сварка трением:** Справочник / Под общ. ред. В.К.Лебедева, И.А.Черненко, В.И.Вилля. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
343. **Томас В.М., Николас Е.Д.** Наплавка трением и новые методы плакирования трением (Обзор) // Автомат. сварка. — 1994. — №3. — С. 55-61.
344. **Современное состояние** сварки трением (Обзор). Часть 1 / Э.С.Каракозов, Р.И.Мустафаев, Н.В.Мельникова // Сварочное пр-во. — 1989. — №8. — С. 2-5.
345. **Современное состояние** сварки трением (Обзор). Часть 2 / Э.С.Каракозов, Р.И.Мустафаев, Н.В.Мельникова // Сварочное пр-во. — 1989. — №9. — С. 1-4.
346. **Инерционная** сварка и принципы ее применения. Inertia Welder Department, Caterpillar, Peoria, Illinois (USA). — 1980. — 28 p.
347. **Черненко И.А., Зяхор И.В.** Сварка трением разнородных металлов и сплавов // Сварщик. — 1999. — №1. — С. 10-12.
348. **Зяхор И.В.** Особенности сварки трением разнородных металлов и сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2000. — №5. — С. 37-46.
349. **Зяхор И.В.** Современное оборудование для сварки трением // Автомат. сварка. — 2001. — №7. — С. 48-52.
350. **Штрикман М.М.** Новый способ сварки трением и перспективы его применения (Обзор) // Сварочное пр-во. — 2001. — №11. — С. 36-41.
351. **Третьяк Н.Г.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — №7. — С. 12-21.
352. **Штрикман М.М.** Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор). Ч.1 // Сварочное пр-во. — 2007. — №9. — С. 35-40.
353. **Штрикман М.М.** Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (Обзор). Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки // Сварочное пр-во. — 2007. — №10. — С. 25-32.
354. **Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Подъельников С.В.** Сварка трением с перемешиванием — эффективный способ получения неразъемных соединений в твердой фазе (Обзор) // Сварщик. — 2007. — №3. — С. 22-29.
355. **Ищенко А.Я., Подъельников С.В., Покляцкий А.Г.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — №11. — С. 32-38.
356. **Покляцкий А.Г., Гринюк А.А., Подъельников С.В.** Сварка трением с перемешиванием тонколистовых материалов // Сварщик. — 2007. — №5. — С. 11-13.

357. **Сварка** и наплавка трением с перемешиванием меди и ее сплавов / М.Л.Жадкевич, Н.Г.Третьяк, П.М.Кавуненко и др. // Автомат. сварка. — 2007. — №11. — С. 28-31.
358. **Свариваемость** медных сплавов при шовной сварке трением / К.Саволайнен, Ю.Мононен, Т.Саукконен и др. // Сварщик. — 2004. — №6. — С. 26-31.
359. **Сварка** трением деталей станков и машин / В.К.Алилуев, Г.И.Лашенко, В.Е.Попов и др. // Технология производства, научная организация труда и управление. — 1980. — №7. — С. 5-7.
360. **Определение** экономической целесообразности изготовления деталей машин и оборудования в сварном исполнении и выбор оптимального варианта технологии их изготовления. Методические рекомендации / В.Г.Фартушный, Г.И.Лашенко, В.А.Коваленко и др. — М.: НИИМАШ, 1983. — 79 с.
361. **Устройство** контроля параметров режима сварки трением деталей станков и машин / Г.И.Лашенко, В.Е.Попов, Л.С.Харченко и др. // ЭИ Сварка, термообработка, покрытия. — М.: НИИМАШ, 1981. — Выпуск 1. — С. 1-3.
362. **Нейман Дж., Бокхов Ф.Дж.** Сварка пластмасс. — М.: Машиз, 1961. — 238 с.
363. **Зайцев К.И., Мацюк Л.Н.** Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1978. — 223 с.
364. **Неккель З.** Сварка пластмасс трением // Сварочное пр-во. — 1972. — №11. — С. 52-53.
365. **Кулик Э.И., Локшин Р.Ф.** Сварка пластмасс трением // Сварочное пр-во. — 1982. — №1. — С. 8.
366. **Тяяр Х.А.** Сварка трением как способ восстановления изношенных деталей // Сварочное пр-во. — 1959. — №10. — С. 23-24.
367. **Тяяр Х.А.** Расчеты и исследования наплавки трением // Автомат. сварка. — 1961. — №7. — С. 33-39.
368. **Упрочняющая** наплавка трением стеллита ВЗК на сталь / М.В.Ногин, И.С.Койфман, Р.И.Заксон и др. // Сварочное пр-во. — 1970. — №7. — С. 16-17.
369. **Фрикционная** наплавка чугуна на сталь / Е.И.Плужникова, Э.Л.Демина, В.Я.Кершенбаум и др. // Металловедение и термическая обработка. — 1970. — №11. — С. 46-47.
370. **Авербух Б.А., Велинский А.Л.** Тепловой эффект при наплавке трением // Автомат. сварка. — 1975. — №11. — С. 29-31.
371. **Авербух Б.А.** Новый способ восстановления изношенных деталей // Бурение и эксплуатация скважин. Тр. МИНХ и ГП им.И.М.Губкина. — 1960. — Вып. 29. — С. 102-105.
372. **Кершенбаум Я.М., Авербух Б.А.** Особенности наплавки трением бронзы на сталь // Автомат. сварка. — 1964. — №3. — С. 19-22.
373. **Кершенбаум Я.М., Авербух Б.А.** Изготовление биметаллических деталей нефтехимического оборудования наплавкой трением: Тематический обзор. — М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1972. — 63 с.
374. **Кершенбаум Я.М., Авербух Б.А.** Особенности наплавки трением бронзы на сталь // Автомат. сварка. — 1964. — №3. — С. 19-22.
375. **Кершенбаум Я.М., Авербух Б.А.** Оптимальные размеры деталей, изготовленных наплавкой трением // Автомат. сварка. — 1972. — №5. — С. 64-66.
376. **Кершенбаум Я.М., Авербух Б.А., Людмирская Н.Г.** Исследование процесса наплавки трением бронзы на сталь // Автомат. сварка. — 1968. — №2. — С. 6-9.



# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
<b>Глава 1. Основные направления совершенствования и развития сварочного производства</b> .....	8
1.1. Роль сварочного производства в развитии национальной экономики.....	8
1.2. Основные конструкционные материалы и особенности их сварки.....	25
1.3. Обеспечение точности изготовления сварных конструкций.....	76
1.4. Механизация и автоматизация сварочного производства.....	119
1.5. Управление качеством сварных конструкций.....	182
<b>Глава 2. Электродуговые технологии</b> .....	208
2.1. Дуговая сварка плавящимся электродом.....	209
2.2. Дуговая сварка неплавящимся электродом.....	283
2.3. Электродуговая наплавка.....	338
2.4. Электродуговое напыление.....	364
2.5. Электродуговая резка.....	393
<b>Глава 3. Плазменные технологии</b> .....	407
3.1. Плазменная сварка.....	408
3.2. Плазменная наплавка.....	427
3.3. Плазменное напыление.....	446
3.4. Плазменная резка.....	485
<b>Глава 4. Лазерные технологии</b> .....	545
4.1. Лазерная сварка.....	556
4.2. Лазерная наплавка, оплавление и напыление покрытий.....	588
4.3. Лазерная резка.....	600
4.4. Лазерные технологические комплексы.....	614
<b>Глава 5. Фрикционные технологии</b> .....	621
5.1. Сварка трением.....	621
5.2. Сварка трением с перемешиванием.....	667
5.3. Сварка трением пластмасс.....	687
5.4. Наплавка (наварка) трением.....	692
<b>Список литературы</b> .....	702

Науково-технічне видання

ЛАЩЕНКО Георгій Іванович

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА  
(російською мовою)

Редактор *Е. М. Юрлова*

Верстка *Т. Д. Пашигорова*

Підписано до друку 16.03.2012. Формат 60×84/16. Папір офсетний. Гарнітура PetersburgС. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 41,85. Облік.-вид. арк. 26,82. Тираж 1000 прим. Зам. 12-372.

ДВП «Екотехнологія». Свідоцтво № 14288312 від 04.07.97.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1052. 03150, Київ, вул. Антоновича (Горького), 62.

Віддруковано ЗАТ «ВІПОЛ». 03151, Київ, вул. Волинська, 60

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
серія ДК № 752 від 27.12.2001 р.



### Лашченко Георгий Иванович

Кандидат технических наук, академик Украинской академии наук. Окончил Киевский политехнический институт по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Его многолетняя научная, инженерная и педагогическая деятельность проходила в Институте электросварки им. Е. О. Патона, Украинском конструкторско-технологическом институте сварочного производства (бывший

ВИСП), на сварочном факультете НТУУ «КПИ». Работал инженером, зав. сектором, главным сварщиком, главным инженером, первым заместителем генерального директора по научной работе ОАО «УкрИСП», в последние годы — научный консультант НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» НАНУ.

Исследователь и разработчик оригинальных технологических процессов сварки труб большого диаметра, высокопроизводительных способов дуговой сварки в защитных газах и под флюсом, технологий изготовления высокоточных сварных конструкций машиностроения, технологии плазменной резки с водяной защитой, энергосберегающих технологий послесварочной обработки металлоконструкций вибронагружением, пластическим деформированием и нагревом, комплексов дуговой и контактной сварки с программным управлением. Автор многих научно-технических публикаций и изобретений.

**КИЕВ**  
**ЭКОТЕХНОЛОГИЯ**  
**2012**

ISBN 966-8409-26-4



9 789668 409264