

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. І. Савуляк**

**Опорний конспект лекцій**

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ВСТУП ДО ФАХУ**  
**Частина 1. Зварювання**

Навчальний посібник

Вінниця  
ВНТУ  
2020  
1

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМА 1 СУТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ.....	6
1.1 Утворення міжатомних зв'язків при зварюванні.....	6
1.2 Особливості формування хімічного складу металу шва.....	9
1.3 Кристалічна будова зварного з'єднання.....	11
1.4 Напруження і деформації під час зварювання.....	14
ТЕМА 2 З ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ.....	15
2.1 Зварювання в давнину.....	15
2.2 Винайдення зварювання та його розвиток .....	18
2.3 Розробка процесу контактного електрозварювання.....	23
2.4 Розробка процесу газового зварювання.....	25
2.5 Зварювання в роки Другої світової війни.....	29
ТЕМА 3 ОСНОВНІ ВИДИ ЗВАРЮВАННЯ СЬОГОДНІ.....	32
3.1 Класифікація видів зварювання.....	32
3.2 Електричне дугове зварювання.....	33
3.2.1 Електрична дуга та її властивості.....	35
3.2.2 Джерела живлення зварювальної дуги.....	37
3.2.3 Ручне дугове зварювання покритими електродами.....	40
3.2.4 Автоматичне зварювання під флюсом.....	43
3.2.5 Зварювання в середовищі інертних газів.....	46
3.2.6 Зварювання у вуглекислому газі.....	49
3.2.7 Плазмове зварювання.....	51
3.3 Електрошлакове зварювання.....	54
3.4 Зварювання електронним променем.....	57
3.5 Зварювання лазером.....	61
3.6 Контактне зварювання.....	62
3.6.1 Точкове зварювання.....	62
3.6.2 Шовне зварювання.....	64
3.6.3 Рельєфне зварювання.....	66
3.6.4 Стикове зварювання.....	67
3.7 Зварювання струмами високої частоти.....	70
3.8 Холодне зварювання.....	72
3.9 Зварювання вибухом.....	75
3.10 Магнітно-імпульсне зварювання.....	77
3.11 Зварювання тертям.....	78
3.12 Ультразвукове зварювання.....	81
3.13 Зварювання прокатуванням.....	83
3.14 Дифузійне зварювання.....	84
3.15 Паяння.....	88
3.16 Наплавлення та напилювання.....	91
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	95

## ВСТУП

Безліч предметів середовища в якому ми живемо є матеріальними. Це машини, будинки, побутова техніка, засоби комунікацій, комп'ютери, ложки, ножі та мільйони інших виробів виготовлені з матеріалів. У деяких виробках використано один матеріал, але у більшості з них список потрібних матеріалів значно ширший і інколи досягає мільйонів найменувань. При цьому вимоги до використаних матеріалів також можуть бути дуже різноманітними, а подекуди і діаметрально протилежними. Наприклад, лезо ножа має бути гострим та зберігати цю властивість довго, а його рукоятка має бути зручна, тепла на дотик та не ушкоджувати руку. Тому ніж складається з кількох деталей, які з'єднані між собою. Для виготовлення автомобіля потрібні тисячі окремих виробів та деталей. Тому на автозавод працює декілька сотень суміжних підприємств, які виготовляють вже зібрані вироби (вузли) та окремі деталі. Для складання цих вузлів потрібні комплектувальні вироби з інших підприємств. Тому без існування такої розгалуженої системи (інфраструктури) взаємопов'язаних виробництв складні вироби в сьогоденних умовах ніхто виготовити не може. Можна не сумніватися, що для успішного функціонування виробничої інфраструктури на кожне маленьке чи велике підприємство необхідно забезпечити безперервний потік потрібних матеріалів, енергії, обладнання, інструментів та кваліфікованих спеціалістів. Спеціалісти з матеріалознавства вибирають матеріал з відомих, створюють нові матеріали з потрібними властивостями, розробляють послідовність перетворення матеріалів у виріб, забезпечують міцність, твердість, довговічність та інші експлуатаційні властивості. З них виділяються і спеціалісти з експлуатації, ремонту та відновлення техніки та іншого обладнання.

На кожному підприємстві вхідні матеріали якісно змінюються шляхом їх різноманітних обробок і перетворюються на деталі, з яких складаються вироби. Одним із способів виконання складання виробів є застосування зварювання. Зварюють в єдину конструкцію деталі як з одного матеріалу (часто зі сталі) так і з різних матеріалів, що є набагато складнішим.

Зварювання належить до числа великих винаходів. Воно докорінно змінило суть багатьох технологічних процесів виробництва машин і механізмів, будівництва суден і споруд, відіграє важливу роль в освоєнні космосу.

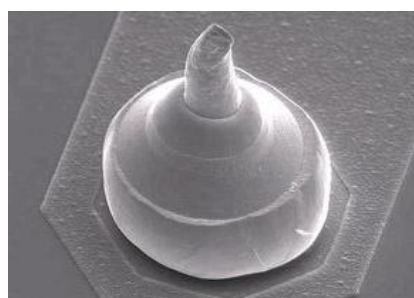
Зварювання зіграло важливу роль на усіх етапах розвитку виробництва у світі, індустріалізації нашої країни. В даний час зварювання перетворилось на великий самостійний вид виробництва. Воно застосовується для створення і зведення принципово нових конструкцій і споруд, для ремонту машин і апаратів, для отримання виробів зі спеціальними властивостями. Зварні конструкції працюють при

надвисоких і наднизьких температурах, з тисками, що значно перевищують атмосферний, і в умовах космічного вакууму. Сучасні досягнення в галузі зварювання дозволяють з'єднувати не тільки метали, а й пластмаси, скло, кераміку та інші матеріали. При цьому елементи, що зварюються, можуть мати розміри від декількох мікрон (у радіоелектроніці) до десятків метрів (у машинобудуванні і будівництві) (рис. 1,2).

Зварювання використовують і для створення художніх виробів (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 1 – Приклади зварних конструкцій: а) – автомобіль для перевезення пального; б) – контакт мікропроцесора (Ø 50 мкм)

Зварювання виконують на повітрі, під водою, у вакуумі. Льотчики-космонавти Г. Шонін і В. Кубасов на борту космічної станції "Союз-6" вперше в світі здійснили зварювання в умовах космічного вакууму і невагомості. Космонавтами В. Джанібековим і С. Савицькою під час польоту станції "Союз-7" у відкритому космосі протягом трьох годин проводилося зварювання, різання та паяння металів, що показало можливість виконання різних ремонтних робіт космічних апаратів.

До сфери зварювальних технологій відносять також різання металів; наплавлення одного металу на інший; напилення і металізацію (рис. 4,5). Паяння, хоча і відрізняється за своєю природою від зварювання, також традиційно належить до зварювальних технологій.



Рисунок 2 – Приклади зварних елементів



Рисунок 3 – Художні вироби, виготовлені методами зварювання

Коло проблем, які охоплюються нині зварюванням, вимагає великих знань в таких галузях знань, як матеріалознавство, фізична хімія, фізика високих енергій, квантова механіка, обчислювальна техніка та ін. Можна стверджувати, що зварювання в ланцюзі незупинного технічного прогресу є його істотною ланкою. Видалення з технологій сучасного виробництва зварювання та генерованих ним суміжних процесів призведе до зупинки усього сучасного виробництва без винятків. Створення і застосування все нових і нових матеріалів, які необхідні для розробки та вдосконалення машин і механізмів, вимагає відповідних нових технологій виготовлення з них деталей та складання вузлів. І тут без зварювання зовсім не обійтися.

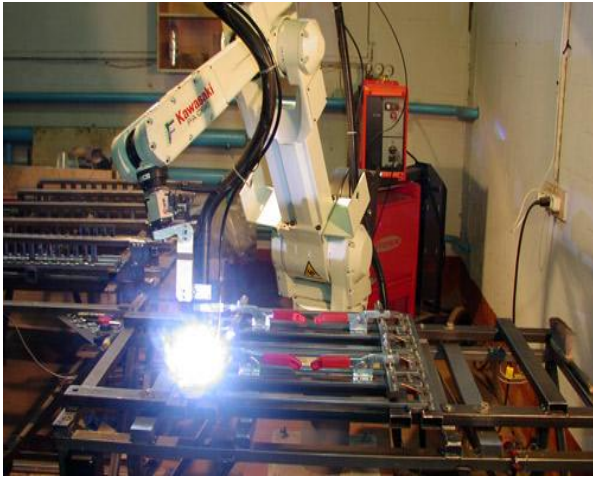


Рисунок 4 – Зварювальний робот Рисунок 5 – Напилювання покриттів

Надзвичайно широкі можливості зварювання та народжених ним суміжних технологій забезпечують широке ефективне застосування цих методів на всіх етапах життєвого циклу машин та інших конструкцій: виготовлення, сервіс (з ремонтом включно), утилізація. Зварювання металів і неметалів, живих тканин, кісток, безсумнівно, має необмежені перспективи, вважає академік Б. Є. Патон, український вчений зі світовим ім'ям.

## 1 СУТНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ

Протягом усього періоду існування людини на Землі – в тому числі, в кам'яній, бронзовій і залізній добі – їй доводилося вирішувати завдання з'єднання між собою двох або більше окремих частин в єдиний монолітний виріб, тобто отримувати нероз'ємні з'єднання. З розвитком суспільства і створенням нових конструкційних матеріалів зі спеціальними властивостями проблема отримання зварних з'єднань з властивостями, близькими до властивостей цих матеріалів, ставала все більш складною та актуальною.

Конструкційні матеріали складаються з атомів (іонів), що знаходяться у взаємодії. Фізико-механічні характеристики твердих тіл визначаються розташуванням атомів (іонів) і зв'язками, що діють між ними.

Всі тверді тіла чинять опір як деформації розтягу, так і деформації стиску. Отже, між частинками твердого тіла діють як сили притягування, так і сили відштовхування. На певній відстані між частинками ці сили врівноважують одна одну, що і відповідає рівноважному стану кристала. Теорія і досвід показують, що сили притягування між частинками твердого тіла проявляються вже на таких відстанях, при яких сили відштовхування ще дуже малі. Ті й інші сили зростають зі зменшенням відстані між частинками, але сили притягування зростають значно повільніше, ніж сили відштовхування.

При затвердінні металів атоми зближуються на відстань  $0,0002 \dots 0,0003$  мкм. Валентні електрони отримують можливість переходити від одного атома до іншого, досить вільно переміщуючись по всьому об'єму металу. Тому валентні електрони прийнято називати "колективізованими", а зв'язок, який існує між іонами, – металевим. Металевий зв'язок можна уявити як зв'язок, що виникає за рахунок притягування між ґратками з позитивно зарядженими іонами і оточуючими їх "колективізованими" електронами, що їх оточують і стягують атоми.

### 1.1 Утворення міжатомних зв'язків під час зварювання

Для того, щоб зварне з'єднання мало такі ж властивості, що і зварювані матеріали, необхідно в зоні з'єднання (між поверхнями, що зварюються) сформуванати таку ж взаємодію між атомами, як і в матеріалах конструкції.

Для пояснення процесу утворення зварного з'єднання розглянемо схематично випадок з'єднання двох монокристалів з ідеально чистими і ідеально рівними поверхнями (рис. 1.1). З'єднання таких монокристалів (стан "а") в єдине ціле (стан "б") відбудеться, якщо зблизити їх поверхні на відстань, що дорівнює або близька за значенням величині параметра кристалічної ґратки (відстані між атомами у твердому тілі) –  $0,0002 \dots 0,0003$  мкм.

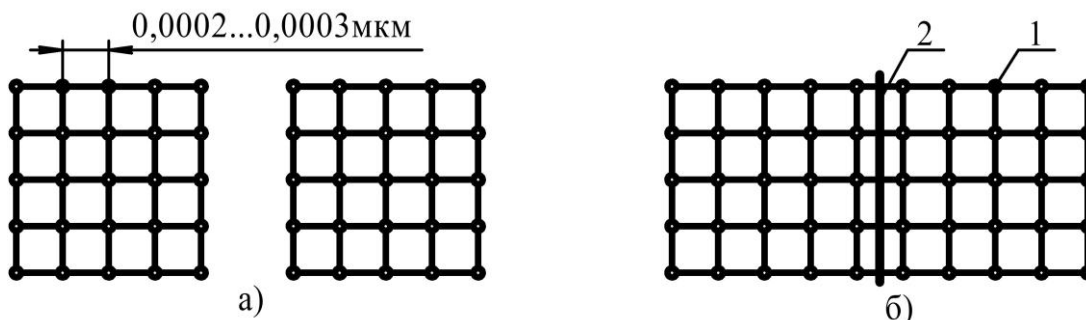


Рисунок 1.1 – Схема утворення зварного з'єднання між двома монокристалами: а) – монокристали до зварювання; б) – монокристали після зварювання; 1 – іон кристалічної ґратки; 2 – границя зварного з'єднання

Зварювання реальних твердих тіл ускладнюється рядом факторів. Реальні тіла – полікристалічні. Вони не мають ідеально чистих і ідеально гладких поверхонь.

Після механічної обробки на поверхні металів є макроскопічна і мікроскопічна геометричні неоднорідності – хвилястість і шорсткість відповідно. Мікровиступи розташовуються на хвилястій поверхні, крок якої може складати від 1000 до 10000 мкм, а висота мікровиступів від часток (після шліфування) до десятків мікрометрів (після токарної та фрезерної обробки), що на кілька порядків більше параметра кристалічної ґратки.

При зближенні таких поверхонь їх контактування відбудеться не по всій поверхні, а лише в окремих точках (рис. 1.2).

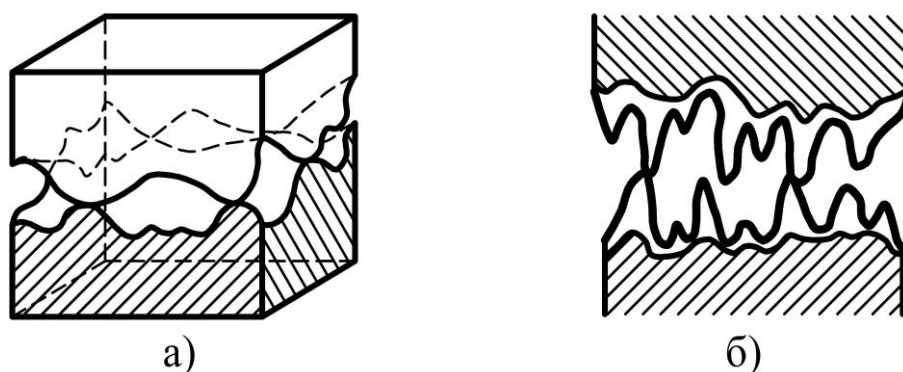


Рисунок 1.2 – Модель контакту твердих тіл по макроскопічній хвилястості (а) і мікроскопічній шорсткості (б) поверхонь

Завдання з'єднання реальних поверхонь металів в одне ціле значно ускладнюється і наявністю на контактних поверхнях крім мікровиступів оксидів, адсорбованих газів, вологи, органічних (жирових) забруднень.

Утворення металевих зв'язків можливе за умови видалення з контактних поверхонь забруднень (найбільш міцними з яких є оксиди) і забезпечення суцільності фізичного контакту, тобто зближення зварюваних поверхонь на міжатомну відстань по всій поверхні з'єднання.

При всіх способах зварювання з'єднувані поверхні попередньо піддають обробці, яка забезпечує видалення поверхневих забруднень і певну геометрію поверхні.

Але в атмосфері повітря на очищених поверхнях вже за  $2,4 \cdot 10^{-9}$  секунди утворюється мономолекулярний шар газу, тому, як би не очищали поверхні металу перед зварюванням, вони завжди виявляються покритими шаром оксидів та газів.

Найменшу висоту мікровиступів на зварюваних поверхнях забезпечує їх особливо чистове полірування, але і після такої трудомісткої обробки висота мікровиступів в сотні разів більша параметра кристалічної ґратки. Тому утворення зварного з'єднання (зближення зварюваних поверхонь, видалення оксидів і утворення металевих зв'язків) може відбуватися в

процесі їх стискання, пластичної деформації поверхонь, що зварюються, під дією прикладених сил (тиску), або в процесі їх оплавлення з наступним самовільним утворенням спільної зварювальної ванни.

Звідси всі способи зварювання можна умовно розділити на зварювання тиском і зварювання плавленням.

Зварювання тиском може здійснюватися без підігрівання (холодне зварювання) і з підігріванням. При холодному зварюванні необхідна деформація більше 90%, в процесі якої відбувається зминання мікроступів на поверхнях і руйнування оксидних плівок (рис. 1.3). Підігрівання полегшує процес зварювання, і з'єднання відбувається при значно меншій деформації.

У розплавленому металі існують певні зв'язки між атомами (іонами). Є вони і на утворених під час плавлення крайках між-фазних границь твердий метал – рідкий. Тому для формування безперервного міжатомного зв'язку досить утворення спільної зварювальної ванни і, як наслідок, зникнення границі між поверхнями, що з'єднуються.

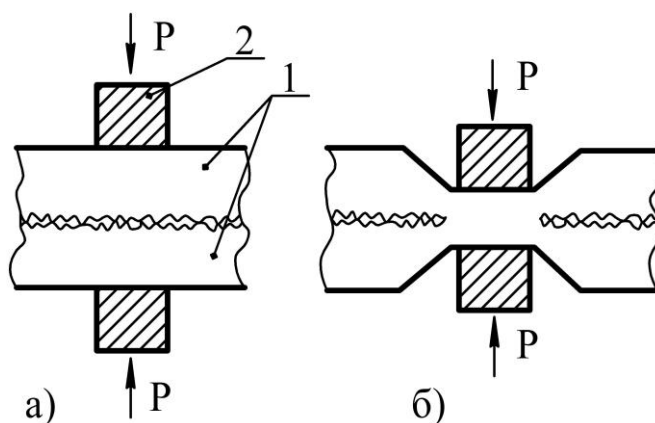


Рисунок 1.3 – Схема зварювання пластин тиском

Формуванню зварного з'єднання можуть перешкоджати поверхневі забруднення, насамперед оксиди. При цьому оксиди можуть розчинятися в зварювальній ванні (наприклад, при зварюванні сталей, титану та ін.) і приводити до забруднення зварного шва киснем. Якщо ж оксиди тугоплавкі і нерозчинні в рідкому металі, то вони перешкоджають сплавленню металу і утворенню загальної зварювальної ванни (наприклад, при зварюванні алюмінію) та забруднюють шов включеннями. У цьому випадку вишуковують прийоми, що забезпечують руйнування та видалення оксидів зі шва на поверхню.

Таким чином, процес зварювання слід розглядати як сукупність технологічних прийомів (розплавлення зварюваних поверхонь з утворенням зварювальної ванни, нагрів і деформація зварюваних заготовок тощо), спрямованих на вирішення завдання встановлення міжатомних зв'язків на границях розділу заготовок, що з'єднуються.

Слід зазначити, що утворення металевих зв'язків між зварюваними поверхнями, хоча і є основним і необхідним етапом формування з'єднання, все ж ще не визначає кінцеві властивості отриманих зварних з'єднань. Останні залежать від цілого ряду процесів, які є супутніми під час утворення міжатомних зв'язків – процесів, які ведуть до зміни в зоні



зварного з'єднання будови кристалів, хімічного складу, до формування внутрішніх напружень та розвитку деформацій.

Найбільші відхилення властивостей зварного з'єднання від властивостей основного металу спостерігаються при зварюванні плавленням, оскільки в цьому випадку метал нагрівається, по-перше, нерівномірно по всьому об'єму зварюваних заготовок і, по-друге, до найбільш високої температури – температури плавлення.

При зварюванні тиском також можуть відбуватися зміни кристалічної будови заготовок, оскільки метал може нагріватися вище температури початку зміни кристалічної будови матеріалів, але ці зміни не настільки істотні, як при зварюванні плавленням.

Тому при розгляді процесу утворення зварного з'єднання в умовах зварювання плавленням слід вивчати:

- зміни хімічного складу металу шва;
- формування структури зварного з'єднання;
- утворення внутрішніх (зварювальних) напружень, що виникають при нерівномірному нагріванні й здатних викликати деформації зварних конструкцій і навіть руйнування зварного з'єднання.

## **1.2 Особливості формування хімічного складу металу шва**

Хімічний склад металу шва визначається хімічним складом металу, що зварюється, електродного (присадного) дроту та фізико-хімічними процесами, що протікають в зварювальній ванні.

В умовах високої температури електричної дуги і металу зварювальної ванни відбувається дисоціація молекул газів – кисню, азоту, водню і хімічних сполук – вуглекислого газу і парів води з утворенням атомарного кисню, азоту, водню і вуглецю, які стають вельми активними і реагують з металом.

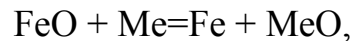
Так, при зварюванні сталей кисень, що взаємодіє з залізом, утворює оксиди  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Найбільш небезпечним для якості шва є оксид  $\text{FeO}$ , здатний розчинятися в рідкому металі. Після охолодження шва, зважаючи на високі температури затвердіння,  $\text{FeO}$  залишається в ньому у вигляді виділень по границях зерен, що сильно знижує пластичність шва. Чим більше кисню в шві знаходиться у вигляді  $\text{FeO}$ , тим гірші його механічні властивості. Вищі оксиди  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не розчиняються в рідкому металі і спливають на поверхню зварювальної ванни у вигляді шлаку.

Крім заліза окислюються й інші легувальні елементи сталі. Окислення цих елементів призводить до зменшення їх вмісту в металі шва. Крім того, утворені оксиди можуть залишатися у шві у вигляді різних включень або пор, що значно знижує механічні властивості зварних з'єднань.

Тому однією з умов отримання якісного металу шва є попередження його окислення, в першу чергу, шляхом створення різних захисних

середовищ.

Однак застосовувані при зварюванні захисні заходи не завжди забезпечують відсутність окислення розплавленого металу. У цьому випадку метал шва потрібно розкислити. Розкисленням називають процес відновлення заліза з його оксиду та переведення кисню у форму нерозчинних сполук з подальшим видаленням їх в шлак. У загальному випадку реакція розкислення має вигляд:



де Me – розкислювач.

Розкислювачем є елемент, що має в умовах зварювання більшу спорідненість з киснем, ніж залізо. Як розкислювачі застосовують кремній, марганець, титан, алюміній. Розкислювачі вводять в зварювальну ванну через електродний дріт, покриття електродів, флюси.

Азот повітря, потрапляючи в стовп дуги, дисоціює і, перебуваючи в атомарному стані, розчиняється в рідкому металі. У процесі охолодження азот випадає з розчину і взаємодіє з залізом, утворюючи нітриди –  $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Вміст азоту в металі шва шкідливо впливає на його механічні властивості, особливо пластичність. Крім того, насичення металу азотом сприяє утворенню газових пор.

Водень в зону зварювання потрапляє з вологи, що може бути в покритті електрода або флюсі, іржі на поверхні зварювального дроту та деталі, з повітря. Атомарний водень добре розчиняється в рідкому металі. При охолодженні і, особливо, кристалізації зварювальної ванни розчинність водню різко (стрибкоподібно) зменшується.

Водень, що виділився, не встигає повністю видалитися з металу шва. Це призводить до утворення газових пор. Крім того, атоми водню дифундують в наявні порожнини, призводять до підвищення в них тиску, розвитку в металі внутрішніх напружень і утворення мікротріщин.

### **1.3 Кристалічна будова зварного з'єднання**

Зварне з'єднання (рис. 1.4) складається зі зварного шва 1, що утворюється в результаті кристалізації зварювальної ванни; зони сплавлення 2, в якій метал при нагріванні перебував у твердо-рідкому стані, і зони термічного впливу 3, що є частиною основного металу, який піддавався тепловому впливу, що зумовив зміну структури і властивостей.

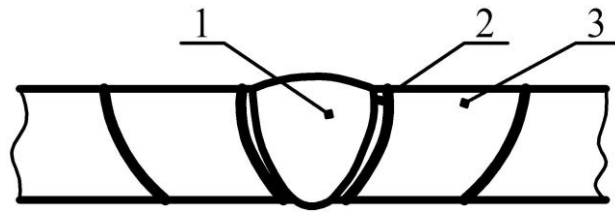


Рисунок 1.4 – Схема будови зварного з'єднання: 1 – зварний шов; 2 – зона сплавлення, 3 – зона термічного впливу

Зварний шов має кристалічну будову литого металу, яка сформувалася в результаті розвитку первинної та вторинної кристалізації.

Первинною кристалізацією називають перехід металу з рідкого стану в твердий, в результаті чого утворюються кристаліти (зерна). Процес первинної кристалізації починається на частково оплавлених зернах основного металу, що знаходяться на дні зварювальної ванни. При багат шаровому зварюванні центрами кристалізації є поверхні кристалітів попереднього шару. Зростання кристалітів відбувається в результаті приєднання до їх поверхні окремих частинок (атомів) з навколишнього розплаву. Кожен кристаліт, зростаючи від окремого зерна на границі сплавлення, являє собою групу спільно зростаючих елементарних стовпчастих кристалів, зрощених із загальною основою, тобто з оплавленим зерном основного металу.

Залежно від форми і розташування кристалітів затверділого металу розрізняють зернисту, стовпчасту і дендритну структури.

При зернистій структурі зерна не мають певної орієнтації, а за формою нагадують багатогранники. Така структура, зазвичай, характерна для металу шва, виконаного покритими електродами, при його досить швидкому охолодженні. При стовпчастій і дендритних структурах зерна витягнуті в одному напрямку. У стовпчастій структурі вони мають компактну форму, а в дендритній – гіллясту. Такі структури шов має при повільному охолодженні – при зварюванні під флюсом і електрошлаковому зварюванні.

Напрямок росту кристалів пов'язаний з інтенсивністю відведення тепла від ванни рідкого металу. Кристали ростуть перпендикулярно до границі сплавлення в напрямку, протилежному відведенню теплоти (рис. 1.5).

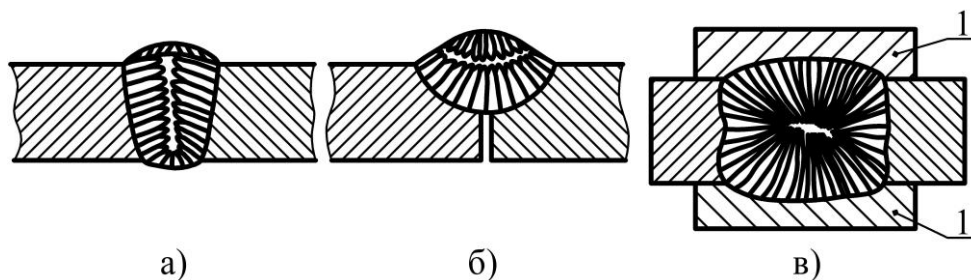


Рисунок 1.5 – Схеми напрямку росту кристалітів під час утворення шва:

а) – з глибоким проваром; б) – широкого; в) – електрошлакового; 1 – мідні повзуни для охолодження

Під час зварювання сталей спочатку утворюються кристаліти однієї будови, але в процесі охолодження відбуваються перетворення, які супроводжуються зміною будови металу за рахунок появи нових утворень на границях первинних стовпчастих кристалітів. Таке явище називається вторинною кристалізацією або перекристалізацією.

Під час зварювання низьковуглецевої сталі в навколошовній зоні розрізняють такі ділянки (рис. 1.6): сплавлення, перегріву, нормалізації, неповної перекристалізації і рекристалізації. Далі йде основний метал, що не піддавався впливу високих температур.

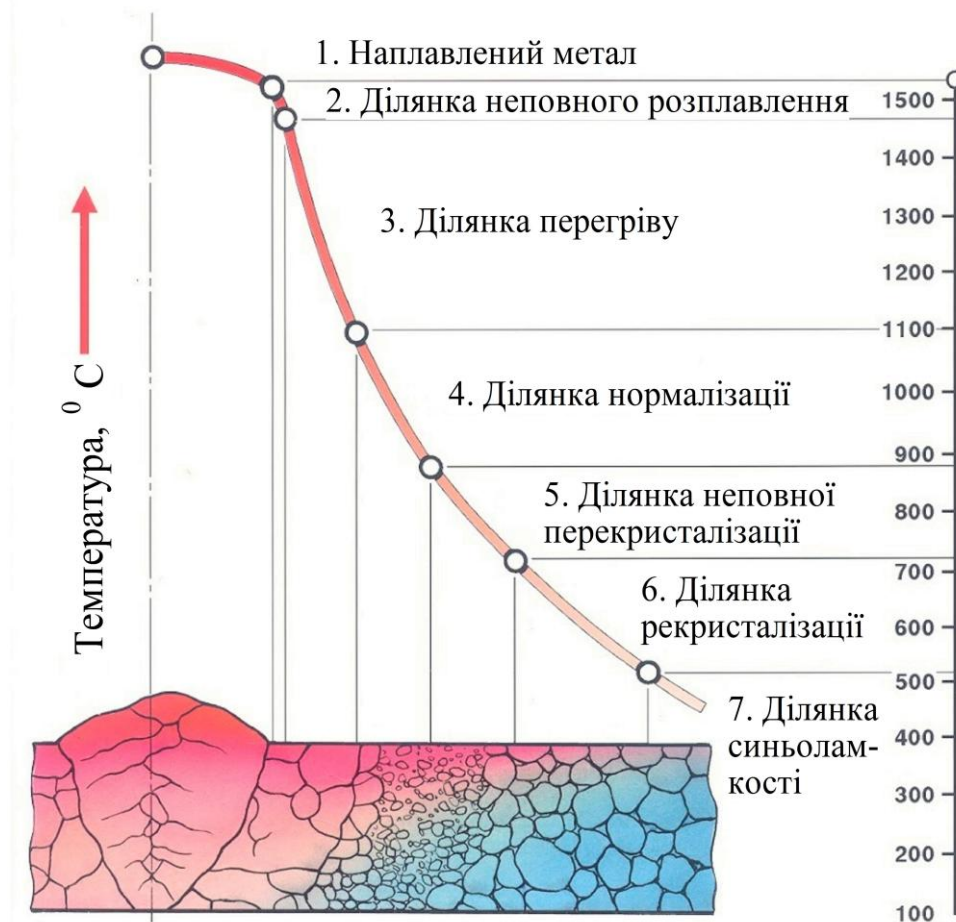


Рисунок 1.6 – Кристалічна будова навколошовної зони під час зварювання низьковуглецевої сталі

Зона сплавлення (ділянка неповного розплавлення) безпосередньо примикає до зварного шва. На цій ділянці і відбувається зварювання. Ширина її залежить від джерела нагрівання і режиму зварювання та становить біля 0,1...0,4 мм.

Ділянка перегріву. На цій ділянці, де метал був нагрітий приблизно від 1100 °С до температури початку плавлення основного металу, розвивається крупне зерно, що призводить до утворення голчатої (відманштетової) структури. Механічні властивості на ділянці перегріву

знижені. Ширина її змінюється в межах 1...3 мм.

Ділянка нормалізації (перекристалізації) охоплює частину основного металу, нагрітого до температур 900...1100 °С. На цій ділянці створюються сприятливі умови для утворення дрібнозернистої вторинної структури, внаслідок чого її механічні властивості звичайно вище механічних властивостей основного металу, що не піддавався нормалізації. Ширина ділянки знаходиться в межах 1,2...4 мм.

Ділянка неповної перекристалізації містить в собі метал, який нагрітий до 720...900 °С і піддавався тільки частковій перекристалізації через нестачу теплоти для перекристалізації і подрібнення всіх зерен. Тому тут поряд з досить великими зернами основного металу, що не змінились під час нагрівання, є дрібні зерна, що утворилися в результаті перекристалізації. Механічні властивості такої змішаної структури невисокі.

Ділянка рекристалізації спостерігається при зварюванні сталей, які піддавалися раніше пластичним деформаціям (прокатуванню, куванню, наклепуванню), в результаті яких частина зерен основного металу сплющилася і витягнулася, а частина роздрібнилася. На даній ділянці метал був нагрітий до 500...720 °С, що викликало його рекристалізацію, сутність якої полягає в тому, що з уламків зерен зароджуються і ростуть нові зерна, розмір яких значно збільшується. При зварюванні металу, що не піддавався пластичній деформації (наприклад, литих деталей), процесу рекристалізації і відповідної ділянки не спостерігається.

Загальна ширина зони термічного впливу залежить від виду, способу і режиму зварювання.

Вид зварювання	Ширина зони термічного впливу, мм
Ручне дугове	3 - 6
В захисних газах	1 - 3
Під флюсом	2 - 4
Електрошлакове	11 - 14
Газове	20 - 30

#### **1.4 Напруження і деформації під час зварювання**

У процесі виготовлення зварних конструкцій у них виникають зварювальні напруження і деформації. Зварювальні напруження, що перевищують певну межу, викликають пластичну деформацію металу, що призводить до зміни розмірів і форми виробу, тобто до його викривлення. Якщо зварювальні напруження перевищують межу міцності, то відбувається руйнування зварного шва або з'єднання, тобто утворюються

тріщини. Причинами виникнення зварювальних напружень і деформацій є нерівномірне нагрівання металу під час зварювання, ливарне усідання (зменшення в об'ємі) розплавленого металу і структурні перетворення в металі в процесі його охолодження.

Всі метали під час нагрівання розширюються, а при охолодженні стискаються. За наявності жорстких зв'язків між нагрітими і холодними ділянками металу це призводить до утворення стискальних або розтягувальних внутрішніх зварювальних напружень. Ця зміна розмірів залежить від коефіцієнта лінійного розширення даного металу, довжини нагрітої зони, а також температури її нагрівання.

Під час зварювання відбуваються поздовжня і поперечна усадки розплавленого металу, в результаті чого утворюються поздовжні і поперечні внутрішні напруження, що викликають деформації зварних виробів. В результаті поздовжньої усадки виникає викривлення виробів в поздовжньому напрямку, а поперечна, як правило, призводить до кутових деформацій, тобто до викривлення в бік більшого об'єму розплавленого металу (рис. 1.7). При зварюванні легованих і високовуглецевих сталей поряд з тепловими виникають об'ємні структурні напруження. Пояснюється це тим, що при охолодженні змінюється структура металу (розміри і взаємне розташування його зерен), що супроводжується зміною об'єму металу та виникненням внутрішніх напружень. При зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих незагартованих сталей структурні напруження дуже малі і виникають рідко.

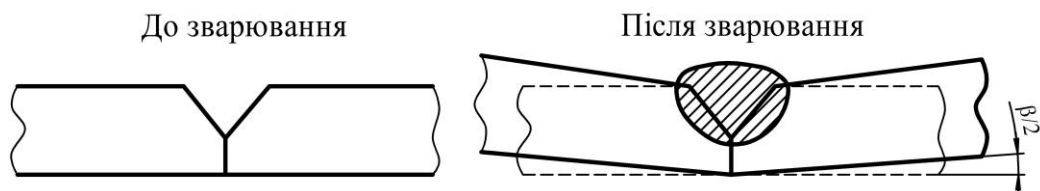


Рисунок 1.7 – Кутові деформації зварних виробів від поперечної усадки наплавленого металу

Ще складніші процеси протікають при зварюванні різнорідних металів. Основними труднощами, що виникають при цьому, можуть бути металургійна несумісність, тобто відмінності в структурі, а також відмінності в коефіцієнтах лінійного розширення, тепло- і електропровідності.

## 2 ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ

### 2.1 Зварювання в давнину

З надр кам'яного століття беруть початок багато досягнень людства, в тому числі і в сфері зварювальних технологій. Ще в глибоку давнину за допомогою кам'яного знаряддя з самородків золота, срібла, міді можна було обковувати пластинки, гострі леза, шкребки і т. п., які для збільшення їх розмірів з'єднували між собою. Завдаючи ударів по складених разом шматках металу, вдавалося досягти їх з'єднання. А це був вже один з видів зварювання – зварювання в холодному стані шляхом деформування. Спосіб холодного зварювання удосконалюється до цих пір і знаходить ефективно застосування в наш час.

За кілька тисячоліть до нашої ери деякі племена навчилися видобувати з руди мідь. Але техніку лиття вони ще не опанували і, щоб виготовити великий виріб з міді, їм доводилося вдаватися до зварювання окремих підігрітих шматків металу. Підігрівання металу до пластичного стану полегшувало схоплювання, а процес з'єднання нагадував кування. Тому він і називається ковальським зварюванням.

Поява нового матеріалу – бронзи – змусилі древніх умільців взятися за розробку нових методів зварювання. Справа в тому, що бронза мала більш високу міцність, твердість, опір стиранню в порівнянні з міддю. Однак її пластичність була значно нижчою пластичності міді. Тому зварювання бронзи методом пластичної деформації, навіть з підігрівом, не забезпечувало утворення з'єднання. Ймовірно, стародавні майстри не раз спостерігали, як перегріті крапельки розплавленої бронзи, потрапляючи на бронзові пластини, іноді міцно "схоплювалися" з ними. Ось цією властивістю – схоплюватися, приварюватися – і скористався невідомий винахідник ливарного зварювання, сутність якого полягала в тому, що зазор між заготовками заповнювався розплавленим металом і деформування зварного з'єднання відбувалося в твердорідкому стані. Цим способом, ймовірно, були виготовлені бронзові посудини висотою 310 мм з товщиною стінок всього 0,5...0,7 мм в Стародавній Греції.

У III...II тисячоліттях до н. е. в різних районах земної кулі почали отримувати залізо. При цьому в деяких випадках маса виробів набагато перевищувала ту кількість металу, яку можна було отримати за **одне плавлення** за існуючою тоді технологією. Найбільш яскравим прикладом є знаменитий пам'ятник в Індії – колона, виконана з вельми чистого заліза (99,97% Fe).

Колона важить близько 6,5 тонни, має висоту 7,3 м при діаметрах біля основи 416 мм, а зверху – 295 мм, і належить вона до 415 р. н. е. Але аж до початку XIX століття не було відомо способів отримання температур, достатніх для розплавлення заліза і лиття виробів з нього. Горіння звичайної деревини створює температуру 1000...1100 °С, достатню для

плавлення міді та її сплавів. Але щоб виплавити чисте залізо, потрібна температура порядку 1550 °С. Не було печей і методів створення такої температури, причому знадобляться тисячоліття, перш ніж з'являться технічні можливості її досягнення.

Однією з гіпотез, що пояснює створення цієї колони, є застосування кричного методу отримання заліза з наступним куванням заготовок (ковальським зварюванням криць) в нагрітому стані. Спочатку в горнах при температурах порядку 1000 °С відновленням залізної руди деревним вугіллям отримували крицю, що має вигляд губчастої маси і складається із зерен чистого заліза і шлаку. А потім крицю неодноразово проковували в нагрітому стані. При цьому окремі частинки заліза з'єднувалися-зварювалися, утворюючи щільний метал. Таке залізо називали звареним.

Для того, щоб збільшити масу металу, окремі заготовки розігрівали до білого стану, складали разом і проковували. Без ковальського зварювання залізний вік початися не міг. Високої майстерності досягли ковалі-зварники у виготовленні знарядь праці і зброї (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Мечі вікінгів (ковальське зварювання)

Безліч залізних мечів зберігається в різних музеях світу. Дивовижні за своєю конструкцією мечі 1–11 ст., знайдені на місцях колишніх римських фортець, підняті із затонулих кораблів. Клинки мечів неоднорідні по товщині і складаються з шарів, що чергуються в певній послідовності, із твердої сталі і м'якого заліза. Такі мечі мали високу міцність і до того ж мали властивість самозагострюватися.

Сучасними методами металографії встановлено, що один з клинків мав одинадцять шарів. Така робота вимагала володіння всіма премудростями ковальського зварювання, величезного досвіду, інтуїції (про науку говорити було ще рано). Багатошарові тонкі клинки з диференційованими властивостями можна вважати вершиною ковальського зварювання. В античні часи високого економічного і суспільного розвитку досягла Еллада. Ковальське ремесло було в такій пошані, що, відповідно до



грецької міфології, їм не погребував займатися один з олімпійських богів – Гефест, покровитель мистецтв і ремесел. У залізному віці використовувалася і така технологія отримання нероз'ємних з'єднань, як паяння.

Рано чи пізно древні ювеліри повинні були виявити, що для з'єднання металів і сплавів методом заливки можна застосовувати такі сплави, які плавляться при меншій температурі, ніж основний метал, що з'єднується. Так, варто було тільки в золото додати мідь або срібло, як утворювався сплав з меншою, ніж у вихідних компонентів, температурою плавлення. Через тисячі років металознавці дослідять вплив складів сплавів на температуру їх плавлення, накреслять діаграми стану всіляких комбінацій металів і, зокрема, встановлять, що сплав 20% золота і 80% міді плавиться при температурі 886 °С (тоді як температура плавлення технічно чистого золота 1064 °С, а міді – 1083 °С), сплав 70% срібла з 30% міді плавиться при 780 °С (температура плавлення чистого срібла 961 °С). Цю властивість сплавів і було використано для паяння. Ще в єгипетських пірамідах археологи неодноразово знаходили предмети з золота і срібла, спаяні оловом. А у Помпеї, загиблої при виверженні Везувію, були виявлені свинцеві водопровідні труби, спаяні поздовжнім швом. Багато золотих прикрас і предметів побуту, знайдені в скіфських курганах, зроблені за допомогою паяння (рис. 2.2).

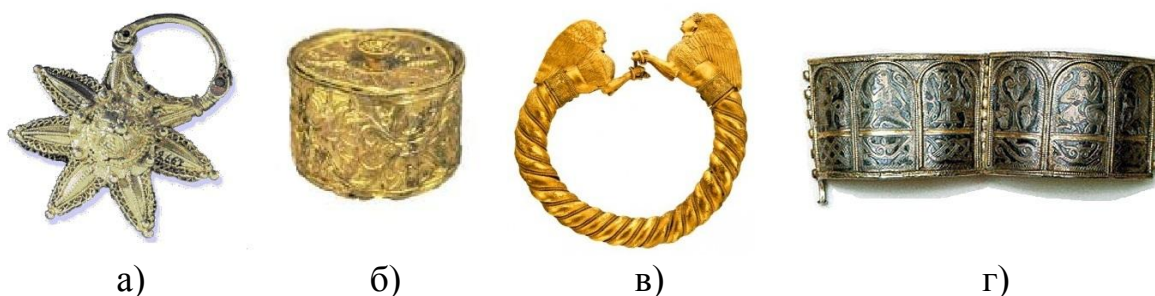


Рисунок 2.2 – Прикраси, виготовлені із застосуванням паяння:  
а) – колти, б) – піксида, в) – накладки, г) – браслет (4...2 століття до н.е.)

Своєю вражаючою красою шедеври древнього мистецтва зобов'язані не тільки таланту художників, а й майстерності умільців, які здійснювали паяння. Причому на багатьох виробках навіть неможливо помітити шов.

Ковалі аланських племен, які володіли технологією ковальського зварювання сталі і заліза, в X ст. використовували для паяння деталей з бронзи, срібла і золота легкоплавкі свинцево-олов'яні припої.

Значного успіху мистецтво металообробки досягло в Київській Русі в IX...XII ст. Рівень виробництва та обробки був досить високим, щоб виготовляти чудові ювелірні прикраси (див. рис. 2.2), озброєння і численні знаряддя праці. Ці вироби відрізнялися високою якістю і чистотою зварних швів в місцях з'єднань. Для виготовлення мечів, наконечників списів

застосовували сталь і залізо різних сортів. Часто з міцної сталі робили тільки різальну крайку і наварювали на неї ковальським способом більш м'яку сталь. Ковалі таврували свої вироби, наварюючи букви і знаки.

Розвиток продуктивних сил, підйом економіки на Русі, визвольна боротьба народу проти монголо-татарського ярма підняли на новий щабель ковальсько-зварювальну справу. У 1382 році проти орди хана Тохтамиша використовували ковано-зварні гармати, при виготовленні яких залізну крицю розковували в лист, а потім його скручували на залізній оправці в трубу. Взаємно перекриті кромки листа зварювали внапуск поздовжнім швом. Потім на цю трубу накручували ще один або два листи, стежачи за тим, щоб зварні шви не збігалися. Виходила частина ствола. Кілька таких багат шарових частин-заготовок з'єднували між собою. При цьому спряжувані кінці заготовок попередньо виковували у вигляді внутрішнього або зовнішнього конуса, що дозволяло їх потім з'єднати внапуск ковальським зварюванням (рис. 2.3).

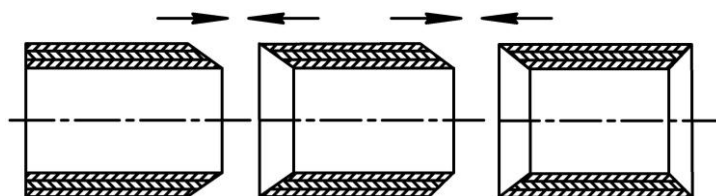


Рисунок 2.3 – Схема елементів ствола гармати, одержуваної ковальським зварюванням

Для того, щоб виготовити великий виріб (вал, довгу смугу), була потрібна велика заготовка. Такі заготовки отримували з пакета дрібних листів. Пакет, скріплений обручем, нагрівали в печі й проковували-зварювали, надаючи форму бруса. При необхідності кілька таких брусів, в свою чергу, зварювали між собою.

У 19 столітті спостерігався підйом промислового виробництва. Ковальське зварювання досягло епогею розвитку внаслідок використання парових молотів гідравлічних пресів та нових технологій нагрівання. Але таке зварювання не забезпечувало якості зварних швів, було нестабільним та малопродуктивним.

Зварювання плавленням, широко поширене в наш час, не могло бути реалізоване через відсутність потужного джерела тепла, здатного локально розплавити метал для утворення спільної зварювальної ванни.

## 2.2 Винайдення зварювання та його розвиток

На початку 1802 професор Петербурзької медико-хімічної академії В. В. Петров побудував найбільше для того часу джерело струму – батарею з 4200 пар мідних і цинкових пластин. Саме цій батареї і було призначено стати історичною: на ній була вперше в світі отримана

електрична дуга.

Її назвали вольтовою, за назвою джерела струму – вольтовий стовп. Але сучасники не зуміли гідно оцінити відкриття вченого. Від відкриття В. В. Петрова до технічного застосування дугового розряду з метою з'єднання (зварювання) і роз'єднання (різання) металів пройшло близько 80 років. Відкриття В. В. Петрова значно випередило свій час. Треба було з'явитися на світ новому вітчизняному умільцю-самородку Миколі Миколайовичу Бенардосу, який на основі дуги Петрова і досягнень світової електротехніки створив принципово новий спосіб зварювання й різання металів – електродуговий.

М. М. Бенардос народився 7 серпня 1842 року в селі Бенардосівка на Херсонщині (нині село Мостове Миколаївської області). З ранніх років він виявив цікавість до різних ремесел, особливо до техніки. І хоча за наполяганням батька, полковника у відставці, йому довелося вступити на медичний факультет Київського університету, до кінця він там не довчився і перейшов у Московську землеробську і лісову академію (нині Тимірязєвська сільськогосподарська академія). У 1869 році М. М. Бенардос оселився в містечку Лух Подольської губернії. Він побудував у маєтку матері механічні майстерні і зайнявся винахідництвом.

Більше 120 оригінальних винаходів зробив М. М. Бенардос, а його винаходи використовуються донині: залізні борони та заглибники, скороварки і молотильні машини, парові ножиці і пневматична поливалка, пароплавні колеса з поворотними лопатями і мисливські човни, замки та крани, турбіни для гідроелектростанцій і гармата для метання канатів на пароплав, що тоне, літальні апарати і верстати для обробки металу і дерева, пневматичні вагонні гальма і вітряний двигун. Велику кількість винаходів зробив він у сфері електротехніки. І найважливіший з них, що приніс йому світову славу, – розроблений у 1882 р. спосіб електродугового зварювання, названий «Електрогефест». Метал розплавлявся дугою, що горить між вугільним електродом, закріпленим у спеціальному тримачі (рис. 2.4), і виробом, підключеними до полюсів джерела струму.

При цьому між генератором і дугою підключалася батарея акумуляторів. Генератор працював безперервно, заряджаючи акумулятори, а в момент збудження дуги між електродом і металом енергія подавалася в дугу у великій кількості. Однак таке джерело живлення було, звичайно, далеким від досконалості.

В результаті напруженої праці до літа 1885 М. М. Бенардосу вдалося повністю, в деталях розробити технологію зварювання сталі і чавуну та апаратуру для зварювання, успішно провести

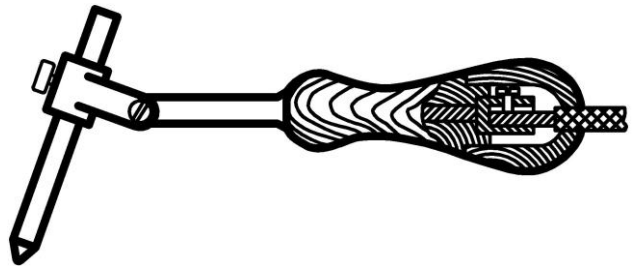


Рисунок 2.4 – Тримач М. М. Бенардоса для ручного дугового зварювання

випробування. У 1885 році 6 липня він звернувся до Департаменту торгівлі і мануфактур Росії з проханням про видачу йому привілеї на "Спосіб міцного скріплення металевих частин і їх роз'єднання безпосереднім впливом електричного струму".

На цей процес М. М. Бенардосу були видані патенти у Франції, Бельгії, Великобританії, Германії, Швеції, пізніше в Італії, США, Австро-Угорщині, Данії та інших країнах. У 1886 році в столиці Росії було організовано перше в світі спеціалізоване Науково-виробниче об'єднання з електрозварювання – "Електрогефест". Почалось практичне застосування дугового зварювання в майстернях **залізних доріг** і на інших підприємствах не тільки для ремонту, але і для виготовлення готових металевих виробів.

"Електрогефест" успішно застосовували і за кордоном. До середини 90-х років XIX століття новий технологічний процес був впроваджений більш ніж на 100 заводах Західної Європи і США, електрозварювання почали застосовувати не тільки для допоміжних ремонтних робіт, але і як основний технологічний процес виробництва нових металевих виробів.

Творцем нового напрямку у виробництві металевих конструкцій став російський інженер М. Г. Славянов, який запропонував використовувати для електрозварювання електричну дугу між виробом і сталевим стрижнем-електродом. Микола Гаврилович Славянов народився 5 травня 1854 року у Воронежській губернії. Закінчивши з золотою медаллю гімназію у Воронежі, він в 1872 році вступив до Петербурзького гірничого інституту, де отримав спеціальність інженера-металурга. Працював на казенних заводах на різних посадах, тривалий час – директором Пермських гарматних заводів.

Славянов вніс до винаходу Бенардоса суттєві вдосконалення, змінив неплавкий вугільний електрод металевим плавким стрижнем, подібним за хімічним складом до зварюваного виробу, що дозволило значно покращити якість зварного шва. Крім того, для захисту зварювальної ванни був використаний металургійний флюс, що розплавлявся. Це значно підвищило якість наплавленого металу. Славянов спроектував спеціальний зварювальний генератор на 1000 А, який змінив акумуляторну батарею у процесі Бенардоса.

Особливо ефективно новий спосіб використовувався для усунення зварюванням дефектів лиття, ремонту деталей паровозів, парових машин, зубчастих коліс тощо. Тільки за три з половиною роки на Мотовилихінському заводі було виконано більше 1600 робіт зі зварювання та наплавлення відповідальних виробів.

Спосіб Славянова отримав диплом першого ступеня і золоту медаль на Всесвітній виставці в Чикаго в 1893 році за дивовижний експонат – металевий дванадцятигранний стакан заввишки 210 мм. Микола Гаврилович наварив на сталь один за одним електроди з бронзи, томпаку (сплав міді з цинком), нікелю, сталі, чавуну, нейзильберу (сплав міді з цинком і нікелем). Зроблений з цієї багатошарової заготовки стакан масою

5330 грамів представляв відразу всю гаму конструкційних металів того часу.

М. Г. Славянов виготовив і випробував перший в світі зварювальний напівавтомат, елементи якого використані і в сучасних автоматичних зварювальних головках. У 1891 році М. Г. Славянов запатентував винахід у Франції, Німеччині, Великобританії, Австро-Угорщині, Бельгії, а в 1897 році – в США.

Крім позитивних якостей нового виду зварювання його широкому впровадженню заважали недоліки: вигоряння легувальних елементів з сплавів, окиснення шва тощо. Кроком вперед для удосконалення процесу була ідея шведського інженера О. Кельберга. Він запропонував покривати металеві плавкі електроди термостійкими неелектропровідними матеріалами. І хоча тугоплавке покриття потрібно було Кельбергу, щоб виконати зварювання в стельовому положенні (запобігти стіканню електродного металу), виявилось, що воно дещо захищає розплавлений метал від кисню та азоту повітря.

У 1917 році американські вчені О. Андрус і Д. Стреса винайшли новий електрод. Їх сталевий стрижень був обгорнутий смугою паперу, приклеєною силікатом натрію – рідким склом. Папір став джерелом диму, що відтісняв повітря із зони зварювання. Виявилася ще одна цікава властивість нової обмазки – дуга збуджувалася відразу, з першого торкання і не гасла, як звичайно, при незначному подовженні. Позначилася присутність в обмазці натрію.

Спільними зусиллями винахідників багатьох країн до кінця 20-х років минулого століття електроди з обмазкою вже містили спеціальні газотворні речовини, які відтісняють повітря із зони зварювання; легувальні речовини, які покращують склад і структуру металу шва; шлакоформувальні компоненти, які захищають розплавлений метал від взаємодії з повітрям; і, нарешті, речовини з низьким потенціалом іонізації, які стабілізують дугу. Зміною складу компонентів покриття можна було отримувати електроди зі спеціальними властивостями.

Перші великі зварювальні роботи в Росії поновилися і були виконані під керівництвом В. П. Вологдіна. На Дальзаводі (судноремонтний завод) він організував в 1920 році зварювальну ділянку, на якій ремонтували деталі й вузли суден, виготовляли парові котли, буксирні катери. На станції Великий Невер за проектом Вологдіна вперше був побудований зварний резервуар для зберігання нафтопродуктів, почали будувати зварні судна (першим було судно "Седов"), великі доки, морські траулери тощо.

У 1923 році на принципі намагнічувальної паралельної і розмагнічувальної послідовної обмоток збудження В. П. Нікітіним, К. К. Хреновим і А. А. Алексеевим були розроблені генератори СМ-1, СМ-2, СМ-3.

У 1924 році В. П. Нікітін розробив зварювальний трансформатор СТН. Для невеликих зварювальних струмів Нікітіним був сконструйований

трансформатор з внутрішнім реактивним опором (рис. 2.5), що являв собою комбінацію трансформатора і реактивної котушки.

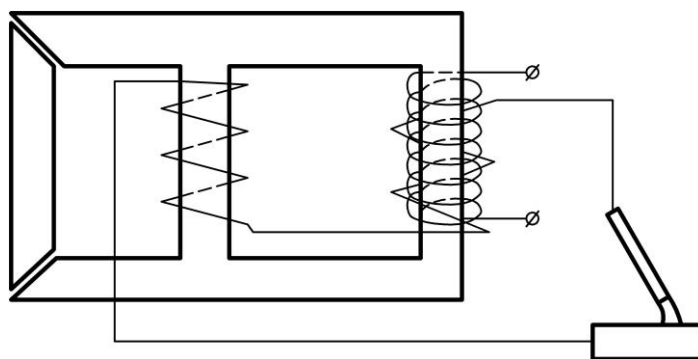


Рисунок 2.5 – Зварювальний трансформатор Нікітіна

До кінця 30-х років були сформульовані три принципи регулювання струму у зварювальних трансформаторах: з декількома виводами, з магнітним шунтом і з регульованим повітряним зазором; кожна зі схем має кілька різних статичних вольт-амперних характеристик. Випуск цього обладнання було освоєно серійно на заводі "Електрик" (м. Санкт-Петербург). У 1928 році заводом ім. Г. І. Петровського стали серійно випускатися покриті електроди для ручного дугового зварювання.

З початком промислового розвитку країни роль електрозварювання проявилася у повному обсязі. У ці роки вчений, фахівець в області мостобудування академік Євген Оскарович Патон зумів оцінити все, що може дати зварювання. Він організував у Києві при Академії наук УРСР лабораторію, що поставила перед собою мету широкого застосування електрозварювання замість клепання в самих різних галузях промисловості. У січні 1934 року на базі цієї електрозварювальної лабораторії був створений Інститут електрозварювання, який в даний час носить ім'я його організатора – Є. О. Патона. У тридцяті роки минулого століття ручне дугове зварювання покритими електродами впроваджувалося у виробництві металоконструкцій. Котли і кораблі, каркаси будівель і деталі мостів, автомобілі та вагони тощо – діапазон зварних конструкцій поповнювався і, здавалося, ніщо вже не перерве наступ зварювання. Але в 1938-1939 роках у Західній Європі несподівано зруйнувалося кілька мостів. Балки мостів були зварними. У цей період тисячі залізничних вагонів в Росії та інших країнах були зняті з експлуатації через тріщини в зварних рамах і візках.

Почалися всебічні дослідження з впливу процесу зварювання на властивості металу шва і навколошовної зони, які дозволили знайти способи керувати якістю зварного з'єднання. У період з 1934 по 1941 рік під керівництвом Є. О. Патона і за його безпосередньої участі був виконаний цикл досліджень у галузі проблем міцності зварних конструкцій, їх розрахунку та надійності. У результаті систематичних

робіт з вивчення металургійних і електротехнічних процесів дугового зварювання був розроблений спосіб зварювання під флюсом. Подальші роботи зі зварювання, виконані в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона, принесли інституту всесвітню популярність.

### 2.3. Розробка процесу контактного електрозварювання

Незалежно від винахідників на Заході М. М. Бенардос запропонував технологію точкового контактного електрозварювання – другого з найпоширеніших в даний час способів зварювання металів. Сутність цього способу полягала в тому, що до двох сталевих пластин, розміщених одна на одній, підводився струм за допомогою спеціальних кліщів (рис. 2.6), в які були вставлені вугільні електроди. Струм проходив через електроди, між якими затискалися пластини, і виділеної теплоти було достатньо для утворення зварної точки.

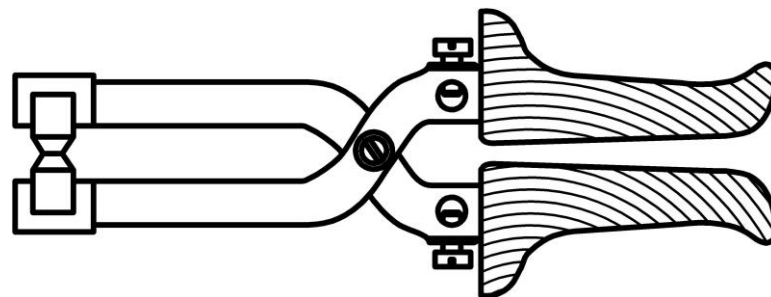


Рисунок 2.6 – Кліщі Бенардоса для контактеного зварювання

Слава винахідника стикового контактеного зварювання закріпилася за видатним американським винахідником Ельхамом Томсоном, який в 1870 році, коли йому було тільки 17 років, почав викладати хімію і механіку в Центральній вищій школі у Філадельфії, а через кілька років уже читав лекції у Франклінському інституті. Однією з проблем в кінці XIX століття було з'єднання телеграфних проводів. Ця проблема була вирішена за допомогою стикового контактеного зварювання. До 1884 року Е. Томсоном були створені необхідні для контактеного стикового зварювання елементи обладнання: комутувальна апаратура, динамо-машина для генерування змінного струму, що подається на трансформатор великої питомої потужності, спеціальні струмопідвідні затискачі. У 1885 році він відпрацьовує техніку зварювання, доводить до безвідмовної роботи зварювальну апаратуру і на початку 1886 року подає заявку на патент, що захищає принципово новий спосіб електричного зварювання. Спосіб Томсона описується так: "зварювані предмети приводяться в дотик місцями, які повинні бути зварені, і через них пропускається струм величезної сили – до 200000 ампер при низькій напрузі – 1...2 вольти. Місце дотикання чинить струму найбільший опір і тому сильно нагрівається. Якщо в цей момент почати стискати зварювані частини і

проковувати місце зварювання, то після охолодження предмети виявляться добре звареними" (Патент США №347140 від 10 серпня 1886 р.). Проковування було не просто даниною моді, що була залишком колишньої технології, а прийомом, що забезпечував підвищення якості металу шва. Оскільки крім нагрівання застосовувалося і механічне здавлювання, спочатку спосіб називали "електричним куванням" або "безвогненним методом зварювання". Перший пристрій, що виконував нагрівання і стискання двох проводів, складався з двох важелів, на одному кінці з'єднаних шарніром з ізоляційного матеріалу, а з іншого кінця зв'язаних пружиною через ізоляційні втулки. У цих важелях посередині стискаються деталі, що зварюються, – дроти, стрижні і т. п. У наступній установці був використаний трансформатор із замкнутим контуром (рис. 2.7). На його первинну обмотку подавалася напруга 600 В, і по ній протікав струм силою 20 А. Ця обмотка намотувалася на котушку діаметром 305 мм. Котушку охоплював і виток вторинної обмотки, кінці якої під'єднувалися через затискачі до зварюваних деталей. Зварювальним ланцюгом протікав струм 12000 А при напрузі 1 В. Е. Томсон сконструював установку, в якій струм переривався синхронно з прикладанням зусилля стискання. Для стискання з великими зусиллями винахідник використав гідравлічний привод.

Наступним кроком у розвитку стикового контактного зварювання було застосування імпульсів струму і тиску. В процесі розширення сфери застосування стикового зварювання вдосконалювалася його технологія й розроблялися нові схеми нагрівання. Були запропоновані кілька способів комбінованого (дугового і контактного) зварювання.

А. Коффін застосував зварювання стрижнів великого перерізу з попереднім нагріванням короткою дугою, що вібрує. Ним же була розроблена технологія зварювання з проміжною вугільною пластиною-електродом, що під'єднується до вторинної обмотки і вставляється на час розігрівання між деталями, що стикаються.

В інших пристроях між деталями, що зварюються,

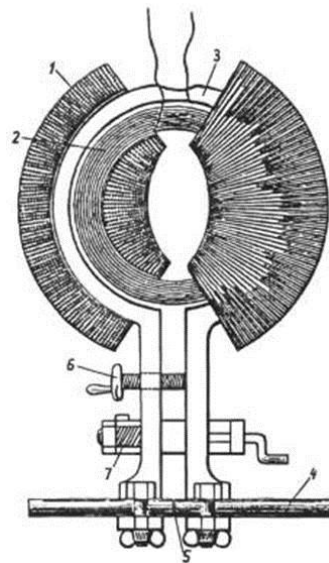


Рисунок 2.7 – Схема установки для контактної зварювання:

- 1–первинна обмотка; 2 – сердечник;
- 3–виток вторинної обмотки;
- 4–зварювані деталі; 5–стик;
- 6–гвинт; 7–пружина



поміщали металеву пластину, а струм підводився до кінців деталей через вугільні контакти.

Пластину вибирали з матеріалу з більшим коефіцієнтом електроопору, ніж у зварюваного металу, завдяки чому прискорювалося нагрівання. Перед стисканням вставку видаляли. Коффін запропонував також пропускати магнітне поле через зварювану ділянку, вважаючи, що це викличе структурні зміни, які приведуть до зменшення провідності ділянки, що зварюється, а, отже, до прискорення нагрівання. Установки для контактного стикового зварювання часто називали "електричними горнами".

У 1892 році Е. Райс використав принцип контактного зварювання в "ковальському горні для ювелірів". Він запропонував поміщати пластини, до яких потрібно було приварити орнамент з дроту, на металеву плиту, підводячи до неї струм від вторинної обмотки зварювальної машини. До початку 20 століття відносять повідомлення про використання фірмою "Фіат" контактного зварювання для виготовлення двигунів літаків. У 1928 р. фірма "Стаут мітл ейрплейн" (відділення фірми "Форд моторс") використовувала контактне зварювання на лініях виготовлення конструкцій з дюралюмінію. На початку 1930-х рр. в Америці була проведена серія статичних випробувань і на втомну міцність. Спочатку використали дослідні зразки, а потім і натурні моделі з метою визначення можливостей застосування контактного зварювання для конструкцій з легких сплавів. Були розроблені технологія та обладнання, які взяли у виробництво фірми "Дуглас", "Боїнг" і "Сікорські". У 1935 р. в США був виготовлений монолітний суцільнозварний балковий фюзеляж.

У той же час необхідно відзначити, що кінець 19 століття і перші десятиліття 20 століття не були роками широкого поширення електротехнологій. Час широкого розповсюдження електрозварювання ще не настав, тому що електрична енергія залишалася дефіцитною, відомі способи зварювання не були достатньо універсальними і мобільними, а задовільна якість переплавленого металу забезпечувалася ціною високої трудомісткості. Але без зварювання вже не можна було обійтися, і на початку 20 століття народився ще один спосіб, причому не тільки з'єднання металів, а й швидкого ефективного роз'єднання, заснований не використанні теплоти хімічних реакцій.

## **2.4 Розробка процесу газового зварювання**

Спроби використовувати горючі гази для зварювання металів плавленням (без кування), ймовірно, робилися багаторазово. Але необхідні для цього температура полум'я і концентрація теплоти досягаються лише при спалюванні горючих газів (або парів горючих рідин) в суміші з киснем. Тому газове зварювання не могло знайти застосування раніше, ніж

з'явилася можливість отримувати в промислових масштабах технічно чистий кисень.

Одночасно з пошуком газів велася робота і зі створення надійної апаратури для зварювання. У першу чергу необхідно було сконструювати пальник, що забезпечує гарне змішування горючого газу з киснем, високу концентрацію теплоти на виході з сопла і вибухобезпечність (ацетилен в 1870 році вважався хорошим вибуховим газом, що підтвердилося декількома катастрофічними вибухами). Однією з перших (1847 рік) заслуговує уваги конструкція пальника американського винахідника Р. Хейра для отримання водневокисневого полум'я.

У 1850 році у Франції С. К. Девіль створив пальник, в якому водень і кисень змішувалися ще до виходу назовні (подібна схема використовується і в сучасних зварювальних пальниках). Температура киснево-водневого полум'я досягала 2600 °С. Тим часом у поле зору техніків потрапляє ацетилен – газ, теплота згоряння якого в кілька разів більше теплоти згоряння водню, а температура полум'я в суміші з киснем досягає 3200 °С.

Ще в 1836 році ацетилен одержували з карбїду кальцію, який розкладався у воді. Але в той час карбїд кальцію був дорогою хімічною сполукою, отриманою в лабораторних умовах. І тільки в 1892 році, коли був розроблений процес електричного виплавляння карбїду кальцію при взаємодії негашеного вапна з коксом:  $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$ , собівартість карбїду кальцію знизилася в тисячу разів, що дозволило розпочати його широке застосування для отримання ацетилену. У 1895 році французький дослідник Анрі Ле Шательє зазначив, що киснево-ацетиленове полум'я має не тільки високу температуру, але і не окисляє розплавлене залізо. Саме таке полум'я було необхідне для зварювання. Пальники, в яких кисень і ацетилен змішувалися зовні після виходу з сопла, виявилися непрацездатними. При горінні утворювався твердий щільний нагар вуглецю, що засмічував газовий канал.

Французький інженер Ш. Пікап ризикнув змішати обидва гази прямо в пальнику, до виходу з мундштука, подібно до того, як це робив Девіль з киснем і воднем. Така конструкція вимагала подачі ацетилену під тиском, та пальники працювали, коли газ подавався з балонів. При транспортуванні зрідженого ацетилену в балонах найчастіше відбувалися вибухи, і це гальмувало впровадження газового зварювання. Останню перешкоду подолав А. Ле Шательє, що запропонував поміщати розчин газу в ацетоні в пористе тіло. Балони наповнювали губкою, а потім заливали ацетон і накачували ацетилен. Тепер для широкого промислового застосування газового зварювання необхідно було знайти спосіб отримання дешевого кисню. І з цією проблемою впорався німецький фізик та інженер К. Лінде. У 1885 році він сконструював і побудував першу в світі промислову установку для отримання рідкого повітря і в 1902 році

створив ректифікаційний апарат для поділу повітря на компоненти. Це відкрило дорогу широкому застосуванню кисню в техніці.

Таким чином, до початку ХХ століття працями багатьох учених і винахідників був створений ще один спосіб зварювання металів. Ацетилено-кисневе зварювання не потребувало електричної енергії (правда, для отримання карбіду кальцію і кисню була потрібно електрика); газозварювальні установки були автономні, рухомі, нескладні в експлуатації. Серйозною перевагою цього способу порівняно зі способами Бенардоса і Славянова була можливість просто і ефективно поліпшити якість металу шва, захистивши полум'ям зони зварювання від впливу повітря.

Особливо багато прихильників газового (автогенного) зварювання було у Франції та Німеччині. Тут посилено вдосконалювали пальники, газові генератори для отримання ацетилену, клапани, редуктори, досліджували причини дефектів, вибирали оптимальні режими зварювання і форми оброблення крайок. У Росії газове зварювання було освоєно в 1906 році. Воно застосовувалося для виправлення браку лиття, для виготовлення невідповідальних деталей машин, при ремонті виробів з низьковуглецевої сталі, міді та чавуну, у залізничних майстернях. До початку 20-х років 20 століття в зварювальному виробництві переважало газове зварювання. Працювало кілька заводів з виробництва кисню. Газове зварювання застосовувалося для спорудження магістральних нафтопроводів в 1926-1935 роках.

У 1926 році було створено російсько-американське акціонерне товариство "Рагаз", основне завдання якого полягало у розвитку газового зварювання в СРСР. Розпочався випуск пальників, різаків, редукторів, ацетиленових генераторів. Для повної перемоги газу над дугою не вистачало тільки збільшити швидкість зварювання. І тут виявилось, що у газового зварювання майже немає резерву, що з нього більше нічого "вичавити"; ні потужність, ні концентрація полум'я не бажали підвищуватися. А для дугового зварювання проблема збільшення швидкості вирішувалася шляхом збільшення сили струму дуги (зрозуміло, до певної межі). Але пластичність металу шва, отриманого дуговим зварюванням, була низькою, що часто зводило нанівець всі переваги даного методу.

Сутність процесу газового зварювання полягає в нижчевикладеному. Кисень і ацетилен подаються в газовий пальник по гумових шлангах, а на виході з сопла пальника утворюється полум'я, потужність і склад якого можна регулювати, змінюючи витрату газу і співвідношення між киснем і ацетиленом.



Рисунок 2.8 – Газові пальники та різачки

Пальники фірми «Донмет» (а) та «Fronius» (б,в) для роботи на ацетилено-кисневій, пропан-бутан-кисневій, метан-кисневій та інших сумішах газів показані на рис. 2.8, а схема їх будови – на рис. 2.9.

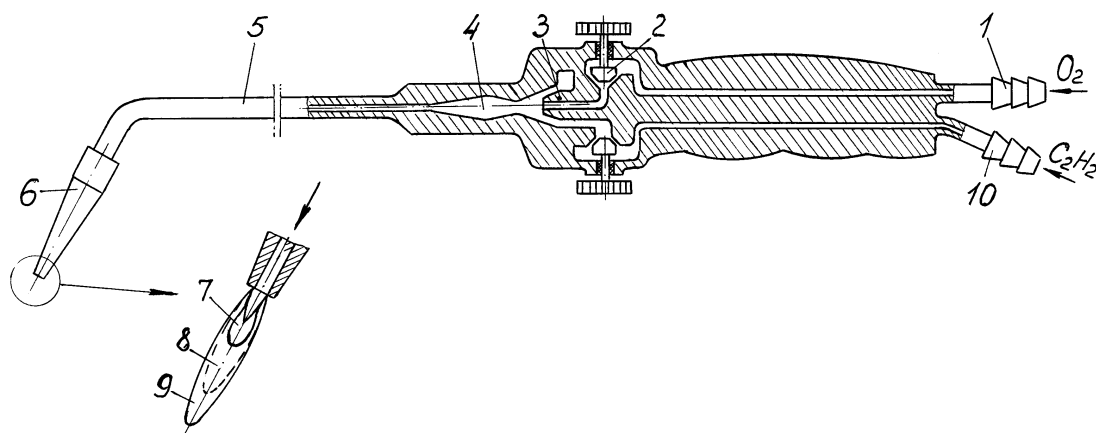


Рисунок 2.9 – Схема будови ацетилено-кисневого пальника

По шлангу через ніпель 1 і регулювальний вентиль 2 в інжектор 3 пальника надходить кисень під тиском 0,3...0,4 МПа (3...4 кг/см<sup>2</sup>). Струмнь кисню, виходячи з великою швидкістю з вузького каналу інжектора, інжектуює (підсмоктує) ацетилен, який підводиться до пальника по шлангу через ніпель 10 під невеликим тиском – менше 0,05 МПа. У змішувальній камері 4 кисень змішується з ацетиленом, звідки суміш по змішувальній трубі 5 рухається до наконечника 6 пальника.

На виході з каналу наконечника суміш підпалюється, утворюється зварювальне полум'я складної структури. Нормальне полум'я має три характерних зони; перша зона 7 із середньою температурою 1500 °С, де відбувається розпад ацетилену ( $C_2H_2 = 2C + H_2$ ). Друга зона 8, де ацетилен взаємодіє з киснем, що надходять з пальника (реакція  $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$ ). В результаті температура полум'я зростає до 3100 °С, причому продукти згоряння мають відновні властивості. Нарешті, в третій зоні – факел полум'я 9 – йде процес згоряння водню і окислення СО (реакція

$\text{CO} + \text{H}_2 + 3/2 \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) за рахунок кисню атмосферного повітря. Температура факела – близько 1200 °С. Зазвичай газозварник працює на другій зоні полум'я (відновній), маючи можливість стежити за характером полум'я, коригувати склад суміші ацетиленовим вентилем пальника.

## 2.5 Зварювання в роки Другої світової війни

Підготовка до війни і сама війна дали поштовх розвитку зварювання як нової, перспективної технології в багатьох країнах світу. У довоєнні роки в Німеччині у зварюванні побачили засіб обійти обмеження за водотоннажністю бойових кораблів, встановлені Версальським договором. Щоб не перевищувати дозволених 10000 тонн, конструктори зуміли розмістити на крейсерах потужне озброєння завдяки тому, що вага зварного корпусу стала на 15% менше клепаного.

Зросли темпи будівництва кораблів. Корпуси лінкорів, підводних човнів стали виготовляти за допомогою ручного дугового зварювання. Броньовані плити бортів, палуб, веж і рубок зварювали хромонікельмолібденовими електродами. Масове виробництво літаків-снарядів "Фау-1" стало можливим завдяки застосуванню зварювання, за допомогою якого виготовлялися кулясті балони для стисненого повітря, необхідного для роботи двигуна. Поштовхом до розвитку зварних конструкцій у Великобританії послужила звістка про будівництво військового флоту в Німеччині, в тому числі підводних човнів. Тоді, щоб прискорити виробництво, зварювання стали застосовувати для виготовлення відповідальних вузлів корпусів кораблів.

До початку війни Великобританія вже мала у своєму розпорядженні суцільнозварні кораблі. З початком війни стало зрозуміло, що техніка в цій війні повинна відігравати вирішальну роль. Повсюдно виріс попит на зварювання. Компанії, що займаються зварюванням, лабораторії вузів та секції зварювальних товариств почали звертати увагу на вирішення проблем, які виникали у зв'язку з освоєнням і збільшенням випуску озброєнь.

Роботи велися за двома напрямками: вдосконалення відомих технологій зварювання та пошук нових. Метою першого напрямку було прискорення виробництва і підвищення якості озброєння з броньованої сталі, а другого – розробка нових способів зварювання. Одним з основних видів озброєння у Другій світовій війні були танки. З точки зору технолога-виробника танк – складна інженерна споруда, що складається з корпусу і башти (рис. 2.10). Корпус танка збирається з катаних броньових плит товщиною від 45 до 120 мм. Ці плити необхідно з'єднати в міцну конструкцію. Тому інженеру-зварнику доводиться розглядати танк як споруду, що виготовляється не тільки шляхом отримання кутових і стикових з'єднань в різних просторових положеннях, але ще і як споруду, що виготовляється з важкозварюваних матеріалів. Суворі умови війни

вимагали десятків тисяч танків. Перешкодою до збільшення випуску танків стали бронекорпуси, які необхідно було зварювати. Щоб виконати цю роботу ручним дуговим зварюванням, потрібні були сотні, тисячі висококваліфікованих зварювальників. Підготувати в найкоротший термін необхідну кількість фахівців було неможливо. Зі становища, що склалося, був тільки один вихід – автоматизація процесу зварювання.

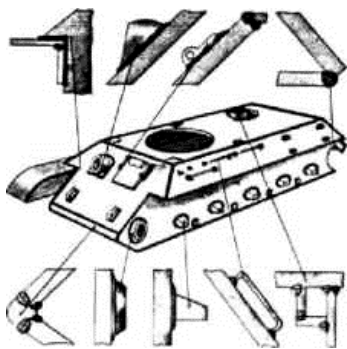


Рисунок 2.10 – Схема зварювання корпусу танка Т-34

У цей важкий час академік Є. О. Патон почав розробку технології автоматичного зварювання броні під флюсом. І це завдання було успішно вирішено: вибрані зварювальні матеріали, розроблений флюс, створені зварювальне обладнання та технологія зварювання.

Продуктивність автоматичного зварювання у десятки разів перевершувала ручне. Сектор башти замість п'ятигодинного зварювання вручну автомат зварював за 49 хвилин і т. д. За видатні досягнення, що прискорюють виробництво танків і металоконструкцій, Є. О. Патону було присвоєно звання Героя Соціалістичної Праці, десять співробітників інституту були нагороджені орденами і медалями.

За допомогою установки для зварювання рейок, розміщеної на рейкозварювальному поїзді, було зварено за один 1942 понад 30 тисяч стиків. Г.С. Шпагін розробив пістолет-кулемет (ППШ) з широким застосуванням штампозварних конструкцій, що значно спрощувало виробництво стрілецької зброї.

У роки війни зварювальні процеси стали широко застосовуватися і при виготовленні авіаційної техніки: підмоторні рами бойових літаків, зварні алюмінієві баки тощо. Для "дороги життя" в Ленінграді було виготовлено 14 зварних барж загальною водотоннажністю 12 тисяч тонн. У грудні 1942 року був сформований спеціальний поїзд для підводного різання, що складався з електростанції, водолазних станцій, зварювальних агрегатів, підйомних і плавальних засобів тощо.

Зварювання стало застосовуватися практично без обмежень. Так, в 1944 році були спроектовані суцільнозварні доменні печі, вежі і щогли висотою 180...200 м та інші відповідальні споруди. Війна відкрила широку

дорогу зварюванню в енергетику. Під час війни при відступі електростанції виводилися з ладу вибухом сферичної частини барабана. Заміна барабана для запуску електростанції означала збирання нового котельного агрегата. У 1943 році після звільнення окупованих територій було прийнято ризиковане на ті часи рішення – "відремонтувати барабани зварюванням". Пропонувалося: вирізати пошкоджені ділянки; з одного барабана зробити латки; вварити латки в інші три барабани. Ручним дуговим зварюванням покритими електродами з попереднім підігрівом зварюваного матеріалу були відновлені барабани, які витримали гідравлічний тиск, що в два рази перевищував робочий. Такого застосування зварювальної дуги не знала світова практика. Електростанція була пущена в найкоротший термін.

У початковий період війни в портах Америки скупчилось багато німецьких торговельних суден, які були підірвані їх командами. Морське міністерство запропонувало для ремонту суден застосувати електродугове зварювання. Через півроку, замість 2-3 за прогнозами, всі німецькі кораблі під прапором США вийшли в море. З 1940 по 1942 рік обсяг зварювального виробництва в США зріс в три рази, в основному за рахунок ручного дугового зварювання електродами з якісними покриттями і автоматичного зварювання голим дротом під флюсом. У США була розроблена програма, за якою тоннаж флоту до 1946 року мав збільшитися більш ніж у 2,5 рази.

Важлива роль у прискоренні будівництва відводилася зварюванню "переважно електродуговому", яке майже повністю замінило клепання. Тільки за 1942 рік, завдяки заміні клепаної конструкції і технології клепання на зварну конструкцію і зварювання суден було зекономлено 500 тис. тонн сталі. Цикл спорудження скоротився до 50 днів, а рекорд складання і зварювання корпусу – 4 дні. Для зварювання листів обшивки, товщина яких досягала 20 мм, застосовувалося дугове автоматичне зварювання під шаром флюсу. Для зменшення деформацій застосовувалося багатошарове зворотно-ступінчасте зварювання. Зварювання застосовувалося і в будівництві американських підводних човнів. У суднобудуванні США вперше був застосований спосіб різання металів вугільною дугою зі стисненим повітрям – "Арк ейр", розроблений М. Степатом. Ручне дугове зварювання покритими електродами застосовувалося для з'єднання сталевих деталей та вузлів вертольотів і літаків. Для прискорення процесу виготовлення винищувача "Велієнт" було запропоновано збільшити діаметр застосовуваних електродів, створити потокову лінію з кантувачами і спростити конструкцію фюзеляжу. У період розвитку військового авіабудування для з'єднання магнієвих сплавів Р. Мередітом був розроблений новий спосіб дугового зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах. Дуга при зворотній полярності в середовищі гелію і аргону горіла стабільно. При цьому застосовували присадні дроти.

### 3 ОСНОВНІ ВИДИ ЗВАРЮВАННЯ

Відповідно до державних стандартів, за технологічною ознакою, зварювання – це процес отримання нероз'ємних з'єднань за допомогою встановлення міжатомних зв'язків між частинами, що зварюються, при їх місцевому нагріванні або пластичній деформації, або спільній дії того й іншого.

#### 3.1 Класифікація видів зварювання

Всі способи зварювання в залежності від стану металу в зоні з'єднання можна розділити на дві великі групи:

- зварювання тиском (у твердій фазі), коли температура металу в зоні з'єднання не перевищує температуру плавлення зварюваних металів;
- зварювання плавленням (в рідкій фазі), коли метал в зоні з'єднання нагрівається вище його температури плавлення.

Методи зварювання плавленням отримали широке розповсюдження завдяки таким перевагам:

- можливість зварювання в монтажних і цехових умовах;
- різноманітність використовуваних типів з'єднань;
- широкі можливості зварювання конструкцій різних габаритів;
- великий діапазон товщин зварюваного металу – від декількох мікрон до кількох метрів;
- можливість зварювання швів в будь-яких просторових положеннях;
- можливість зміни хімічного складу і властивостей наплавленого металу.

Зварювання плавленням, проте, має ряд недоліків:

- кристалізація металу шва протікає при розтягувальних напруженнях, що може призводити до утворення тріщин;
- можливе утворення (особливо при зварюванні різнорідних металів) в наплавленому металі крихких інтерметалідних включень, гартівних структур, розвиток ліквіційних неоднорідностей в шві, що є причинами виникнення тріщин;
- утворення напружень і деформацій під час зварювання.

Методи зварювання тиском менш універсальні, ніж зварювання плавленням, але можуть мати в ряді випадків переваги. Застосування зварювання тиском значно розширило діапазон зварюваних матеріалів, в тому числі різнорідних металів, а також неметалевих матеріалів, унеможливило виникнення при зварюванні тріщин, пористості, сприяло зменшенню деформації зварних вузлів. Важливим є той факт, що зварювання тиском викликає менш значні зміни властивостей основного металу, ніж зварювання плавленням. Методи зварювання тиском легко піддаються механізації та автоматизації, характеризуються високою продуктивністю.



Залежно від виду енергії, яка використовується для утворення зварного з'єднання, всі види зварювання поділяють на три класи: термічний, термомеханічний і механічний. До термічного класу належать види зварювання, які здійснюються плавленням зварюваних поверхонь з використанням теплової енергії. До цього класу відносять такі види зварювання, як дугове, плазмове, електрошлакове, електронно-променеве, лазерне та ін. До термомеханічного класу належать види зварювання, які здійснюються з використанням теплової енергії і тиску: контактне зварювання, дифузійне зварювання та ін. До механічного класу належать види зварювання, які здійснюються з використанням механічної енергії і тиску: холодне зварювання, зварювання тертям, ультразвукове зварювання та ін. Існують й інші види класифікації способів зварювання. Способи зварювання плавленням можна класифікувати за:

- характером захисту зварюваного металу і зварювальної ванни від навколишньої атмосфери (з газовим, шлаковим, газошлаковим захистом);
- ступенем автоматизації процесу зварювання (ручне, механізоване та автоматичне);
- особливостями введення теплоти (з безперервним нагріванням і імпульсним).

В даний час існує більше 150 способів зварювання, але найбільшого поширення набули способи зварювання плавленням з використанням електричної дуги. Більшість конструкцій, наведених на рис. 1-5, виготовлені електродуговим зварюванням.

### **3.2 Електричне дугове зварювання**

Джерелом теплоти під час дугового зварювання є електрична дуга, яка горить між електродом і заготовкою або між електродами, або між електродами і заготовкою. Перетворюючи електричну енергію в теплову, електрична дуга зосереджує тепло в невеликому об'ємі, що дозволяє забезпечити концентроване введення тепла у виріб. З використовуваних в даний час джерел зварювального тепла щодо щільності енергії, що виділяється в плямі нагрівання, електрична дуга займає третє місце (після лазерних і електронних променів). При цьому максимальна щільність енергії в плямі дуги складає  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, а мінімальна площа нагрівання –  $10^{-3}$  см<sup>2</sup>. Залежно від матеріалів і числа електродів, а також способів під'єднання електродів і заготовки в ланцюг електричного струму, розрізняють такі види дугового зварювання:

- зварювання плавким (металевим) електродом дугою прямої дії (що горить між електродом і заготовкою) з одночасним розплавленням основного металу і електрода, який поповнює зварювальну ванну рідким металом;

– зварювання неплавким (графітовим або вольфрамовим) електродом дугою прямої дії, при якій з'єднання виконується шляхом розплавлення лише основного металу або із застосуванням присадного металу;

– зварювання непрямою дугою, що горить між двома, як правило, неплавкими електродом; в цьому випадку заготовка не під'єднана до електричного ланцюга, і для її розплавлення використовується теплота, що виділяється при зіткненні зварюваної поверхні зі стовпом (плазмою) дуги, і теплота, яка одержується за рахунок випромінювання і конвекції; така дуга застосовується у випадках, коли потрібна обмежена теплопередача від дуги до виробу (наплавлення, напилення);

– зварювання трифазною дугою, при якій дуга горить між двома електродом (дуга непрямої дії), а також між кожним електродом і основним металом (дуги прямої дії).

Живлення дуги здійснюється постійним або змінним струмом. При застосуванні постійного струму розрізняють зварювання на прямій і зворотній полярності. У першому випадку електрод підключають до негативного полюса (катод), у другому – до позитивного (анод). Крім того, різні способи дугового зварювання класифікують також за способом захисту дуги і розплавленого металу (покривним електродом, під шаром флюсу, в середовищі захисних газів) і ступеня механізації процесу (ручне, напівавтоматичне і автоматичне). Електродуговим зварюванням виконують стикові, кутові, таврові, внапуск та торцеві з'єднання (рис. 3.1).

Стикове з'єднання є зварним з'єднанням двох деталей, які розташовані в одній площині і дотикаються одна до одної торцевими поверхнями (рис. 3.1, а). Воно найбільш поширене в зварних конструкціях, оскільки має ряд переваг перед іншими видами з'єднань. Умовні позначення стикових з'єднань: С1-С48 (ГОСТ 5264-80).

Кутове з'єднання є зварним з'єднанням двох елементів, розташованих під кутом один до одного і зварених в місці дотикання їх крайок (рис. 3.1, б). Умовні позначення кутових з'єднань: У1-У10.

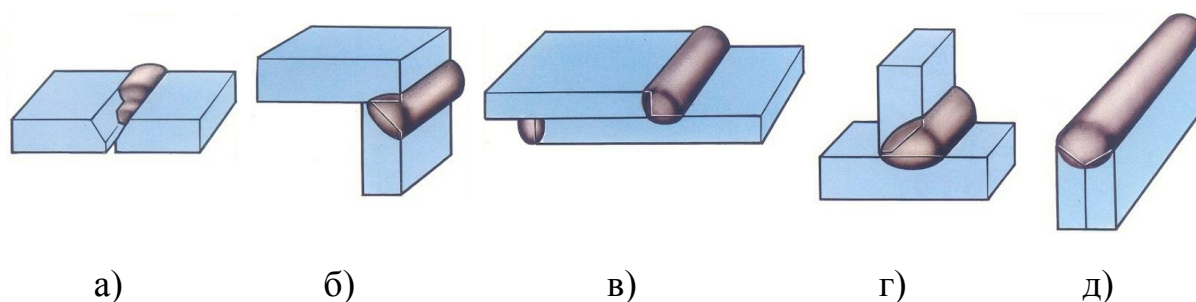


Рисунок 3.1 – Типи зварних з'єднань

З'єднання внапуск є зварним з'єднанням, в якому з'єднуються елементи, що розташовані паралельно і частково перекривають один одного (рис. 3.1, в). Умовні позначення: Н1-Н9.

Таврове з'єднання – це з'єднання, в якому до бічної поверхні одного елемента примикає під кутом і приварений торцем інший елемент. Як правило, кут між елементами прямий (рис. 3.1, г).

Умовні позначення таврових з'єднань: Т1–Т8.

Торцеве з'єднання – це з'єднання, в якому бічні поверхні елементів дотикаються один до одного (рис. 3.1, д). Умовних позначень у стандарті поки немає.

**3.2.1. Електрична дуга та її властивості.** Електрична дуга – потужний стабільний розряд електрики в іонізованій атмосфері газів і парів металу, покриттів, флюсу. У звичайних умовах повітря, як і всі гази, має досить слабку електропровідність. Це пояснюється малою концентрацією вільних електронів та іонів. Тому для того, щоб викликати в повітрі або в газі потужний електричний струм, тобто електричну дугу, необхідно іонізувати повітряний проміжок (або інше газове середовище) між електродами.

Іонізація може відбуватися в результаті електронної емісії. При цьому наявні в металі у великій кількості вільні електрони, маючи достатню кінетичну енергію, переходять в газове середовище міжелектродного простору і сприяють його іонізації за рахунок зіткнення електронів, що швидко рухаються, з молекулами газів і інших елементів, що знаходяться в міжелектродному просторі. Деяку роль у створенні потоку електронів може відігравати і "бомбардування" катода позитивними іонами, що досягають електрода з достатнім запасом енергії.

При високих температурах значна частина молекул газу має достатню енергією для того, щоб при зіткненнях могла відбутися їх іонізація; крім того, з підвищенням температури збільшується загальна кількість зіткнень між молекулами газу. Кількість заряджених частинок в міжелектродному просторі може бути збільшена шляхом введення в зону горіння дуги речовин, що мають низький потенціал іонізації. До таких речовин відносять: калій, натрій, барій, літій, алюміній тощо.

Так, електропровідність повітряного проміжку між електродами, а звідси і стійкість горіння дуги, забезпечуються емісією катода і об'ємною іонізацією газів в зоні дуги, завдяки ним в дузі переміщуються потужні потоки заряджених частинок. Процес запалювання дуги в більшості випадків охоплює три етапи: коротке замикання електрода на заготовку, відведення електрода на відстань 3...6 мм і виникнення стійкого дугового розряду.

Коротке замикання (рис. 3.2, а) виконується для розігрівання торця електрода 1 і заготовки 2. Висока щільність струму сприяє оплавленню мікровиступів в контакті і утворенню плівки рідкого металу. При подальшому відведенні електрода плівка рідкого металу розтягується, а її переріз зменшується, внаслідок чого зростає щільність струму і підвищується температура металу. Це приводить до розриву плівки і випаровуванню металу. При цьому інтенсивна емісія 3 забезпечує

іонізацію парів металу і газів 4 міжелектродного проміжку (рис. 3.2, б). З розігріванням стовпа дуги і підвищенням кінетичної енергії атомів і молекул відбувається додаткова іонізація за рахунок їх зіткнення. Окремі атоми також іонізуються в результаті поглинання енергії, що виділяється при зіткненні інших часток. Тому дуговий проміжок стає електропровідним і через нього починає протікати електричний струм. Процес запалювання дуги закінчується виникненням стійкого дугового розряду (рис. 3.2, в).

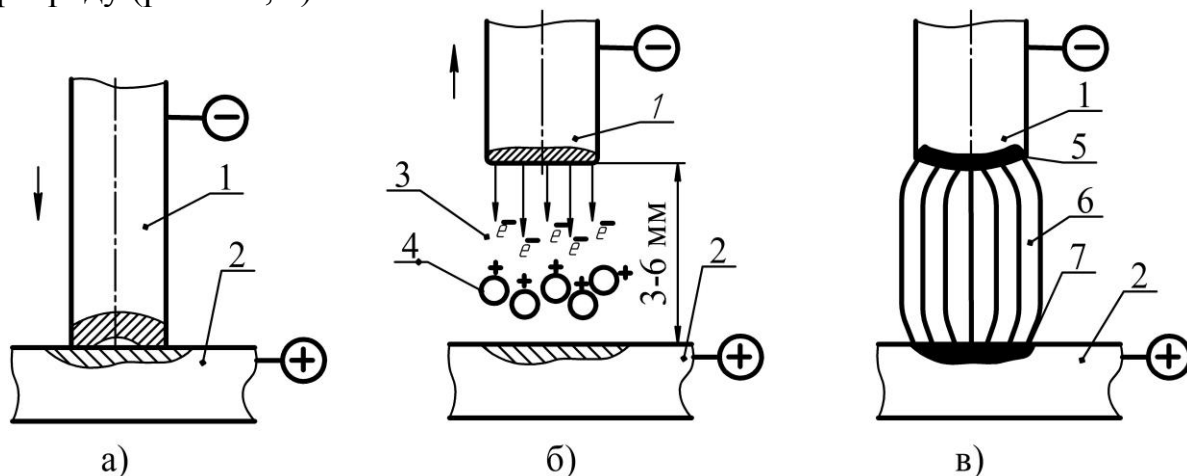


Рисунок 3.2 – Схема процесу запалювання дуги

Цей спосіб запалювання дуги застосовують при зварюванні плавленням. При зварюванні неплавким електродом можливе запалювання дуги за допомогою високочастотного електричного розряду через дуговий проміжок, що забезпечує його первісну іонізацію. Для цього в зварювальній ланцюг на короткий час під'єднують джерело високочастотного змінного струму високої напруги – осцилятор.

В усталеній зварювальній дузі (рис. 3.2, в) розрізняють три зони: катодна 5, анодна 7 і стовп дуги 6. Катодна зона товщиною близько  $10^{-4}$  мм, так звана катодна пляма, розташована на торці катода і є джерелом вільних електронів. До катода спрямовується потік позитивних іонів, які бомбардують його, і, віддаючи свою енергію, розігрівають його до температур 2500...4000 °С. Стовп дуги, розташований між катодною і анодною зонами, складається з розпечених і іонізованих частинок.

Температура в цій зоні досягає 6000...7000 °С залежно від щільності струму при ручному дуговому зварюванні покритими електродами; при зварюванні ж вольфрамовими електродами в середовищі аргону середня температура в центрі стовпа досягає 15000 °С, а в гелії – 20000 °С. При живленні дуги постійним струмом найбільша кількість теплоти виділяється в зоні анода. Це пояснюється тим, що анод піддається більш потужному бомбардуванню зарядженими частинками, ніж катод, а при зіткненні частинок в стовпі дуги виділяється менша частка загальної кількості теплоти.

Різна температура катодної та анодної зон і різна кількість теплоти, що виділяється в цих зонах, використовуються при вирішенні технологічних завдань. При зварюванні деталей, що вимагають великого підведення теплоти для підігріву крайок, застосовують пряму полярність («+» на заготовку). При зварюванні тонкостінних виробів, тонколистових конструкцій, а також сталей, що не допускають перегріву (високовуглецеві, нержавіючі, жароміцні та ін), застосовують зварювання струмом зворотної полярності («-» на заготовку). При цьому не тільки забезпечується менше нагрівання зварюваної заготовки, але і прискорюється процес розплавлення електродного матеріалу. Електричні властивості дуги описуються статичною вольт-амперною характеристикою, що є залежністю між напругою і струмом дуги в стані стійкого горіння (рис. 3.3).

Вольт-амперна характеристика дуги має три ділянки: спадну – I, жорстку – II і зростаючу – III. На ділянці I (до 100 А) із збільшенням струму напруга значно зменшується. Це відбувається у зв'язку з тим, що при підвищенні струму збільшується поперечний переріз, а отже, і провідність стовпа дуги. На ділянці II (100...1000 А) при збільшенні струму напруга зберігається постійною, оскільки перетин стовпа дуги і площа анодної і катодної плям збільшуються пропорційно струму. Ділянка II характеризується постійністю щільності струму. На ділянці III напруга зростає внаслідок того, що збільшення щільності струму вище певного значення не супроводжується збільшенням катодної плями зважаючи на обмеженість перерізу електрода. Дуга на ділянці I горить нестійко і тому має обмежене застосування. Дуга на ділянці II горить стійко і забезпечує нормальний процес зварювання.

Кожній ділянці характеристики дуги відповідає певний характер перенесення розплавленого електродного металу в зварювальну ванну: I і II – крупнокрапельне, III – дрібнокрапельне або струменеве.

**3.2.2. Джерела живлення зварювальної дуги.** Важливою умовою отримання зварювального шва високої якості є стійкість процесу зварювання. Для цього джерело живлення повинно забезпечувати легке і надійне збудження дуги, стійке її горіння в сталому режимі, регулювання

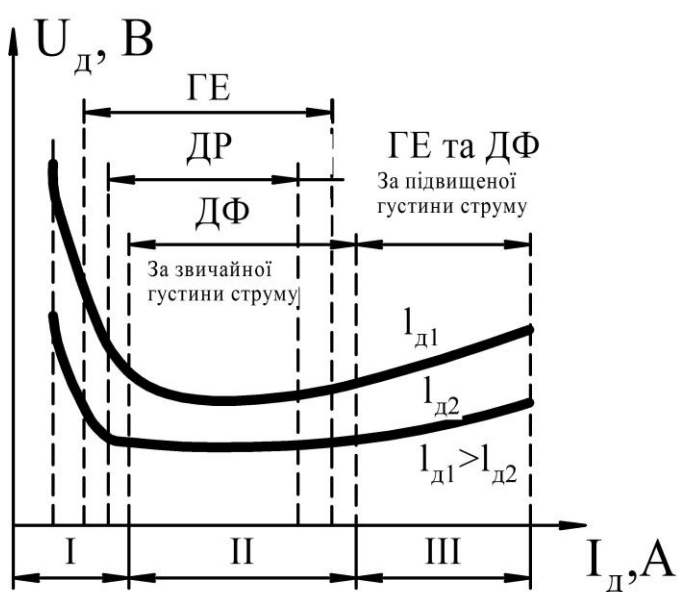


Рисунок 3.3 – Статична вольт-амперна характеристика дуги

потужності (струму). Для виникнення дуги в атмосфері повітря навіть при невеликій відстані між електродом і зварюваним виробом у декілька міліметрів потрібна дуже висока напруга. Тому напруга холостого ходу джерела живлення повинна бути достатньою для виникнення дуги і в той же час не повинна перевищувати норми безпеки. Максимально допустиму напругу холостого ходу встановлено для джерел постійного струму – 90 В, а для джерел змінного струму – 80 В. Джерело живлення повинно забезпечувати швидке встановлення або зміну напруги в залежності від довжини дуги. Час відновлення робочої напруги від 0 до 30 В після кожного короткого замикання має бути не більше 0,05 с. Джерело струму повинно витримувати часті короткі замикання зварювального ланцюга, при цьому струм короткого замикання не повинен перевищувати зварювальний струм більш ніж на 40...50%. Для стабільного горіння дуги потрібно, щоб струм і напруга дуги дорівнювали струму і напрузі джерела живлення:  $I_d = I_{дж}$ ;  $U_d = U_{дж}$ .

Для цього необхідна відповідність зовнішньої вольт-амперної характеристики джерела і статичної вольт-амперної характеристики дуги.

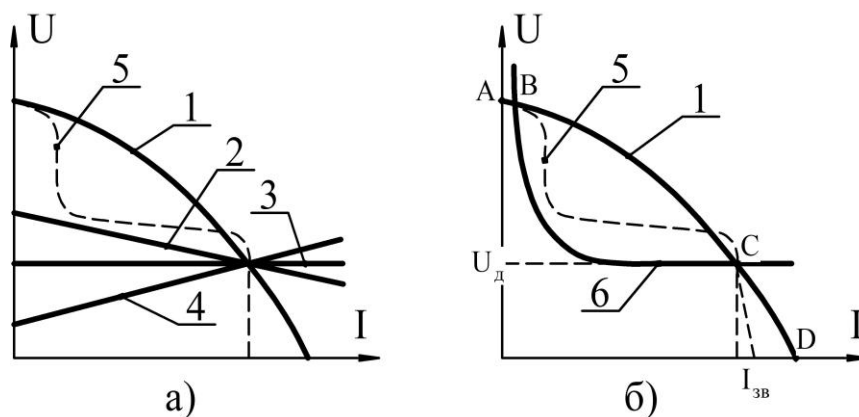


Рисунок 3.4 – Зовнішні характеристики джерел зварювального струму (а) і співвідношення характеристик дуги і спадної характеристики струму під час зварювання (б)

Для живлення дуги з жорсткою характеристикою застосовують джерела зі спадною або полоспадною зовнішньою характеристикою (ручне дугове зварювання покритими електродом, автоматичне під флюсом, зварювання в захисних газах неплавким електродом). Режим горіння дуги визначається точкою перетину характеристик дуги 6 і джерела струму 1 (рис. 3.4, б). Точка С відповідає режиму стійкого горіння дуги, точка А – режиму холостого ходу в роботі джерела живлення в період, коли дуга не горить і зварювальний ланцюг розімкнутий. Режим холостого ходу характеризується підвищеною напругою. Точка D відповідає режиму короткого замикання під час запалювання дуги та її замикання краплями рідкого електродного металу. Коротке замикання характеризується

низькою напругою, що прямує до нуля, і підвищеним, але обмеженим струмом.

Джерела зварювального струму зі спадною характеристикою необхідні для полегшення запалювання дуги за рахунок підвищеної напруги холостого ходу, забезпечення стійкого горіння дуги і практично постійною проплавленняю здатністю дуги, оскільки коливання її довжини і напруги (особливо значні при ручному зварюванні) не призводять до значних змін зварювального струму, а також для обмеження струму короткого замикання, щоб не допустити перегрівання струмопровідних проводів і джерел струму. Найкраще наведені вимоги задовольняє джерело струму з ідеалізованою зовнішньою характеристикою 5 (див. рис. 3.4).

Для живлення зварювальної дуги застосовують джерела змінного струму (зварювальні трансформатори, рис. 3.5) та джерела постійного струму (зварювальні випрямлячі, рис. 3.6, і перетворювачі, рис. 3.7). Зварювальні інверторні перетворювачі (рис. 3.7) є джерелом живлення зварювальної дуги, вони перетворюють змінний струм в постійний зварювальний струм. Найбільш широке застосування знаходить джерело змінного струму завдяки простоті конструкції, меншій витраті електроенергії, високому ККД та іншим економічним показникам. Проте в деяких випадках (зварювання на малих струмах покритими електродами і під флюсом) при живленні змінним струмом дуга горить нестійко.



Рисунок 3.5 – Зварювальний трансформатор ТДМ-403



Рисунок 3.6 – Зварювальний випрямляч ВДМ-1202С

Постійний струм кращий за технологічними властивостями, тому деякі сорти легированої сталі краще зварювати постійним струмом. При його застосуванні підвищується стійкість горіння дуги, поліпшуються умови зварювання в різних просторових положеннях, з'являється можливість вести зварювання на прямій і зворотній полярностях тощо.

В останні роки одержали досить широке поширення інверторні джерела живлення (рис. 3.7) для зварювання (ІДЖ). Невеликі розміри і маса, мала інерційність, поліпшені динамічні властивості ІДЖ вигідно

відрізняють їх від традиційних технічних рішень. Джерела живлення на основі високочастотних інверторних перетворювачів застосовують для дугового зварювання плавкими і неплавкими електродами, ультразвукового та мікроплазмового зварювання, контактного зварювання металу малих і середніх товщин.



Рисунок 3.7 – Зварювальні інверторні перетворювачі

**3.2.3 Ручне дугове зварювання покритими електродами.** В даний час для зварювання на повітрі розроблені й успішно застосовуються електроди, які при розплавленні створюють надійний газошлаковою захист зварювальної ванни від її взаємодії з навколишньою атмосферою і забезпечують високу якість наплавленого металу. Такі електроди розроблені для дугового зварювання сталей (в тому числі високолегованих), чавуну і кольорових металів: міді, бронзи, латуні, міднонікелевих сплавів, нікелю, алюмінієвих і магнієвих сплавів. Ручне дугове зварювання покритими електродами залишається одним з найпоширеніших методів і широко використовується при виготовленні зварних конструкцій – як у нашій країні, так і за кордоном. Це пояснюється універсальністю процесу, простотою і мобільністю застосовуваного устаткування, можливістю виконання зварювання в різних просторових положеннях і місцях, важкодоступних для механізованих способів зварювання. Істотним недоліком ручного дугового зварювання покритими електродами є невисока продуктивність процесу і залежність якості зварного шва від практичних навичок зварника.

Сутність зварювання покритим електродом полягає в нижченаведеному. До електрода і зварюваного виробу для збудження і підтримки зварювальної дуги від джерела живлення підводиться постійний або змінний струм  $I_{зв}$  (рис. 3.8).

Дуга розплавляє металевий стрижень електрода, його покриття і основний метал. Розплавлене покриття утворює шлак і газу. Шлаки покривають краплі металу, що утворюються при плавленні електродного дроту. У зварювальній ванні електродний метал змішується з розплавленим металом виробу, а шлак спливає на поверхню ванни. Розплавлений шлак, покриваючи краплі електродного металу і поверхню



розплавленої зварювальної ванни, сприяє запобіганню їх від контакту з повітрям і бере участь в металургійній обробці розплавленого металу.

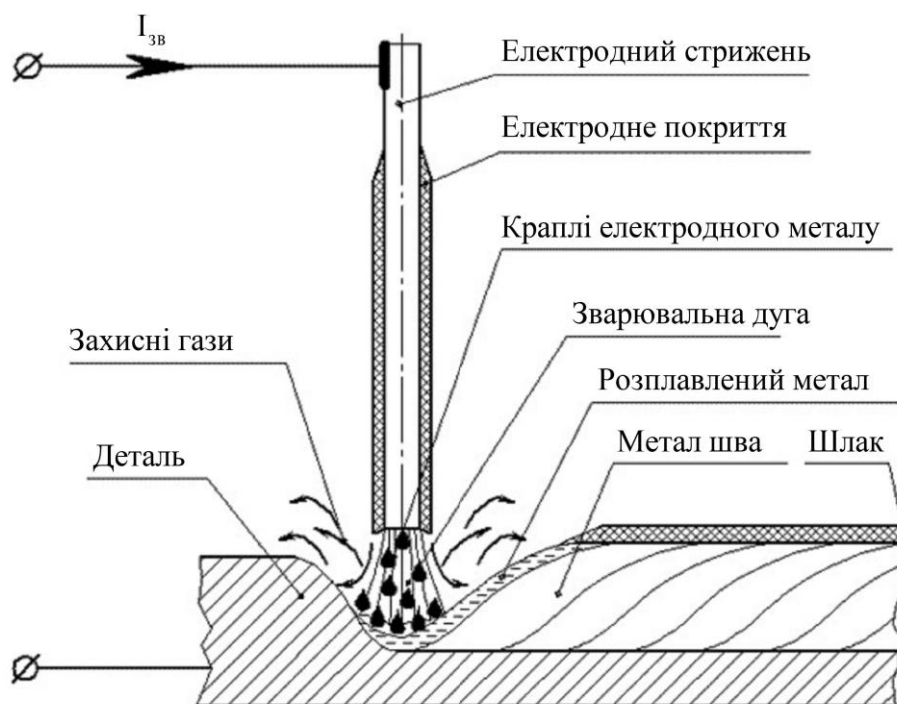


Рисунок 3.8 – Схема ручного дугового зварювання покритим електродом

Утворені при расплавленні покриття гази відтісняють повітря з реакційної зони (зони дуги) і так сприяють створенню кращих умов для захисту нагрітого металу. Для підвищення стійкості горіння зварювальної дуги в електродне покриття вводять сполуки, що містять іони лужних металів. Пари цих сполук знижують опір дугового проміжку за рахунок збільшення ступеня його іонізації і роблять дуговий розряд стійким. У зв'язку з тим, що більша частина теплоти виділяється на торці металевго стрижня електрода, на його кінці утворюється конічна втулка з покриття, що сприяє направленому рухові газового потоку. Це покращує захист зварювальної ванни. Крім того, втулка подовжує дугу, збільшуючи її напругу і потужність, а отже, і глибину проплавлення.

Під час заміни електродів, випадкових обривах дуги кристалізація металу зварювальної ванни призводить до утворення кратера (поглиблення у шві). Шлак, що твердне, утворює на поверхні шва шлакову скоринку. З огляду на те, що від струмопроводу в електротримачі зварювальний струм протікає металевим стрижнем електрода, стрижень розігрівається. Цей розігрів тим більший, чим довше протікання стрижнем зварювального струму і чим більша його величина (у стрижнів зі сталі до 500...600 °С). Це призводить до збільшення швидкості розплавлення електрода порівняно з початковою. Змінюється і глибина проплавлення основного металу,

зважаючи на зміну умов тепловіддачі від дуги до основного металу через прошарок рідкого металу в зварювальній ванні. В результаті змінюється співвідношення часток електродного і основного металів, що беруть участь в утворенні зварного шва, а значить і склад, і властивості металу шва, виконаного одним електродом. Це одна з причин нестабільності якості з'єднання.

При зварюванні покритими електродами переміщення уздовж лінії стику і подачу електрода в зону дуги під час його оплавлення здійснюють вручну. При цьому виникають труднощі, пов'язані з підтримкою сталості довжини дуги. Коливання дугового проміжку відбиваються на зварювальному струмі і напрузі і, як наслідок, на розмірі зварювальної ванни і механічних характеристиках з'єднання. Тому для підвищення стабільності якості з'єднання використовують джерела живлення з крутоспадними вольт-амперними характеристиками.

Електроди, наприклад для зварювання сталі, являють собою стрижні, виготовлені зі зварювального дроту, на поверхню якого нанесено шар покриття, призначений для підвищення стійкості горіння дуги, утворення комбінованого газошлакового захисту, легування і розкислення металу шва. Для виготовлення покриттів застосовують різні компоненти. Іонізувальні та стабілізувальні компоненти – сполуки, що містять іони лужних металів з низьким потенціалом іонізації ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{NaF}$ , тобто поташ, крейда, мармур, польовий шпат тощо).

Газоутворювальні компоненти – речовини, що розкладаються з виділенням великого об'єму газу, – мармур, крейда або органічні речовини: декстрин, крохмаль, целюлоза, які при нагріванні ще до розплавлення металу в результаті розкладання і окислення дають багато газоподібних продуктів –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Значна кількість газів забезпечує гарний захист від повітря і, зокрема, від азоту. У той же час це газове середовище є само-окиснювальним щодо заліза та легувальних елементів. Шлакоутворювальні компоненти – мінерали: польовий шпат  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ; мармур, крейда  $\text{CaCO}_3$ ; глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; флюорит  $\text{CaF}_2$ ; кварцовий пісок  $\text{SiO}_2$ ; іноді гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; марганцева руда, титановий концентрат  $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$ . При сплавлянні ці компоненти утворюють шлаки різного складу і основності. Розкислювальні і легувальні компоненти – кремній, марганець, титан та інші використовуються у вигляді порошків сплавів цих елементів з залізом (так званих феросплавів) і тому швидко розчиняються в рідкій сталі. Алюміній в покриття вводять у вигляді порошку – пудри.

Деякі компоненти можуть виконувати декілька функцій одночасно, наприклад, крейда, яка, розкладаючись, виділяє багато газу ( $\text{CO}_2$ ), оксид кальцію йде на утворення шлаку, а пари кальцію мають низький потенціал іонізації і стабілізують дуговий розряд,  $\text{CO}_2$  служить газовим захистом. Для з'єднання порошків компонентів в заміс використовують рідке скло або полімери. Нанесення покриття на металевий стрижень здійснюється в

спеціальних пресах або методом занурення в рідкий заміс. Покриття електродів для магнієвих сплавів, аналогічно покриттям для зварювання алюмінієвих сплавів, складаються з фтористих і хлористих солей лужних і лужноземельних металів.

Основними параметрами режиму ручного дугового зварювання є діаметр електрода і значення зварювального струму. Інші параметри підбираються зварником в процесі зварювання і не регламентуються. Діаметр електрода встановлюють залежно від товщини зварюваних деталей, виду зварного з'єднання і розмірів шва. Для стикових з'єднань рекомендуються діаметри електродів вибирати залежно від товщини зварювальних крайок.

Товщина крайок, мм	<2	3-5	6-8	9-12	13-15	16-20	>20
Діаметр електрода, мм	<2	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-10

За обраним діаметром електрода встановлюють значення зварювального струму. Зазвичай для кожної марки електродів значення струму вказано на заводській етикетці або розраховується.

Основне обладнання зварювального поста складається з джерела живлення дуги, зварювальних проводів, інструментів зварника і зварювального стола.

**3.2.4 Автоматичне зварювання під флюсом.** Зварювання під флюсом є найпоширенішим способом механізованого дугового зварювання плавленням. Цей спосіб знайшов широке застосування і став одним з провідних технологічних процесів у багатьох галузях промисловості під час виготовлення конструкцій зі сталей, кольорових металів (алюмінію, титану, міді) і їх сплавів. Автоматичне зварювання під флюсом доцільно застосовувати в серійному і масовому виробництвах для виконання кільцевих, прямолінійних, стикових і кутових швів протяжністю 0,8 м і більше на металі товщиною 3...100 мм з вільним входом і виходом зварювальної головки для початку і кінця шва.

Переваги автоматичного зварювання під флюсом:

- висока продуктивність;
- стабільність високої якості та гарного зовнішнього вигляду зварювальних з'єднань;
- високий рівень локальної механізації зварювального процесу і можливість його комплексної автоматизації;
- зниження питомої витрати електродного металу і електроенергії.

Недоліки автоматичного зварювання під флюсом:

- можливість зварювання тільки в нижньому положенні;

- необхідність більш ретельної (порівняно з ручним зварюванням) підготовки крайок і більш точного складання деталей під зварювання;
- неможливість зварювання стикових швів без підкладок або попереднього підварювання кореня шва.

Сутність процесу дугового зварювання під флюсом полягає в застосуванні непокритого зварювального дроту і гранульованого флюсу, насипаного попереду дуги шаром товщиною 30...50 мм. Схема процесу автоматичного дугового зварювання під флюсом наведена на рис. 3.9.

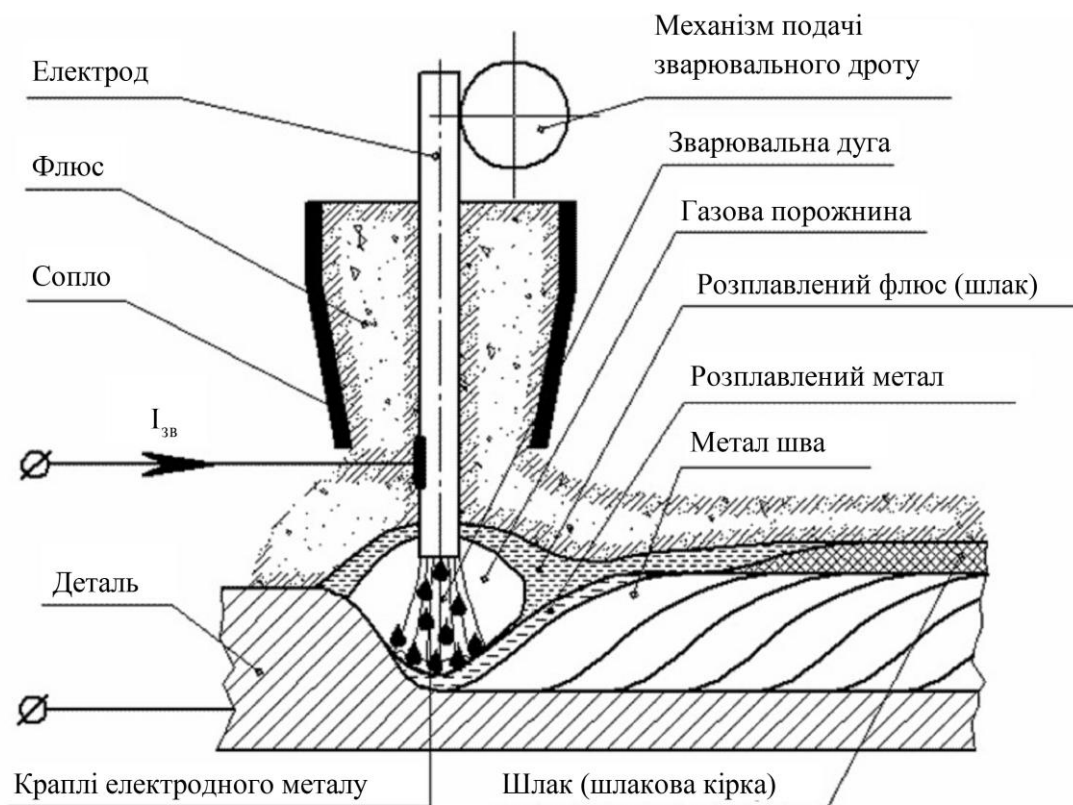


Рисунок 3.9 – Схема процесу зварювання під флюсом

Збудження і підтримання дугового розряду виконується автоматично зварювальною головкою, яка за допомогою механізму подачі безперервно подає в зону дуги зварювальний дріт в процесі його плавлення. Дуга горить між кінцем електрода і виробом. Переміщення дуги швом здійснюється самохідним зварювальним візком (або виріб переміщується щодо нерухомої зварювальної головки). Під дією тепла, що виділяється зварювальною дугою, плавляться електродний дріт і метал зварюваного виробу, а також частина флюсу, що примикає до дуги. Навколо дуги утворюється порожнина (газовий пухир), обмежена у верхній частині оболонкою розплавленого флюсу, а в нижній – зварювальною ванною. Газовий пухир заповнений парами металу, флюсу і газами. Тиск газів підтримує флюсову стелю, що утворюється над зварювальною ванною.

Дуга дещо відхиляється від вертикального положення в бік, протилежний напрямку зварювання. Під впливом тиску дуги рідкий метал відтісняється також у бік, протилежний напрямку зварювання. Під електродом утворюється кратер з тонким шаром розплавленого металу, а основна маса розплавленого металу займає простір від кратера до поверхні шва, розташовуючись похилим шаром. Розплавлений флюс внаслідок значно меншої щільності, спливає на поверхню розплавленого металу шва і покриває його щільним шаром.

В процесі поступального руху електрода відбувається затвердіння металеві та шлакової ванн з утворенням зварного шва, покритого твердою шлаковою кіркою. Зварювання під флюсом можна здійснювати змінним і постійним струмом, однією дугою, двома дугами, розщепленим електродом і трифазною дугою (рис. 3.10). Електроди щодо напрямку зварювання можуть бути розташовані послідовно або перпендикулярно. При послідовному розташуванні глибина проплавлення шва дещо збільшується, а при перпендикулярному зменшується. Другий варіант розташування електродів дозволяє виконувати зварювання при підвищених зазорах між крайками. Змінюючи відстань між електродами, можна регулювати форму і розмір шва.

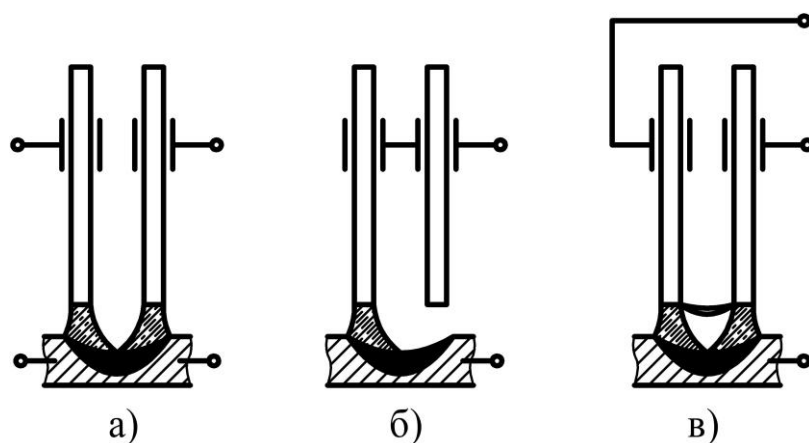


Рисунок 3.10 – Схеми багатодугового зварювання: а – двома дугами, б – розщепленим електродом; в – трифазною дугою

Розплавлений флюс (шлак), що покриває металеву ванну при зварюванні, виконує такі функції:

- захищає рідкий метал зварювальної ванни від безпосереднього контакту з повітрям;
- розкислює, легує і рафінує метал шва;
- змінює тепловий режим зварювання шляхом зменшення швидкості охолодження металу;
- забезпечує стійке горіння дуги;
- покращує умови формування шва.

Хороший контакт шлаку і металу, наявність ізолюваного від

зовнішнього середовища простору забезпечують сприятливі умови для захисту, металургійної та теплової обробки зварювальної ванни і тим самим сприяють отриманню швів з високими механічними властивостями.

**3.2.5 Автоматичне зварювання.** Може виконуватися без присадного матеріалу і з присадним матеріалом.

Одностороннє зварювання неплавким електродом встик без оброблення крайок, без гарантованого зазору, без присадки, а також без застосування прийомів збільшення глибини проплавлення (активувальних флюсів) може бути виконано з повним проваренням при товщині металу не більше 5 мм. Утворення зварювального шва відбувається за рахунок розплавлення крайок.

До складу устаткування для автоматичного зварювання входять: зварювальна головка, пристрій для переміщення зварювальної головки або виробу, апаратура керування механізмами автомата (рис. 3.11, а). Найпростіша зварювальна головка містить: зварювальний пальник, пристрої для настановних переміщень пальника (налагодження на шов, установлення довжини дуги, рис. 3.11, б).

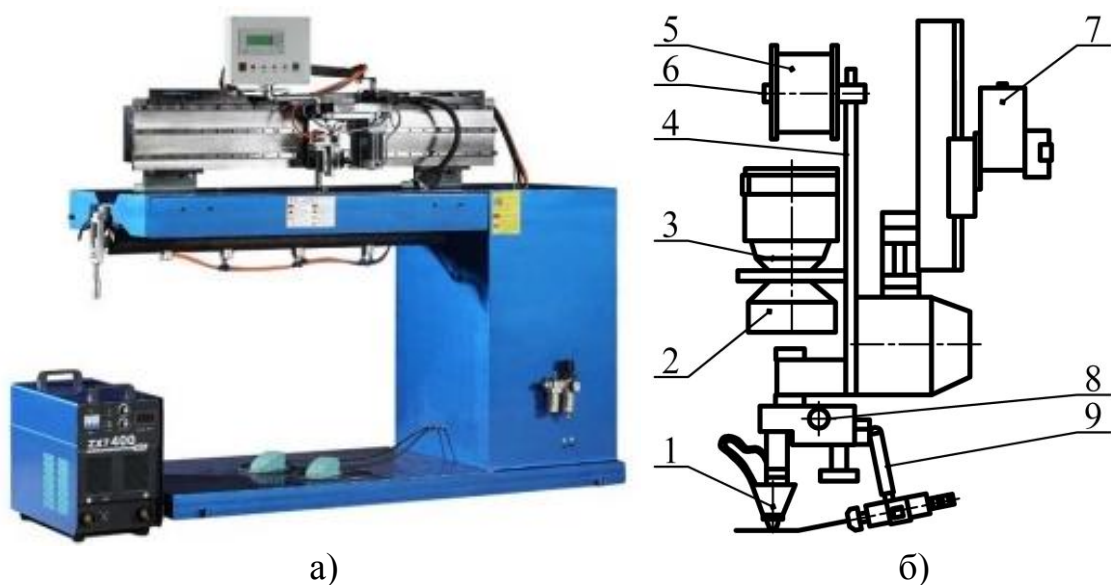


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд апарата для автоматичного аргонодугового зварювання з присадкою (а) і схема зварювальної головки (б): 1 – пальник; 2 – механізм подачі; 3 – привод; 4 – підвіска; 5 – касета; 6 – гальмівний пристрій; 7 – супорт; 8 – коректор; 9 – підвіска

Процес автоматичного зварювання з присадним дротом застосовується для з'єднання заготовок товщиною більше 1,5 мм. Присадний дріт подається із заданою швидкістю, яка регулюється в досить широких межах.

Зазвичай зварювальна головка містить і інші функціональні вузли: механізм для подачі присадного дроту, механізми для настановних

переміщень мундштука для підведення присадки до зварювальної ванни, пристрій для коливання пальника поперек стику (коливальник); автоматичний регулятор напруги на дузі тощо.

Головка може бути самохідною, встановлюватися на самохідний візок-трактор (автомат тракторного типу) або закріплюватися нерухомо, якщо зварювальний рух здійснюється виробом (підвісна головка). На самохідних головках встановлюється привод переміщення вздовж лінії зварювання. Автомати можуть бути забезпечені системами стеження за лінією стику виробу.

Як джерела зварювального струму при зварюванні в середовищі інертних газів використовують випрямлячі, перетворювачі і трансформатори.

Якість захисту нагрітого і розплавленого металу при зварюванні залежить не тільки від виду захисного газу, але і від способу захисту.

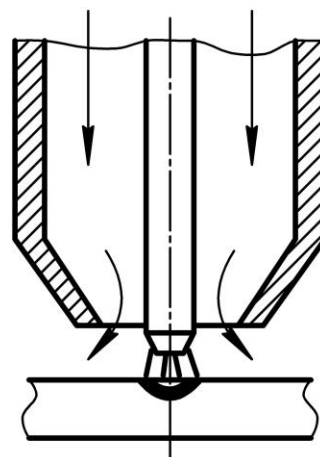
У виробництві зварних конструкцій застосовуються три основні способи захисту зварюваного вузла або зони зварювання від взаємодії з повітрям: загальний захист, місцевий захист і струменевий захист.

При загальному захисті зварюваний вузол повністю поміщають в камеру, яку потім вакуумують до розрідження  $10^{-2}$  Па (для видалення повітря) і заповнюють захисним газом. При роботі зварник знаходиться поза камерою. Зварювання виконують вручну, використовуючи рукава-рукавички, з'єднані з корпусом камери, або автоматично з дистанційним керуванням. Застосування камер із загальним захистом всього вузла забезпечує найбільш надійний захист нагрітого і розплавленого металу від взаємодії з повітрям. Основні недоліки цих камер – обмежений об'єм і відносна складність експлуатації.

Для виготовлення великогабаритних конструкцій використовуються камери з інертною атмосферою. У цьому випадку зварник знаходиться всередині камери в спеціальному скафандрі.

У дослідному або одиничному виробництві застосування камер із загальним захистом, і тим більше камер з інертною атмосферою, недоцільно з економічних міркувань. У цих випадках для захисту металу шва і навколошовної зони застосовують місцеві захисні камери, які встановлюють на зварювані вузли із забезпеченням герметичності роз'ємів при переміщенні заготовок.

Найширше в зварювальному виробництві використовується струменевий захист, при якому захисні гази подають в зону зварювання для відтискування повітря від нагрітого і розплавленого металу. Як правило, із сопла пальника витікає суцільний



струмінь захисного газу симетрично осі електрода (рис. 3.12).

При зварюванні стикових швів зі струменевим захистом повітря може надходити до розплавленого дугою металу через зазор між деталями, що зварюються. Це викличе окислення металу шва, може призвести до утворення пор в шві. Для попередження подібних дефектів застосовують обдування захисним газом зворотного боку шва, зварювання ведуть на щільно прилеглих з боку шва підкладках, в які подається захисний газ з регульованим надлишковим тиском (рис. 3.13).

Технологічні характеристики процесу зварювання вольфрамовим електродом залежать, головним чином, від роду, полярності, величини зварювального струму, довжини дуги, розмірів і форми торця вольфрамового електрода.

Зварювання постійним струмом прямої полярності характеризується максимальною здатністю глибокого проплавлення. У діапазоні струмів до 600 А частка теплової потужності, що вводиться у виріб, становить 60...80%; втрати на нагрів вольфрамового електрода – близько 5%, а променеві втрати від стовпа дуги – 5...35%.

При зварюванні постійним струмом зворотної полярності втрати на нагрів анода, що плавиться, складають близько 50% загальної потужності дуги. Тому, з енергетичної точки зору зварювання струмом зворотної полярності не вигідне.

Концентрація нагрівання в цьому випадку нижча, шви мають меншу глибину і більшу ширину проплавлення, ніж при зварюванні на прямій полярності або змінним струмом. Перевагою зварювання дугою зворотної полярності є ефективне руйнування оксидних плівок із забезпеченням високої чистоти поверхні зварювальної ванни за рахунок розвитку катодного розпилення. Процес характеризується хорошим сплавленням основного та присадного металів навіть при недбалій підготовці поверхні виробів під зварювання.

Зварювання змінним струмом є найбільш поширеним процесом при виготовленні конструкцій з алюмінієвих і магнієвих сплавів. Очищення поверхонь від оксидів відбувається в півперіоді зворотної полярності.

У діапазоні зварювальних струмів 250...600 А істотну роль у проплавленні шва відіграє механічний вплив дуги. Збільшення зварювального струму від 300 до 600 А при зварюванні, наприклад сталі

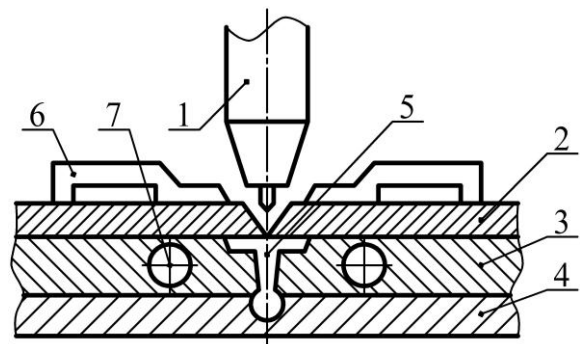


Рисунок 3.13 – Схема збирання стикових з'єднань: 1 – зварювальний пальник; 2 – виріб, що зварюється, 3 – мідна частина підкладки; 4 – сталеві частини підкладки; 5 – канал для захисного газу; 6 – притискач; 7 – канал для охолоджувальної води



X18H9T товщиною 16 мм викликає лінійне зростання силового впливу дуги з  $6 \cdot 10^{-2}$  до  $15 \cdot 10^{-2}$ Н. У зв'язку з цим стовп дуги заглиблюється в розплавлений метал, в результаті чого зменшується прошарок рідкого металу під дугою і поліпшуються умови теплопередачі в основний метал. Проте глибина проплавлення збільшується ~ на 50% (від 6 до 9 мм), а ширина зростає ~ на 70% (від 10 до 18 мм). Більш повільне зростання проплавлювальної дії дуги пов'язане з тим, що зі збільшенням зварювального струму одночасно зростає діаметр стовпа дуги і розширюється пляма нагрівання, а щільність теплового потоку змінюється незначно.

**3.2.6 Зварювання у вуглекислому газі.** Під час виготовлення зварних конструкцій з низьковуглецевих і низьколегованих сталей широке застосування знаходить напіваавтоматичне, менше – автоматичне зварювання у вуглекислому газі. Сутність зварювання в середовищі  $\text{CO}_2$  полягає в тому, що дуга горить в середовищі захисного газу, який відтісняє повітря від зони зварювання і захищає розплавлений метал від кисню та азоту повітря.

Напіваавтоматичне зварювання у вуглекислому газі застосовують в одиничному, дрібносерійному і рідше – в серійному виробництві для виконання непротяжних швів на виробках невеликої товщини.

Переваги цього способу зварювання: підвищення продуктивності в порівнянні з ручним зварюванням в 1,2...1,5 рази; можливість зварювання в будь-якому просторовому положенні і стикових швів "на вазі"; висока маневреність і мобільність (у порівнянні з автоматичним зварюванням); можливість візуального контролю за напрямком дуги по стику. Недоліки: сильне розбризкування металу при зварюванні на струмах 200...400 А і необхідність видалення бризок з поверхні виробу; ускладнено використання на відкритому повітрі (на вітрі) через здування захисного газу; зовнішній (товарний) вигляд шва гірший, ніж при зварюванні під флюсом.

Аналіз процесів, що протікають у газовій фазі реакційної зони, дає підставу стверджувати, що вуглекислий газ є сильним окислювачем і при зварюванні в  $\text{CO}_2$  формується окислювальна атмосфера, яка взаємодіє з металом і легувальними елементами, окислюючи їх. Причиною цього є дисоціація  $\text{CO}_2$  на  $\text{CO}$  та  $\text{O}$  під впливом високої температури в зоні дуги. Розчинений в сплаві кисень може реагувати з домішками металу з утворенням шлаків і газів. У хвостовій частині зварювальної ванни шлак спливає на поверхню металу, а утворені газоподібні продукти можуть служити причиною появи пор в металі шва. Для зв'язування кисню, розчиненого в металі, необхідно застосовувати електродні дроти, що містять раскислювачі, які оберігають від окислення легувальні домішки і пригнічують процес вигорання вуглецю у шві.

Метал, наплавлений при зварюванні у вуглекислому газі, чистіший від шлакових включень, і тому його пластичні властивості трохи вищі, ніж при зварюванні під шаром флюсу.

**Режими і техніка зварювання.** До основних параметрів режиму зварювання відносять полярність струму (як правило, зворотну), діаметр електродного дроту, силу струму, напругу дуги, швидкість зварювання, виліт електрода (приблизно дорівнює відстані від торця пальника до зварюваного металу) і витрату захисного газу.

Змінний і постійний струми (прямої полярності) не застосовуються через недостатню стійкість процесу, незадовільну якість і форму шва. При струмі прямої полярності процес зварювання супроводжується великим розбризкуванням і крупнокрапельним перенесенням електродного металу. При зварюванні у вуглекислому газі особливо характерним є застосування електродного дроту малих діаметрів (0,8...2,0 мм), струму високої щільності і, відповідно, великої швидкості плавлення електрода. При зварюванні на форсованих режимах тонкими дротами найбільш доцільною є щільність струму в електроді 250...450 А/мм<sup>2</sup>. Збільшення діаметра електродного дроту (за інших рівних умов) супроводжується істотним зменшенням коефіцієнта наплавлення, деяким збільшенням ширини шва і зменшенням глибини проплавлення основного металу. Діаметр зварювального дроту  $d_e$  вибирається залежно від товщини зварюваних деталей.

Робочий пост для дугового зварювання електродним дротом в середовищі вуглекислого газу повинен бути забезпечений: джерелом постійного струму, напівавтоматом, балоном з газом, передредукторним осушувачем, підігрівачем газу, редуктором, ротаметром, амперметром і вольтметром (рис. 3.14). Для зварювання найбільш зручна рідка вуглекислота, що випускається за стандартами з вмістом CO<sub>2</sub> не менше 99,5%. У стандартний балон заливають 25 л рідкої вуглекислоти, яка при випаровуванні дає 12,5 м<sup>3</sup> газу. Передредукторний осушувач призначений для очищення газу від вологи, яка може міститися в балоні. Осушення газу здійснюється адсорбентами: мідним купоросом, силікагелем або алюмогелем; найбільшу глибину осушення і вологоємність має цеоліт марки № А-2КТ.

Безперервний відбір з балона газоподібного CO<sub>2</sub> супроводжується різким зменшенням його температури і тиску внаслідок поглинання прихованої теплоти випаровування при переході CO<sub>2</sub> з рідкої фази в газоподібну. При відборі газу з витратою понад 20 л/хв. CO<sub>2</sub> перетворюється в сухий лід. Для оберігання редуктора від замерзання використовують підігрівач газу.

У напівавтоматах (рис. 3.14) для дугового зварювання здійснюється механізована подача зварювального дроту чотирироликівим механізмом.



Рисунок 3.14 – Загальний вигляд апарата VarioSynergic 5000/5000-2 для напівавтоматичного зварювання у вуглекислому газі

Основними елементами напівавтоматів є: тримач, гнучкі шланги, механізм подачі зварювального дроту, касета зі зварювальним дротом і пульт управління.

Конструктивні особливості як самих напівавтоматів, так і їх окремих елементів залежать в основному від призначення (спеціалізації) напівавтоматів. Напівавтомати комплектуються джерелами живлення – випрямлячами з жорсткою характеристикою.

**3.2.7 Плазмове зварювання.** Плазмове зварювання відносять до дугових видів зварювання, при цьому для джерела нагрівання зварюваних заготовок використовується стисла дуга.

Перша згадка про розробку плазмового зварювання належить до 1950-х років. Протягом 1960-х років були запропоновані декілька принципів формування плазмово-газового потоку, розроблені та впроваджені устаткування й технологія цього процесу у виробництво. В даний час постійно здійснюється розвиток, вдосконалення плазмового зварювання і пошук нових областей його застосування як у нас в країні, так і за кордоном.

При звичайному дуговому зварюванні дуга горить вільно між електродом і виробом. Але, якщо за допомогою деяких прийомів не дати можливість дузі зайняти її природний об'єм, примусово стиснути її, то температура дуги значно підвищиться. Зокрема, можна обмежити діаметр стовпа дуги, пропустивши її через сопло малого діаметра. При цьому плазмоутворювальний газ, витікаючи через сопло пальника, стискає дугу. Частина газу, проходячи через стовп дуги, нагрівається, іонізується і виходить з сопла у вигляді плазмового струменя. Зовнішній шар, що оточує стовп дуги, залишається відносно холодним і створює електричну та теплову ізоляції між дугою і соплом, оберігаючи сопло від руйнування.

Плазмою прийнято вважати частково або повністю іонізований газ, що складається з нейтральних атомів і молекул, іонів і електронів. Типовий плазмовий стан речовини має місце в електричному газовому розряді.

Плазма газового розряду в залежності від складу середовища характеризується температурами від 2000...3000 °С до 40000...50000 °С.

Плазмові струмені отримують у плазмових пальниках, які називають також плазмотронами. У промисловості знаходять застосування, головним чином, дугові плазмові пальники постійного струму. Найбільш поширені способи отримання плазмових струменів шляхом інтенсивного охолодження газовим потоком стовпа дуги, що горить в порівняно вузькому водоохолоджуваному каналі плазмового пальника.

В інженерній практиці використовують дві основні принципові схеми дугових плазмових пальників.

Пальники прямої дії для зварювання плазмовою дугою, в яких одним з електродів є оброблюваний матеріал (рис. 3.15, а). У цьому випадку використовують два енергетичних джерела: плазмовий струмінь і електрично активну пляму дуги. Внутрішній ККД такого пальника, тобто використання підведеної до неї електроенергії, досягає 60...80%.

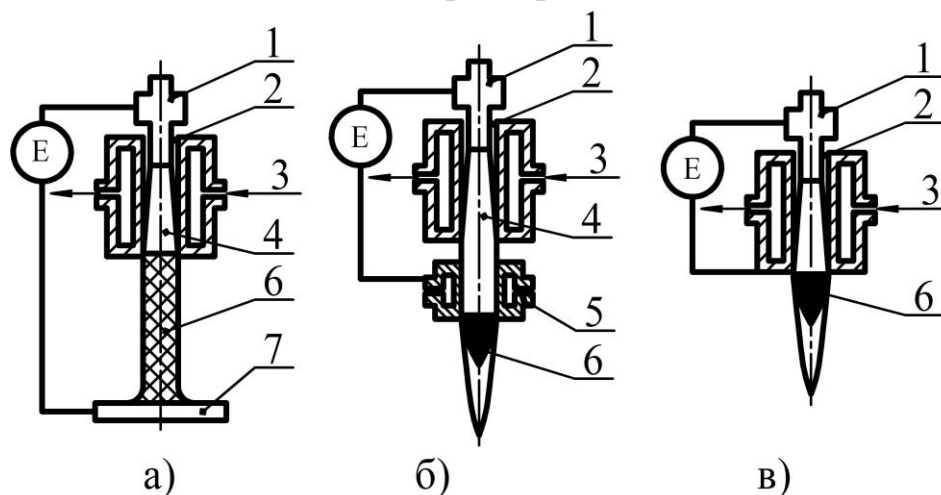


Рисунок 3.15 – Принципові схеми дугових плазмових пальників (плазмотронів) для отримання: а) – плазмової дуги, б) і в) – плазмового

струменя: 1 – електрод, 2 – канал, 3 – охолоджувальна вода, 4 – стовп дуги, 5 – сопло, 6 – плазмовий струмінь, E – джерело струму

Пальники непрямої дії для зварювання плазмовим струменем (рис. 3.15, б, в). Для зниження теплового навантаження на електроди застосовують плазмові пальники з магнітним закручуванням дуги. Максимальні значення внутрішнього ККД таких пальників (при великих витратах газу) досягають 50...70%. Частина енергії дуги витрачається на нагрівання електродів-розрядників, а також розсіюється в навколишній простір внаслідок променевого і конвективного теплообміну.

Склад плазмоутворювального газу (аргон, гелій, азот тощо) вибирають залежно від вимог, що висувуються до процесу. Електроди виготовляють, зазвичай, з міді та вольфраму. Стінки камери захищені від теплового впливу дуги шаром порівняно холодного газу.

Основними параметрами регулювання теплових характеристик плазмового струменя є сила струму і довжина дуги, а також витрата плазмоутворювального газу. Збільшення сили струму і довжини дуги викликає зростання температури струменя; підвищення витрати плазмоутворювального газу при великих його значеннях знижує середньомасову температуру струменя.

**Застосування плазмового зварювання.** Дослідження в області плазмових технологій як у нашій країні, так і за кордоном були спрямовані на вирішення проблем авіа- та ракетобудування, електроніки, ядерної енергетики, криогенної техніки. Основна увага приділялася поліпшенню якості зварювання виробів з алюмінію, корозійностійких і жароміцних сплавів і титану у широкому діапазоні товщин, різних типів з'єднань. Зварювання плазмовою дугою змінного струму використано в СРСР і США у виробництві алюмінієвих паливних баків ракет.

Переваги плазмового зварювання такі:

- порівняно з аргонодуговим плазмово-дугове зварювання відрізняється більш стабільним горінням дуги. При цьому забезпечується більш рівномірне проплавлення крайок;
- за проплавляльною здатністю плазмова дуга займає проміжне положення між електронним променем і дугою, що горить в аргоні;
- стовп дуги і струмінь плазми мають циліндричну форму, тому площа поверхні металу, через яку здійснюється теплопередача від струменя до металу, не залежить від відстані між електродом пальника і виробом;
- завдяки циліндричній формі стовпа дуги процес плазмово-дугового зварювання менш чутливий до зміни довжини дуги, ніж аргонодугове зварювання. Зміна довжини дуги конічної форми (при аргонодуговому зварюванні) завжди веде до зміни діаметра плями нагрівання, а отже, і до зміни ширини шва. Плазмове зварювання дозволяє мати практично постійний діаметр плями і дає можливість стабілізувати проплавлення

основного металу. Ця властивість плазмової дуги з успіхом використовується при зварюванні дуже тонких листів.

Окремо слід виділити зварювання мікроплазмовою дугою.

Мікроплазмовою дугою (сила струму 0,1...15 А) зварюють листи товщиною 0,025...0,8 мм з вуглецевої і нержавіючої сталі, міді, ковара, титану, танталу, молібдену, вольфраму, золота тощо.

Джерела живлення дозволяють вести процес в безперервному і імпульсному режимах.

У порівнянні з аргонодуговим зварюванням мікроплазмове має такі важливі переваги:

– зміна довжини мікроплазмової дуги значно менше впливає на якість зварного з'єднання деталей малих товщин;

– плазмова дуга впевнено запалюється при струмах менше 1 А;

– полегшується доступ до об'єкта зварювання і поліпшується зоровий огляд робочого простору (на струмі ~ 15 А довжина дуги сягає 10 мм).

Найчастіше для мікроплазмового зварювання листів використовується відбортовка.

Мікроплазмове зварювання знаходить широке застосування в радіоелектроніці та приладобудуванні для зварювання тонких листів і фольги. В авіаційній промисловості за допомогою мікроплазмового зварювання виготовляють з легованих сталей, алюмінієвих сплавів, тугоплавких металів товщиною 0,1 ... 0,5 мм сильфони, тонкостінні трубопроводи, деталі приладів. Останнім часом мікроплазмове зварювання широко застосовується у виробництві і ремонті деталей електроніки та космонавтики, вимірювальних інструментів, годинників (у тому числі наручних), ювелірних виробів, металевих фільтрів, термопар і тонкостінних трубок, зубопротезуванні.

### **3.3 Електрошлакове зварювання**

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) – процес утворення нероз'ємного з'єднання, при якому розплавлення основного і присадного металу здійснюється за рахунок тепла, що виділяється при проходженні електричного струму через розплавлений флюс. При цьому шар розплавленого флюсу служить захистом металу зварювальної ванни від взаємодії з киснем і азотом повітря. Схеми процесу та встановлення ЕШЗ наведено на рис. 3.16.

Шлакова ванна утворюється (наводиться) шляхом розплавлення флюсу, що заповнює простір між крайками основного металу і спеціальними охолоджуваними водою пристосуваннями-повзунами, щільно притиснутими до поверхні зварюваних деталей.

Шлакова ванна утворюється (наводиться) шляхом розплавлення флюсу, що заповнює простір між крайками основного металу і

спеціальними охолоджуваними водою пристосуваннями-повзунами, щільно притиснутими до поверхні зварюваних деталей.

Флюс плавиться дугою, що виникає в початковий період зварювання між основним металом і електродним дротом. Після розплавлення певної кількості флюсу дуга шунтується розплавленим шлаком і гасне. Довжина шлакової ванни практично дорівнює товщині основного металу, а ширина визначається зазором між крайками, що зварюються. Глибину шлакової ванни вибирають залежно від технологічних умов (складу основного металу, режиму зварювання тощо.)

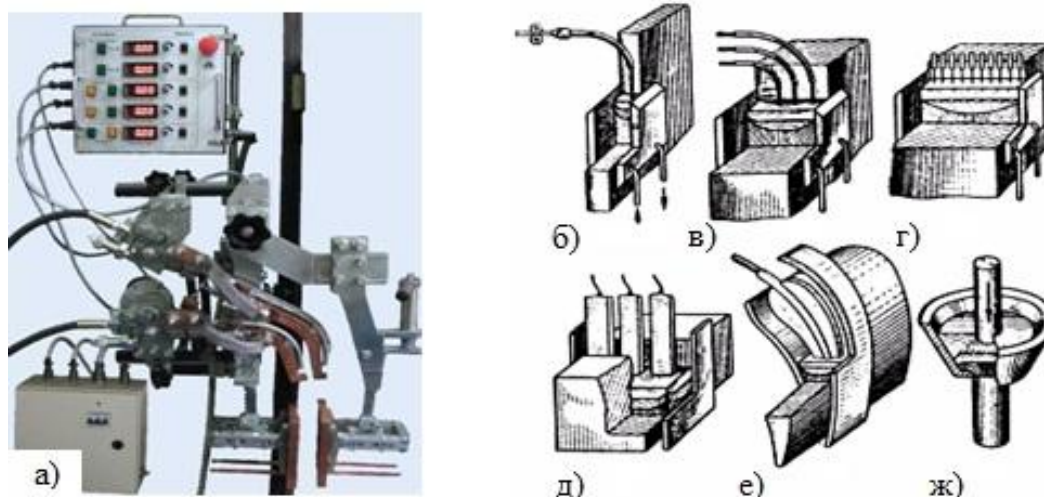


Рисунок 3.16 – Трьохелектродна установка а) і основні схеми процесів електрошлакового зварювання: б) – зварювання одним електродом металу товщиною до 60 мм; в) – трифазна зварювання металу товщиною 450 мм трьома електродами зі зворотно-поступальним рухом; г) – багатоелектродне зварювання металу практично необмеженої товщини; д) – зварювання пластинчастими електродами; е) – зварювання плавким мундштуком; ж) – контактньо-шлакове зварювання стрижнів

Необхідна для здійснення шлакового процесу енергія надходить від джерела живлення з жорсткою характеристикою змінного або постійного струму, яке під'єднується до основного металу і плавких електродів, вставлених в зазор між зварюваними крайками і зануреними в шлакову ванну. Електрод розташовують посередині шлакової ванни або переміщують у зазорі від однієї поверхні деталей, що зварюються, до іншої. Струм до електрода підводиться за допомогою мундштука. Проходячи через шлакову ванну, струм нагріває її до температури  $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ , яка перевершує температуру плавлення основного і електродного металів.

Шлак розплавляє крайки основного металу і електрод, який подається в шлакову ванну, зі швидкістю, рівною швидкості його плавлення. Розплавлені електродний і основний метали стікають на дно шлакової

ванни, утворюючи зварювальну (металева) ванну. В процесі віддалення джерела нагрівання відбувається кристалізація металу зварювальної ванни. Розплавлений шлак, що знаходиться над металевою ванною, досить надійно захищає метал від впливу повітря. Після заповнення зазору між зварюваними крайками мунштук за допомогою спеціального приводу пересувається вздовж шва.

Шлакова ванна, утворена на початку зварювання, по мірі формування шва переміщається від початку деталі до кінця, при цьому стикаючись з охолоджувальними повзунами, утворює на них тонку шлакову кірку, усуваючи безпосередній контакт розплавленого металу з поверхнею повзуна.

Витрата флюсу при цьому способі зварювання невелика і не перевищує 5% маси наплавленого металу. Зважаючи на малу кількість шлаку легування наплавленого металу відбувається, в основному, за рахунок електродного дроту. При цьому частка основного металу в зварному шві може бути знижена до 10...20%.

У порівнянні зі зварювальною дугою шлакова ванна є менш концентрованим джерелом тепла, тому ЕШЗ характеризується більш повільним нагріванням і охолодженням. Значний час перебування металу в розплавленому стані сприяє поліпшенню умов видалення газів і неметалевих включень з металу шва.

Електрошлаковий процес протікає стійко навіть при щільності струму  $j$  близько  $0,1 \text{ А/мм}^2$  (при ручному дуговому зварюванні покритими електродами  $j = 10...30 \text{ А/мм}^2$ ; при автоматичному під шаром флюсу  $j = 200 \text{ А/мм}^2$ ; при зварюванні плавленням, в захисних газах  $j = 400 \text{ А/мм}^2$ ), тому можливе використання електродів досить великого перерізу.

Електрошлакове зварювання, як правило, ведуть при вертикальному положенні виробів. Дзеркало зварювальної ванни, так само як і при зварюванні в нижньому положенні, розташоване в горизонтальній площині, а переміщення розплавленого електродного і основного металів відбувається в напрямку сил ваги (рис. 3.17).

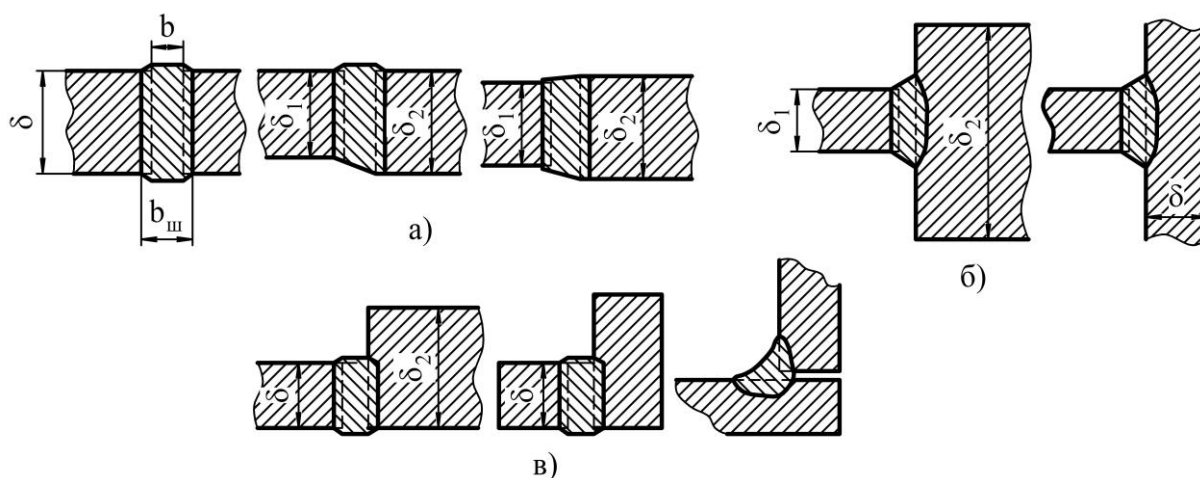




Рисунок 3.17 – Види з'єднань, виконаних електрошлаковим зварюванням: а) – стикові, б) – таврові; в) – кутові;  $\delta$  – товщина металу;  $b$  – ширина зазору;  $b_{ш}$  – ширина шва

Зазвичай зварювання починається в прикріпленому до частини стику металевому кокилі довжиною 50...100 мм, де збуджується дуговий процес. Для того щоб вивести шлакову ванну і запобігти утворенню усадкових тріщин і розпушеності в кінці шва, на виробі встановлюються вихідні планки довжиною близько 100 мм.

Електрошлакове зварювання дозволяє виконувати не тільки прямолінійні, а й кільцеві шви (рис.3.18). Обертання виробів здійснюється на роликівій опорі або іншим способом.

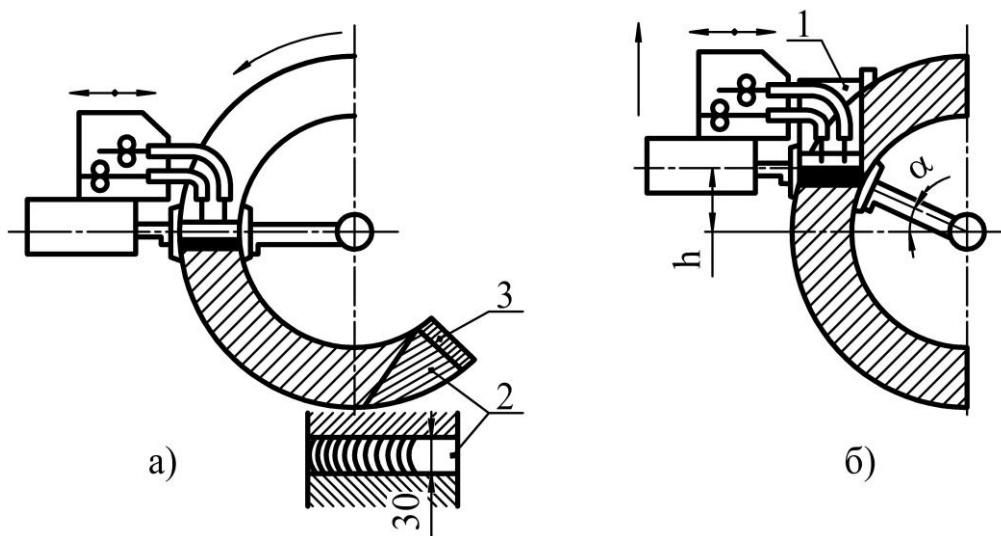


Рисунок 3.18 – Схема електрошлакового зварювання кільцевого шва: а) – зварювання у середній частині шва, б) – замикання шва; 1 – вихідний кокиль; 2 – обробка початку шва для його замикання; 3 – планка для заходу,  $\alpha$  – кут переміщення повзуна до початку замикання;  $h$  – висота підйому апарату до початку замикання шва

### 3.4 Зварювання електронним променем

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) ґрунтується на використанні для нагрівання енергії електронного променя.

Сутність даного процесу полягає у використанні кінетичної енергії електронів, що рухаються у глибокому вакуумі з великою швидкістю. При бомбардуванні електронами поверхні металу переважна частина кінетичної енергії електронів перетворюється в теплоту, що використовується для розплавлення металу.

Для зварювання необхідно отримати вільні електрони, сконцентрувати їх і надати їм велику швидкість з метою збільшення їх енергії, яка повинна перетворитися на теплоту при гальмуванні в зварюваному металі.

Отримання вільних електронів здійснюється шляхом застосування розпеченого металевого катода, що емітує (випускає) електрони. Прискорення електронів забезпечується електричним полем з високою різницею потенціалів між катодом і анодом. Фокусування – концентрація електронів – досягається використанням кільцевих магнітних полів. Різке гальмування електронного потоку відбувається автоматично при проникненні електронів в метал. Електронний промінь, який використовується для зварювання, створюється в спеціальному приладі – електронній гарматі.

Електронна гармата є пристроєм, за допомогою якого отримують вузькі електронні пучки з великою щільністю енергії (рис. 3.19).

Гармата має катод 1, який розміщений всередині прикатодного електрода 2. На деякій відстані від катода знаходиться прискорювальний електрод – анод 3 з отвором. Прикатодний і прискорювальний електроди мають форму, що забезпечує таку будову електричного поля між ними, яка фокусує електрони в пучок з діаметром, рівним діаметру отвору в аноді. Позитивний потенціал прискорювального електрода може досягати декількох десятків

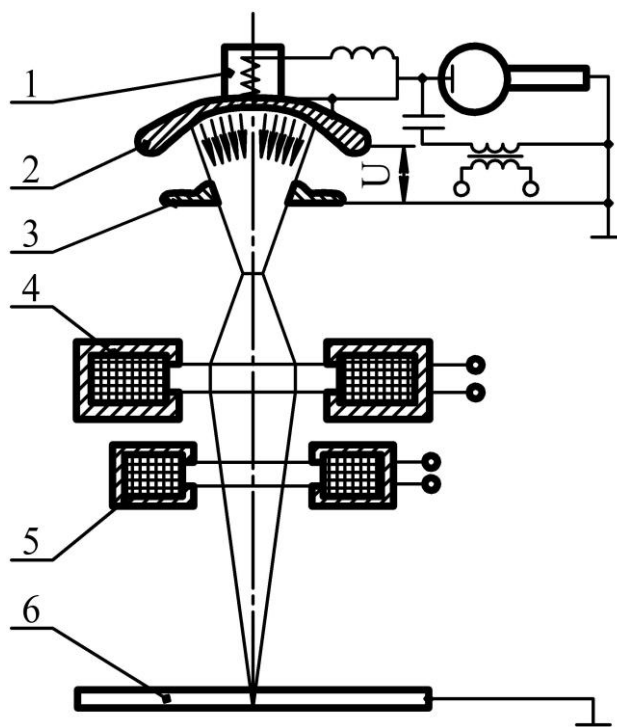


Рисунок 3.19 – Схема будови електронно-променевої гармати

тисяч вольт, тому електрони, емітовані катодом, на шляху до анода набувають значну швидкість і, відповідно, кінетичну енергію. Після прискорювального електрода електрони рухаються рівномірно. Живлення гармати електричною енергією здійснюється від високовольтного джерела постійного струму. Електрони мають однаковий заряд, тому вони відштовхуються один від одного, внаслідок чого діаметр пучка збільшується, а щільність енергії в пучці зменшується.

Для збільшення щільності енергії в промені після виходу з анода електрони фокусуються магнітним полем у спеціальній магнітній лінзі 4. Сфокусовані в щільний пучок електрони летять і вдаряються з великою швидкістю в поверхню виробу 6, при цьому кінетична енергія електронів, внаслідок гальмування в речовині, перетворюється в теплоту, нагріваючи метал до високих температур.

Для переміщення променя до зварюваного виробу на шляху електронів поміщають магнітну відхиляльчу систему 5, що дозволяє направляти електронний промінь точно **вздовж зварювального стику**.

Для забезпечення безперешкодного руху електронів від катода до анода і далі до виробу, для теплової та хімічної ізоляції катода, а також для запобігання можливості дугового розряду між електродами в установці створюється глибокий вакуум не нижче  $1,3 \times 10^{-2}$  Па ( $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.), що забезпечується вакуумною системою установки.

Енергія електронів може досягати великих значень і залежить від різниці потенціалів поля, що їх розганяє; в даний час експлуатуються електронно-променеві установки з напругою прискорення в електронно-променевій гарматі до 200 кВ.

При зварюванні електронним пучком формується вузький і глибокий шов. Глибина проплавлення досягає 200...400 мм, а відношення глибини проплавлення до середньої ширини шва становить 20...30 (рис. 3.20).

Настільки глибоке проникнення електронів в метал пояснюється утворенням каналу в зварювальній ванні практично на всю її глибину. Основним чинником, що викликає утворення каналу в рідкому металі, є тиск віддачі парів при випаровуванні. У зв'язку з цим канал в зварювальній ванні часто називають пародинамічним.

Технологічні можливості і переваги електронно-променевого зварювання:

- при ЕПЗ можливе з'єднання за один прохід металів і сплавів товщиною в найбільш широкому серед інших методів зварювання діапазоні – від 0,1 до 400 мм;

- завдяки високій концентрації енергії в промені, мінімальному введенню тепла і високій швидкості охолодження, зона термічного впливу при ЕПЗ має істотно меншу протяжність, а зниження властивостей в ній відносно невелике. Особливе значення це має для аустенітної сталі, сплавів цирконію, молібдену та інших металів, схильних при нагріванні до значного зростання зерна та зниження корозійної стійкості;

- глибоке проплавлення металу при малій погонній енергії, що має місце при ЕПЗ, обумовлює значно більшу швидкість відведення тепла від зони зварювання, що забезпечує збільшення швидкості кристалізації малої за об'ємом зварювальної ванни з отриманням дрібнокристалічної будови металу шва, що за своїми властивостями мало відрізняється від основного металу;

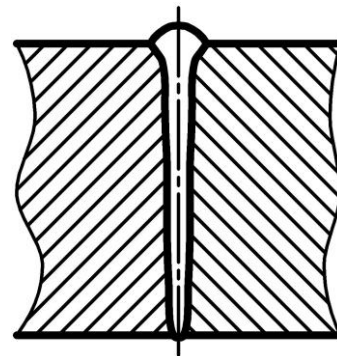


Рисунок 3.20 – Типова форма зварного шва при ЕПЗ

– введення значно меншої кількості тепла при ЕПЗ, особливо на імпульсному режимі, у порівнянні з дуговим зварюванням дає можливість у багато разів зменшити деформації виробів;

– висока концентрація енергії в малому поперечному перерізі променя і можливість перенесення енергії променем на значну відстань від катода дають можливість використовувати електронний промінь при зварюванні у вузькій щілині, коли методи дугового зварювання не можуть бути використані;

– при ЕПЗ робоча відстань "електронна гармата – виріб" можна значно змінювати без істотної зміни параметрів шва. Робоча відстань вибирається в межах 50...120 мм для низьковольтних гармат і 50...500 мм – для високовольтних. При цьому зміна робочої відстані в процесі зварювання на 1...5 мм не чинить істотного впливу на якість з'єднання;

– ефективний захист металу від взаємодії з газами в процесі зварювання, що здійснюється у глибокому вакуумі;

– відхилення електронів в магнітному полі здійснюється практично безінерційно, що дає можливість переміщати електронний промінь складними траєкторіями за програмою з використанням електронно-обчислювальної техніки;

– істотне (у 8...10 разів) зниження енергетичних витрат у порівнянні з іншими дуговими методами.

ЕПЗ є найбільш раціональним методом з'єднання:

– виробів з тугоплавких металів;

– виробів з термічно зміцнених металів, коли виникають труднощі, або небажана чи неможлива подальша термообробка;

– виробів після остаточної механічної обробки при необхідності забезпечення мінімальних зварювальних деформацій;

– конструкцій великих товщин відповідального призначення.

Недоліки методу ЕПЗ:

– складність і висока вартість обладнання;

– необхідність наявності вакуумних камер, що обмежує розміри зварюваних виробів;

– шкідливе рентгенівське випромінювання в процесі ЕПЗ;

– необхідність висококваліфікованого персоналу.

Схема і загальний вигляд установки для зварювання у глибокому вакуумі наведені на рис. 3.21. Такі установки використовуються для мікрозварювання і розмірної обробки в радіоелектроніці, приладобудуванні, точній механіці, а також для зварювання виробів малих, середніх і великих габаритів в ядерній енергетиці, авіабудуванні та ракетній техніці.



Рисунок 3.21 – Загальний вигляд установки для електронно-променевого зварювання

Вакуум космічного простору може бути використаний для ЕПЗ окремих деталей, вузлів при складанні космічних платформ і різних ремонтних роботах. Силами ІЕЗ ім. Є. О. Патона створена і пройшла успішні випробування на борту орбітальної станції "Мир" апаратура і набір спеціалізованих інструментів для виконання ручного електронно-променевого зварювання в космосі.

### 3.5 Зварювання лазером

Лазер, або оптичний квантовий генератор (ОКГ), створює потужний імпульс монохроматичного випромінювання за рахунок збудження атомів домішки в кристалі (рубін) або в газах.

Можна побудувати ОКГ на напівпровідниках і в цьому випадку, використовуючи електричне збудження замість оптичного, можна істотно підвищити ККД джерела енергії. Це нове джерело енергії високої концентрації відразу знайшло застосування в техніці зв'язку і в промисловості для обробки металів і інших матеріалів.

Сутність процесу отримання потужного променя світлових квантів полягає в тому, що атоми речовини можуть перебувати в стабільних і збуджених станах, і при переході зі збудженого стану в стабільний вони віддають енергію збудження у вигляді квантів променевої енергії.

Збудження атомів домішок може відбуватися

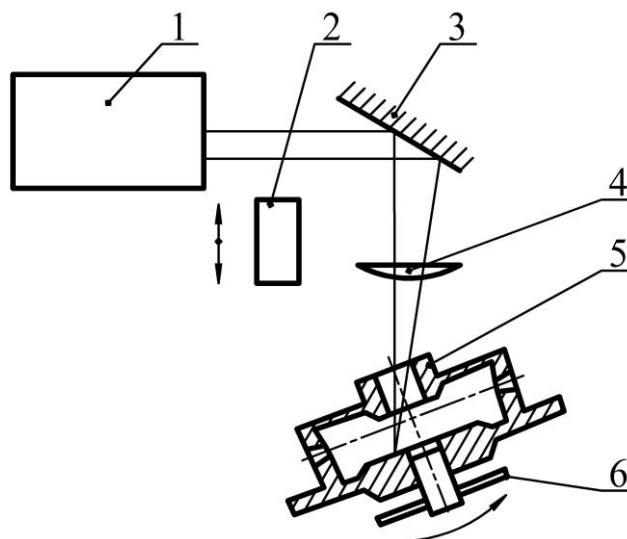


Рисунок 3.22 – Установка для зварювання лазером

1 – лазер; 2 – вимірювач потужності;  
3 – дзеркала; 4 – фокусувальна лінза;  
5 – деталь; 6 – пристрій для переміщення деталі

різними шляхами, але найчастіше це здійснюється в результаті поглинання променевої енергії (лампи **нагнітання**). Перехід із збудженого стану атома в стабільний може відбуватися не відразу, а по окремих ступенях. Якщо ці ступені близькі, то перехід відбувається без випро-мінювання кванта енергії, а за рахунок перерозподілу енергії електронів усередині атома. Деякі з таких проміжних ступенів-рівнів збудження мають підвищену стійкість.

Схема роботи оптичного квантового генератора або лазера може бути представлена так (рис. 3.22). Атоми деякого елемента збуджуються безперервним джерелом енергії – лампою накачування, і електрони, збуджуючись, переходять на верхній рівень енергії, але замість того, щоб відразу повертатися на нульвий рівень, вони переходять без випромінювання на метастабільний рівень, а потім, після накопичення на цьому рівні енергії електронів у значній кількості атомів домішки, вони всі відразу (індукційний період) переходять в початковий стан на нульовий рівень енергії, створюючи потужне випромінювання.

Для зварювання часто використовують установки з використанням монокристалів корунду  $Al_2O_3$ , в якому невелике число атомів алюм-інію Al замінено атомами хрому Cr, який служить випромінювачем. Такий кристал є штучним рубіном.

Кристал обмежений суворо паралельними гранями, з яких одна – непроникна для світла (закрита шаром металу), а інша – напівпроникна і пропускає випромінювання певної довжини хвилі. Енергія збудження від лампи подається перпендикулярно до осі кристала і осі випромінювання. Монохроматичні промені, що виходять, фокусуються оптичними системами. Потік квантів енергії (фотонів), спрямований на поверхню твердого тіла, трансформує свою енергію в теплову, і температура твердого тіла різко зростає, оскільки потік фотонів має дуже високу концентрацію енергії.

Зварювання лазером не вимагає вакууму і ведеться в імпульсному режимі, тому що постійний приплив енергії впливає на випромінювач (розігрів кристала рубіна). Режим зварювання регулюється такими параметрами: частотою, тривалістю імпульсу і ступенем розфокусування променя лазера до рівня щільності енергії, необхідної для зварювання. Коефіцієнт використання потужності в цьому виді зварювання дуже невисокий (~ 1...1,5%), але з'єднання цілого ряду виробів можна здійснити тільки таким чином (наприклад, неметалеві матеріали). Крім того, потік фотонів можна використовувати для прошивання отворів в найтвердіших матеріалах, різання металів і їх поверхневої обробки.

### **3.6 Контактне зварювання**

Контактне зварювання об'єднує велику групу способів зварювання, найбільш поширеними з яких є точкове, шовне і стикове.

**3.6.1 Точкове зварювання.** З'єднання внапуск є основним типом при точковому зварюванні. Зварювані деталі 1 (рис. 3.23) збирають внапуск і затискають зусиллям  $F$  між двома електродами 2, що підводять струм великої сили (до декількох десятків кА) до місця зварювання від джерела електричної енергії 3 невисокої напруги (зазвичай, 3...8 В).

Деталі нагріваються короткочасним (0,01...0,5 с) імпульсом струму до появи розплавленого металу в зоні контакту 4. Нагрівання супроводжується пластичною деформацією металу і утворенням ущільнювального пояса 5, що захищає рідкий метал від виплескування та від взаємодії з повітрям.

Теплота, яка використовується при зварюванні, залежить від опору між електродами і виділяється при проходженні струму безпосередньо в деталях, контактах між ними і контактах деталей з електродами. Опори самих електродів повинні бути незначні, тому що теплота, яка виділяється в них, не бере участі в процесі зварювання. Тому переріз електродів повинен бути відносно великим, а матеріал електродів – мати велику електро- і теплопровідність. Електроди для точкового зварювання виготовляють, головним чином, з міді та її сплавів.

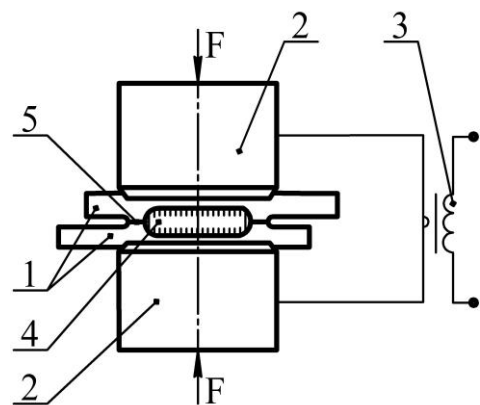


Рисунок 3.23 – Схема точкового зварювання

Для здійснення процесу точкового зварювання використовують спеціальні машини контактного зварювання (рис. 3.24), які в процесі роботи виконують дві основні функції – стискання й нагрівання деталей, що з'єднуються.

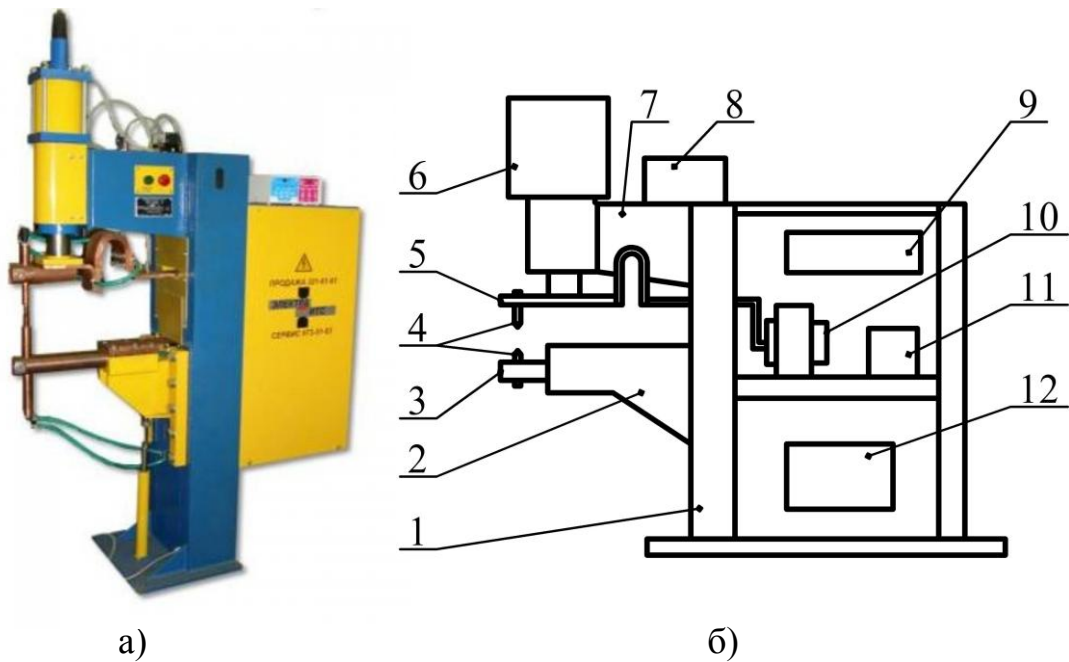


Рисунок 3.24 – Загальний вигляд машини точкового зварювання (а) і її основні вузли (б)

У конструкції будь-якої машини умовно можна виділити механічну та електричну частини. Основною частиною механічного пристрою машини для точкового зварювання (див. рис. 3.24, б) є корпус 1, на якому закріплені нижній кронштейн 2 з нижньою консоллю 3 та електродотримачем 4 з електродами і верхній кронштейн 7. Нижній кронштейн 2 звичайно виконують переставним або пересувним (плавно) по висоті, що дає можливість регулювати відстань між консолями залежно від форми і розміру деталей, що зварюються. На верхньому кронштейні встановлений пневмопривод, який створює зусилля стиснення електродів 6, з яким з'єднана верхня консоль 5 з електродотримачем 4. Для керування роботою пневмоприводу на машині встановлена відповідна пневматика 8. Привод для створення зусилля може бути також пневмогідролічним, гідравлічним та ін. Корпус, верхній і нижній кронштейни і консолі сприймають зусилля, що розвивається пневмоприводом, і тому повинні мати високу жорсткість. Електрична частина машини складається зі зварювального трансформатора 10 з перемикачем ступенів 11, контактора 12 і блока керування 9. Часто апаратура керування змонтована в окремій шафі. Контактор 12 підключає зварювальний трансформатор до електричної мережі живлення і відключає його.

До електричного пристрою належить також вторинний контур машини, який утворюють струмопідводи, що йдуть від трансформатора до зварюваних деталей. Струм від трансформатора через жорсткі і гнучкі шини підводиться до верхньої 5 і нижньої 3 консолей з електродотримачами 4. Консолі та електродотримачі з електродами беруть



участь у передачі зварювального струму і зусилля, тому одночасно є частинами електричного і механічного пристроїв машини. Всі частини вторинного контуру виготовляють з міді або мідних сплавів, що мають високу електропровідність. Більшість елементів вторинного контуру, зварювальний трансформатор і контактор мають внутрішнє водяне охолодження.

Електричне устаткування машини призначено для забезпечення необхідного циклу нагрівання металу в зоні зварювання.

**3.6.2 Шовне зварювання.** Шовне зварювання – спосіб, при якому деталі з'єднуються швом, що складається з окремих зварних точок (литих зон), що перекривають або не перекривають одна одну. При зварюванні з перекриттям точок шов буде герметичним (рис. 3.25, а), а при зварюванні без перекриття шов практично не відрізняється від ряду точок, отриманих при точковому зварюванні.

Особливість шовного зварювання полягає в тому, що воно виконується за допомогою двох (або одного) дискових електродів-роликів 1, що обертаються, між якими прокочуються стиснуті зі зусиллям деталі 2, що з'єднуються. До роликів підводиться зварювальний струм, який, як і при точковому зварюванні, нагріває і розплавляє метал у місці з'єднання.

Шовне зварювання, яке виконується при безперервному русі деталей і безперервному протіканні зварювального струму, називається безперервним шовним зварюванням. Таке зварювання рідко застосовують через сильний перегрів поверхні деталей, що контактують з роликами.

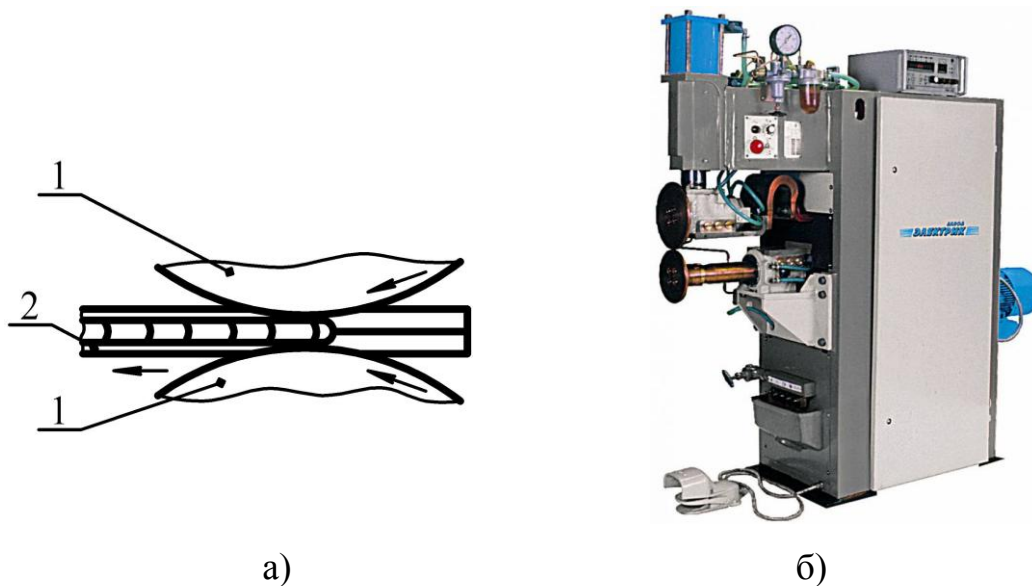


Рисунок 3.25 – Схема процесу (а) і машина шовного зварювання МШ-3208 (б)

Найпоширеніше переривчасте шовне зварювання, при якому деталі переміщуються безупинно, а струм вмикається і вимикається на певні проміжки часу і при кожному включенні (імпульсі) струму утворюється

одинична лита зона. Перекриття литих зон, необхідне для герметичності шва, досягається при певному співвідношенні швидкості обертання роликів і частоти імпульсів струму. Застосовують також крокове зварювання, при якому деталі переміщуються переривчасто (на крок), а зварювальний струм включається тільки під час їх зупинки, що поліпшує охолодження металу в контактах ролик – деталь порівняно з безперервним рухом деталей, що зварюються. Шовне зварювання в більшості випадків проводиться з зовнішнім водяним охолодженням, що також знижує перегрів зовнішніх шарів металу.

Різноманітні види шовного зварювання, які зустрічаються на практиці, в основному розрізняються способом підведення зварювального струму (односторонній або двосторонній) і розташуванням роликів щодо деталей, що зварюються (рис. 3.26).

Двостороннє шовне зварювання аналогічне двосторонньому точковому (див. рис. 3.26, а-е). Замість одного з роликів може бути застосована оправка, яка щільно контактує з внутрішньої деталлю (див. рис. 3.26, г). Для зварювання нерухомих деталей кільцевим швом на площині використовується верхній ролик, який обертається навколо своєї осі, а також навколо осі шва (див. рис. 3.26, д). Нижня деталь контактує з електродом, що має форму чашки.

Іноді зварювані деталі встановлюють на мідну шину, при цьому підведення струму може бути двостороннім або одностороннім. При зварюванні на шині можливі варіанти рухомої (див. рис. 3.26, ж) і нерухомої шин, коли два ролика, до яких підведений струм, обертаються навколо своїх осей і котяться по деталях (див. рис. 3.26, к). При односторонньому шовному зварюванні, як і при точковому, спостерігається шунтування струму в деталь, що контактує з роликами.

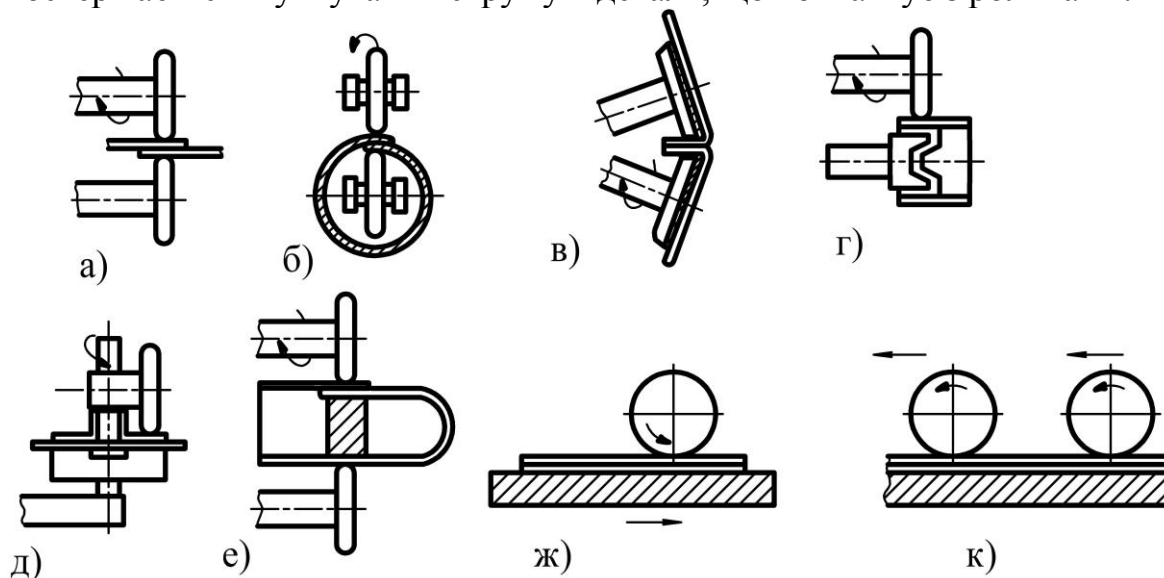


Рисунок 3.26 – Способи шовного зварювання

**3.6.3 Рельєфне зварювання.** Рельєфне зварювання – спосіб, аналогічний точковому зварюванню, при якому деталі, зазвичай, з'єднуються одночасно в декількох точках. Положення цих точок визначається виступами – рельєфами, утвореними (штампуванням, обробкою різанням) на одній або обох деталях. При рельєфному зварюванні контакт між деталями визначається формою їх поверхні в місці з'єднання, а не формою робочої частини електродів, як при точковому зварюванні.

Процеси утворення з'єднання при рельєфному і точковому зварюванні мають багато спільного. Дві деталі 2 з листа, на одній з яких виштампувані рельєфи сферичної форми, затискаються між електродами 1 з великою контактною поверхнею (плитами), що підводять струм до з'єднувальних деталей (рис. 3.27, а).

Для забезпечення однакових умов нагрівання кожного рельєфу необхідно, щоб прикладене зусилля і струм (рис. 3.27, б) рівномірно розподілялися між всіма точками контакту деталей.

Розглянемо процес утворення з'єднання. При стисканні деталей електродами через малу площу контакту рельєфу з плоскою деталлю (рис. 3.27, а) контактний опір деталь–деталь при рельєфному зварюванні більший, ніж при точковому зварюванні того ж металу. Після включення зварювального струму метал рельєфу інтенсивно нагрівається і його вершина деформується; контактний опір швидко зменшується і теплота виділяється в основному за рахунок власного опору металу рельєфу. Нагріті рельєфи не повинні сильно деформуватися до утворення зони розплавлення в контакті деталей. Якщо це відбудеться, то деталі дотикнуться по всій внутрішній поверхні, струм піде, минаючи рельєфи, через холодні ділянки металу, що мають малий опір, подальше нагрівання рельєфу різко зменшиться і з'єднання буде неміцним.

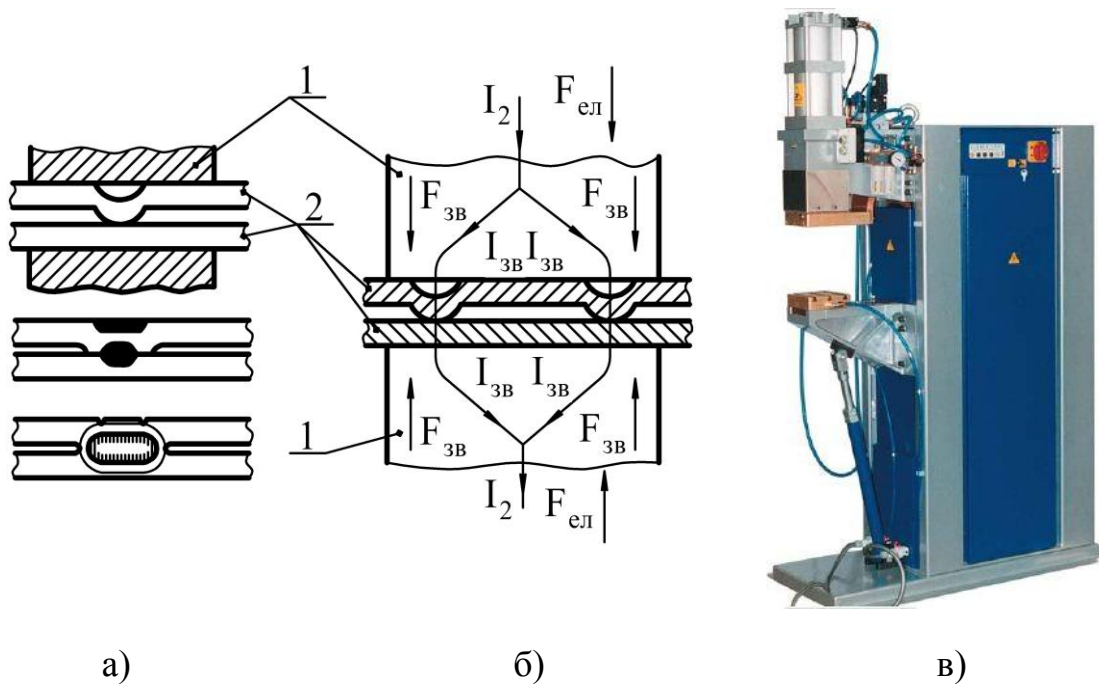


Рисунок 3.27 – Рельєфне зварювання: а) – послідовність утворення з'єднання; б) – розподіл струмів і зусиль; в) – загальний вигляд машини

При правильно вибраному режимі зварювання в результаті теплового розширення металу в зоні з'єднання між деталями утворюється деякий зазор, що перешкоджає їх випадковому зіткненню і появі додаткових (крім рельєфу) шляхів проходження струму через деталі. Під час протікання струму зона розплавлення збільшується в об'ємі, метал рельєфу інтенсивно деформується і виходить на зовнішню поверхню деталі (залишається лише невелика кільцева канавка). Коли зона розплавлення досягне необхідних розмірів, зварювальний струм вимикають, метал охолоджується і кристалізується, при цьому утворюється лите ядро. Як і при точковому зварюванні, лите ядро оточує щільний поясок металу, по якому з'єднання відбулося без розплавлення.

**3.6.4 Стикове зварювання.** Стикове зварювання – спосіб, при якому деталі з'єднуються (зварюються) по всій площині їх дотикання під впливом нагрівання і зусилля стиску. Деталі однакового або близького за розмірами перерізу закріплюють в електродах-губках машини, до яких підводять струм (рис. 3.28). При нагріванні та пластичному деформуванні металу в зоні стику частина елементарних частинок – зерен металу руйнується з одночасним утворенням нових (загальних для обох деталей) зерен.

Крім того, обов'язковою умовою отримання надійного з'єднання є видалення плівок окислів на торцях деталей або її руйнування.

Для зварювання використовується теплота, що виділяється в контактї між торцями деталей, які з'єднуються (за рахунок контактного опору) і в самих деталях, які мають власний опір. При стиковому зварюванні перехідні опори губка – деталь дуже малі і практично не чинять впливу на загальну кількість теплоти. У стиковому зварюванні розрізняють зварювання опором і оплавленням.

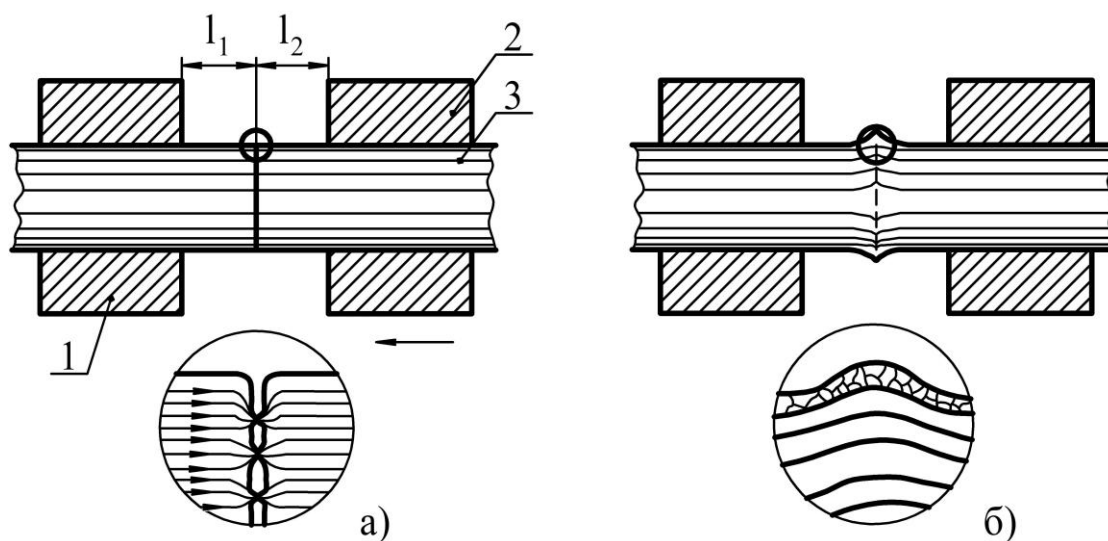


Рисунок 3.28 - Схема процесу стикового зварювання опором

Зварювання опором – спосіб стикового зварювання, при якому струм включається після стискання деталей 3 зусиллям, яке передається губками машини 1, 2 (див. рис. 3.28, а). На початку процесу деталі контактують тільки по окремих виступах, що і створює контактний опір. Після включення струму, завдяки його високій щільності на виступах метал зони контакту деталей інтенсивно нагрівається і під дією зусилля виступи зминаються. Контактний опір швидко зменшується і далі нагрів відбувається за рахунок власного опору деталей, який збільшується з підвищенням температури. Коли температура в контактї стане близькою до температури плавлення металу, деталі під дією зусилля зварюються в результаті рекристалізації з утворенням плавного потовщення – посилення (див. рис. 3.28, б).

Зварювання оплавленням – спосіб стикового зварювання, при якому торці деталей, що з'єднуються, нагрівають струмом до розплавлення металу при їх зближенні під дією невеликого зусилля і потім швидко стискають деталі осадженням. При зварюванні оплавленням затиснуті в губках деталі, до яких підведена напруга, поволі переміщують назустріч одна одній з постійною або зростаючою швидкістю до зіткнення торців. Внаслідок невеликої початкової площі контакту деталей у місці їх зіткнення створюється висока щільність струму, метал контакту миттєво нагрівається до температури кипіння і випаровується, що супроводжується

невеликим вибухом одиничних контактів-перемичок. В результаті вибуху частина металу перемичок викидається зі стику у вигляді іскор і бризок.

Під час зближення деталей безперервно виникають і руйнуються контакти-перемички з викидом частинок і парів металу та утворенням на торцях рівномірного розплавленого шару металу (рис. 3.29, а). При цьому процесі, названому оплавленням, зменшується установча довжина деталей.

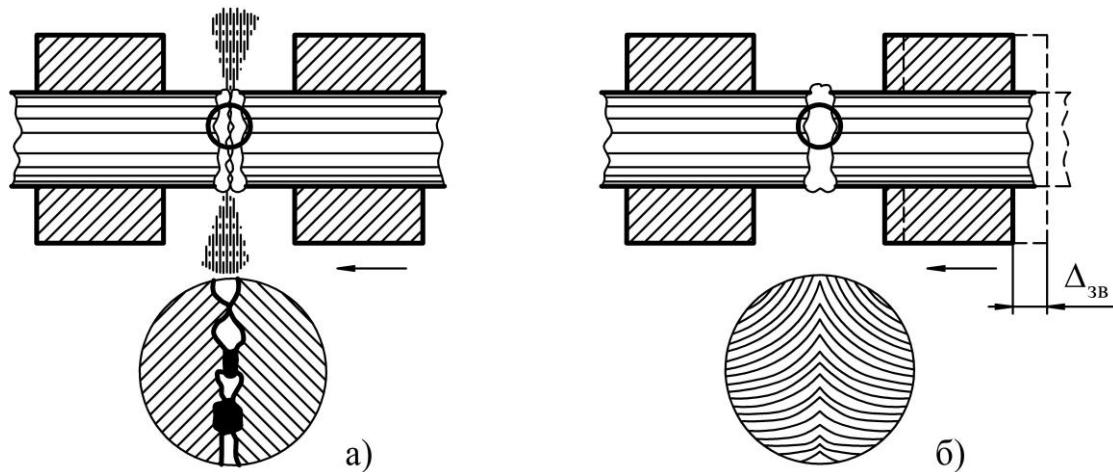


Рисунок 3.29 – Схема процесу стикового зварювання оплавленням

При зварюванні оплавленням контактний опір до кінця процесу оплавлення зменшується внаслідок збільшення числа перемичок, а власний опір деталей підвищується з нагріванням металу, тому загальний опір металу між губками змінюється незначно. Під час оплавлення контактний опір значно більше опору деталей, тому нагрів в основному йде за рахунок теплоти, що виділяється в металі торців деталей. Віддалені від торців шари металу нагріваються внаслідок теплопровідності від оплавлених поверхонь. Після певного укорочення деталей оплавленням їх швидко стискають з наростанням зусилля – осадкою.

При осадженні розплавлений і перегрітий метал з оксидами видавлюється зі стику деталей, утворюючи зварне з'єднання, а метал навколостикової зони деформується з характерним викривленням волокон, утворюючи посилення і грат у вигляді окисленого і перегорівшого металу (див. рис. 3.29, б). У процесі оплавлення і осадження істотно зменшується початкова довжина на величину припуску на зварювання  $\Delta_{зв}$ .

Для з'єднання деталей великих перерізів, з метою зниження електричної і механічної потужності обладнання, використовують так зване зварювання оплавленням з підігріванням, при якому кінці деталей спочатку нагрівають аналогічно зварюванню опором. Деталі при підігріванні періодично стискають невеликим зусиллям, нагрівають

струмом, який потім вимикають. Після підігрівання до певної температури торці оплавляються і деталі осаджуються.

### 3.7 Зварювання струмами високої частоти

При зварюванні струмами високої частоти (СВЧ) виріб перед зварювальним вузлом формується у вигляді заготовки з V-подібною щілиною між зварюваними крайками. До крайок індуктором (рис. 3.30, а) або за допомогою контактної ролика, що обертається, (рис. 3.30, б) підводиться струм високої частоти таким чином, щоб він проходив від однієї крайки до іншої через місце їх сходження.

Внаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості, який у міру зближення крайок посилюється, досягається висока концентрація струму в місці сходження крайків і відбувається їх розігрів. Нагріті крайки обтискаються валками і зварюються. Якість зварного з'єднання і витрата електроенергії пов'язані з особливостями протікання струму високої частоти по провідниках.

При протіканні струму по провіднику проявляється поверхневий ефект, що полягає в нерівномірному розподілі змінного струму по перерізу провідника. У зовнішній поверхні провідника спостерігається найбільша щільність струму. При високій частоті струм проходить лише по тонкому поверхневому шару провідника.

При протіканні змінного струму в системі провідників, розташованих таким чином, що кожен з них знаходиться не тільки у власному змінному магнітному полі, але і в полі інших провідників, виявляється ефект близькості: струм по периметру провідників протікає таким чином, що його щільність в ближніх точках провідників максимальна, а в найбільш віддалених – мінімальна. Чим менше відстань між осями провідників і чим більше радіус перерізу провідника, тим сильніше виявляється ефект близькості.

Якщо помістити провідне тіло в змінне магнітне поле соленоїда або розташувати його поруч з індуктором, під'єднаним в ланцюг змінного струму, то в цьому тілі індуються замкнуті в ньому вихрові струми

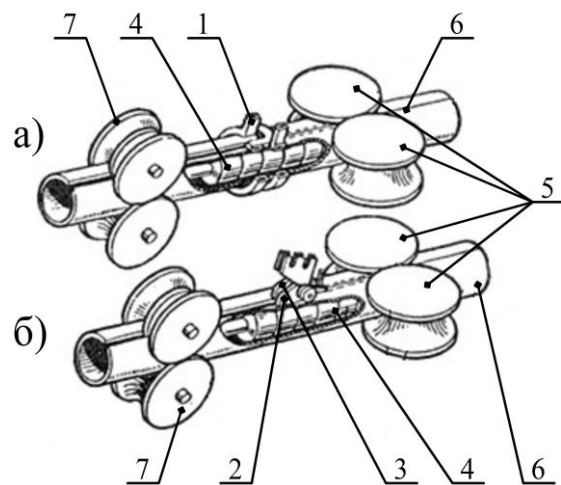


Рисунок 3.30 – Схема високочастотного зварювання труб з індукційним (а) і контактним (б) способами підведення струму: 1 – індуктор; 2 і 3 – контакти, 4 – феритовий стрижень; 5 – стискні ролики; 6 – труба; 7 – напрямний ролик

зворотного напрямку (відносно струму в індукторі). У цьому випадку також проявляються ефекти, що сприяють зосередженню струму у поверхні провідника і в зонах, близьких до індуктора.

Тепловиділення в провіднику пропорційно квадрату щільності струму, і в зварювальних процесах, що швидко протікають, коли тепловіддача не чинить вирішального впливу на температурне поле, ступінь нерівномірності нагрівання може бути значно вищим, ніж нерівномірності розподілення струму. Тому високочастотне нагрівання неефективне для зварювання деталей великого діаметра і товстостінних труб.

Процеси високочастотного зварювання можна розділити на три групи: зварювання тиском з оплавленням, зварювання тиском без оплавлення і зварювання плавленням без тиску. Зварювання тиском з оплавленням (рис. 3.31) здійснюється за попереднім нагріванням та при місцевому расплавленні зварюваних поверхонь. Для отримання якісного зварного з'єднання необхідно, щоб весь оплавлений метал, наявний у місці сходження зварюваних елементів, був витіснений під час осадження.

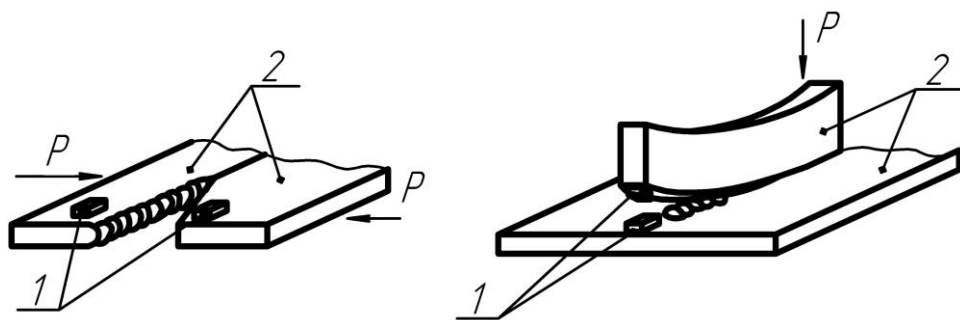


Рисунок 3.31 – Приклади схем виконання високочастотного зварювання тиском з оплавленням: 1 – місця підведення струму; 2 – зварювані елементи

Цей процес реалізується в тому випадку, якщо швидкість осадження буде достатньою і розплавлений метал не втратить властивості рідкотекучості. Зварне з'єднання утворюється між поверхнями, що знаходяться у твердому стані.

Швидкість нагрівання досягає  $10^4$  °C/c; осадження – 0,15...1,5 мм; швидкість осадження – 2000 мм/с. Цей спосіб знайшов найбільше розповсюдження при виробництві зварних конструкцій з чорних і кольорових металів.

Зварювання тиском без оплавлення здійснюється з попереднім нагріванням поверхонь, що зварюються, до температури нижче точки плавлення зварюваного металу. Швидкість нагрівання не перевищує 400 °C/c; осадження – 2,5...6,0 мм; швидкість осадження - 20 мм/с. Процес зварювання за відсутності відновлювального середовища може забезпечувати задовільну якість з'єднання тільки у вузькому інтервалі



температур і при деформаціях, достатніх для руйнування оксидних плівок на поверхнях, що зварюються.

Зварювання плавленням (рис. 3.32) без тиску здійснюється при нагріванні зварюваних елементів до оплавлення. Вироби щільно прилягають один до одного відбортованими крайками, які розігріваються і плавляться за допомогою індуктора, утворюючи зварний шов без докладання тиску.

Швидкість нагрівання 250...3000 °C/c, частота струму джерела живлення 70 і 440 кГц. Цей процес доцільно застосовувати для деталей з товщиною стінки 0,3...1,5 мм з максимальною довжиною зварного шва до 500 мм. Високочастотне зварювання застосовується для виготовлення спіральшовних труб (рис. 3.33, а), приварювання ребер до труб (рис. 3.33, б, в), зварювання біметалевих смуг тощо.

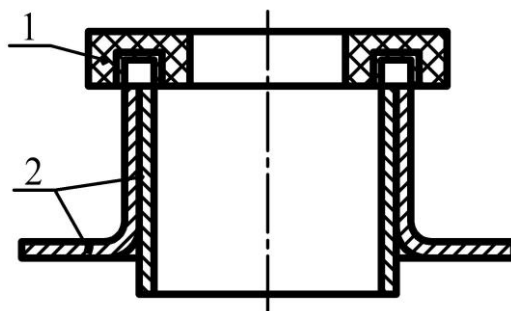


Рисунок 3.32 – Високочастотне зварювання плавленням без тиску: 1 – індуктор; 2 – заготовки, що зварюються

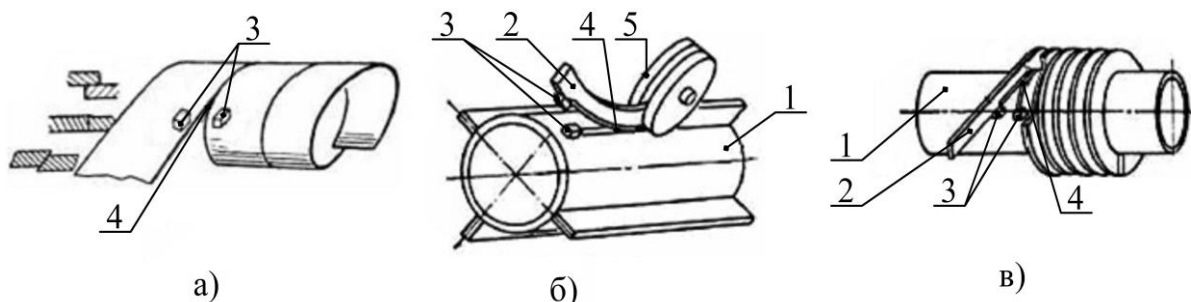


Рисунок 3.33 – Схеми зварювання спіральшовних труб (а) і приварювання ребер (б, в): 1 – труба; 2 – ребро; 3 – контакти, 4 – зона формування шва, 5 – ролик

### 3.8 Холодне зварювання

Холодне зварювання – спосіб з'єднання деталей при кімнатній (і навіть від'ємній) температурі без нагрівання зовнішніми джерелами. Зварювання здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, що викликають одночасну спрямовану деформацію попередньо очищених поверхонь з наростанням (до певної межі) внутрішніх напружень, при яких утворюється монолітне високоміцне з'єднання.

Холодним зварюванням можна з'єднувати алюміній, мідь, свинець, цинк, нікель, срібло, кадмій, залізо тощо. Особливо велика перевага холодного зварювання перед іншими способами зварювання при з'єднанні різнорідних металів, чутливих до нагрівання, або таких, які утворюють інтерметаліди.

За природою холодне зварювання – складний фізико-хімічний процес,

що протікає тільки в умовах пластичної деформації. Без пластичної деформації в звичайних атмосферних умовах, навіть прикладаючи будь-які зусилля до заготовок, практично неможливо отримати повноцінне монолітне з'єднання.

Роль деформації у холодному зварюванні полягає в граничному зменшенні товщини або видаленні шару оксидів, у зближенні зварюваних поверхонь до відстані, порівнянної з параметром кристалічної ґратки, а також у підвищенні енергетичного рівня поверхневих атомів, що забезпечує можливість утворення хімічних зв'язків.

Якість зварного з'єднання визначається вихідним фізико-хімічним станом контактних поверхонь, тиском (зусиллям стиску) і ступенем деформації при зварюванні. Вона також залежить від схеми деформації і способу прикладання тиску (статичного, вібраційного).

Залежно від схеми пластичного деформування заготовок зварювання може бути точковим, шовним та стиковим.

Точкове зварювання – найбільш простий і поширений спосіб холодного зварювання. Його застосування раціонально для з'єднання алюмінію, алюмінію з міддю, армування алюмінію міддю. Воно дозволяє замінити трудомістке клепання і контактне точкове зварювання.

При точковому зварюванні (рис. 3.34, а) зачищені деталі 1 встановлюються внапуск між пуансонами 2, що мають робочу частину 3 та опорну поверхню 4. При вдавлюванні пуансонів зусиллям  $P$  відбувається деформація заготовок і формування зварного з'єднання. Опорна частина пуансонів створює додатковий напружений стан в кінцевий момент зварювання, обмежує глибину занурення пуансонів в метал і зменшує жолоблення виробу.

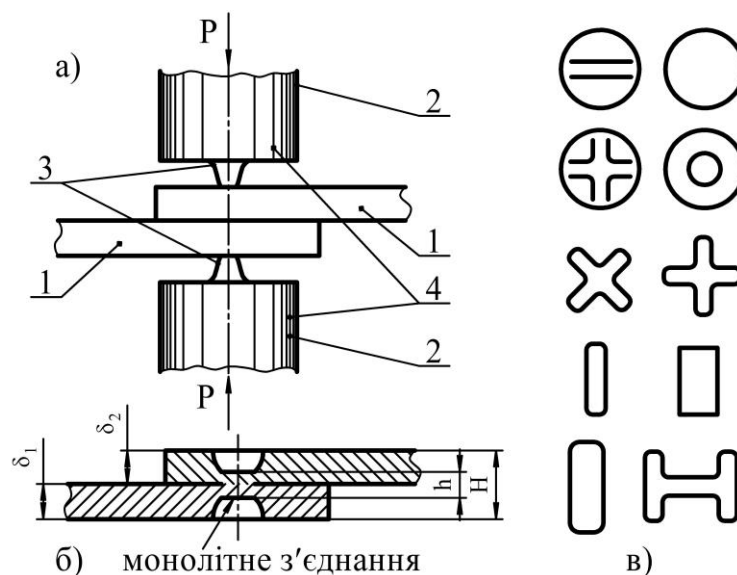


Рисунок 3.34 – Схема холодного точкового зварювання (а), геометрія зварного з'єднання (б) і форми пуансонів (в)

Міцність точкового зварювання може бути підвищена на 10...20% при зварюванні за схемою (рис. 3.35) з використанням кондукторів, які надійно фіксують зварювані заготовки. Холодне шовне (роликове) зварювання характеризується безперервністю одержання монолітного з'єднання. За механічною схемою це зварювання аналогічне холодному зварюванню прямокутними пуансонами (рис. 3.36).

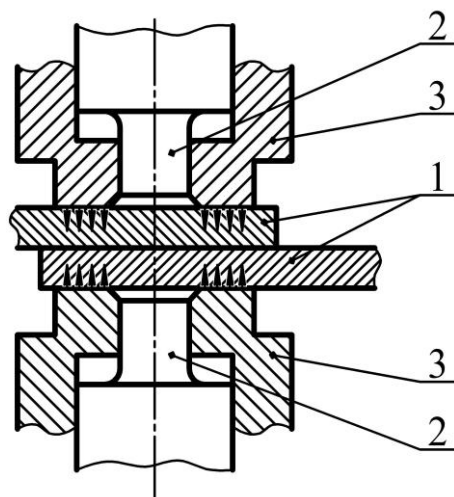


Рисунок 3.35 – Схема холодного точкового зварювання з попереднім обтисненням

Зібрані заготовки 1 встановлюються між роликами 2 і стискаються ними до повного занурення робочих виступів в метал. Потім ролики починають обертати. Переміщуючи виріб і послідовно проникаючи робочими виступами в метал, вони викликають його інтенсивну деформацію, в результаті якої утворюється безперервне монолітне з'єднання – шов.

Шовне зварювання буває двостороннє, одностороннє і несиметричне. Двостороннє зварювання виконується однаковими роликами. При односторонньому зварюванні один ролик має виступ з висотою, що дорівнює сумі виступів при двосторонньому зварюванні, а другий є опорним, без робочого виступу. При несиметричному зварюванні ролики мають різні за розмірами, а іноді і за формою робочі виступи.

Одностороннє роликове зварювання частіше застосовується при зварюванні різнорідних металів з великою різницею за твердістю. Робоча частина ролика вдавлюється в більш твердий метал. Таке зварювання за інших рівних умов забезпечує більш міцні шви і при зварюванні однорідних металів.

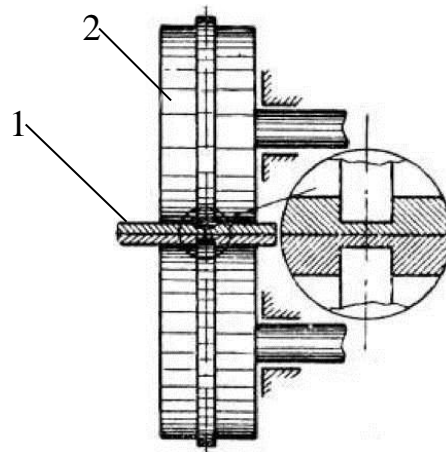


Рисунок 3.36 – Схема холодного шовного зварювання

Під час роликового зварювання метал вільно тече вздовж осі шва. Це ускладнює створення достатнього напруженого стану металу в зоні з'єднання. Тому для досягнення провару потрібна більш велика пластична деформація (на 2...6%), ніж при точковому зварюванні. Напружений стан в зоні роликового зварювання можна підвищити, збільшуючи діаметр роликів. Роликове зварювання алюмінію завтовшки 1,0 мм при зварюваності 27% виконується зі

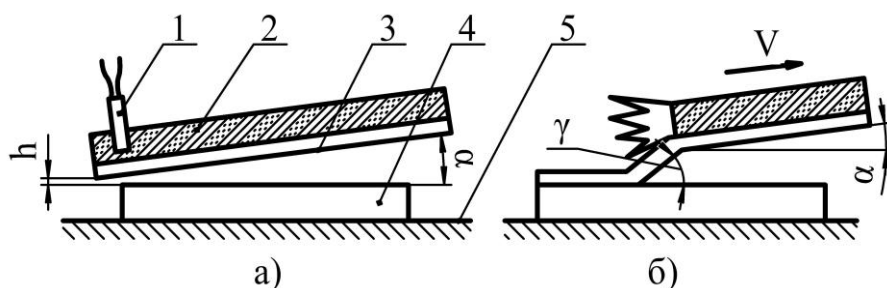
швидкістю до 8...12 м/хв.

Процес холодного стикового зварювання суто механічний, він зручний для автоматизації. У ІЕЗ ім. Є. О. Патона розроблений напівавтомат, який використовується в умовах потокового виробництва. У цій установці оператор лише укладає деталі у затискні пристосування, а операції затискання, відрізання рештків, осадження, перехоплювання у разі повторної операції, друге осадження, видалення ґрата, розкриття затискачів і виштовхування проводиться автоматично. Напівавтомат дозволяє зварювати алюмінієвий дріт перерізом до 90 мм<sup>2</sup> і мідний – перерізом до 30 мм<sup>2</sup>.

### 3.9 Зварювання вибухом

Зварювання вибухом – порівняно новий перспективний технологічний процес, що дозволяє отримувати біметалеві заготовки та вироби практично необмежених розмірів з різноманітних металів і сплавів, у тому числі тих, зварювання яких іншими способами ускладнено.

Зварювання вибухом – процес отримання з'єднання під дією енергії, що виділяється під час вибуху заряду вибухової речовини (ВР). Принципова схема зварювання вибухом наведена на рис. 3.37. Нерухому пластину (основу) 4 і металеву пластину (облицювання) 3 розташовують під кутом  $\alpha = 2...160^\circ$  на заданій відстані  $h = 2...3$  мм від вершини кута. На металеву пластину укладають заряд 2 ВР. У вершині кута встановлюють детонатор 1. Зварювання проводиться на опорі 5.



в)

Рисунок 3.37 – Кутова схема зварювання вибухом до початку (а) і в стадії вибуху (б), а також загальний вигляд камери для зварювання (в)

Після ініціювання вибуху детонація поширюється по заряду ВР зі швидкістю декількох тисяч м/с. Під дією високого тиску від вибуху металева пластина набуває швидкість  $V_n$  порядку декількох сотень метрів на секунду і вдаряється в нерухому пластину під кутом  $\gamma$ . У місці зіткнення виникає ефект кумуляції: із зони зіткнення викидається з дуже високою швидкістю кумулятивний струмінь, що складається з металу основи і облицювання. Цей струмінь забезпечує очищення зварюваних поверхонь в момент, що безпосередньо передує їх з'єднанню. Зі зварюваних поверхонь при звичайних режимах зварювання видаляється шар металу сумарною товщиною 1...15 мкм.

Зіткнення металу пластини і основи супроводжується пластичною деформацією, що викликає місцевий нагрів поверхневих шарів металу. У результаті деформації і нагрівання відбувається збільшення фактичного контакту, активація зварюваних поверхонь та утворення з'єднання.

Дослідження пластичної деформації в зоні зіткнення за спотворенням координатної сітки показало, що міцне з'єднання утворюється тільки там, де співудар супроводжується взаємним зсувом поверхневих шарів металу пластини та основи. В місці, де взаємний зсув був відсутній, і зокрема в зоні ініціювання вибуху, міцного з'єднання не було отримано. Очевидно, що "лобовий" удар металу пластини в основу без тангенціальної складової швидкості і зсувної деформації в зоні з'єднання не приведе до зварювання.

Поверхні перед зварюванням повинні бути чистими (особливо від органічних забруднень), оскільки ні дія кумулятивного струменя, ні вакуумна зсувна деформація під час співудару повністю не унеможливають шкідливий вплив таких забруднень.

Зварювання вибухом дає можливість зварювати практично будь-які метали. Але подальше нагрівання зварених заготовок може викликати інтенсивну дифузію в зоні з'єднання та утворення інтерметалідних фаз. Утворення інтерметалідів призводить до зниження міцності з'єднання, що при досить високих температурах може знизитися практично до нуля.

Для запобігання цих явищ зварювання вибухом проводять через проміжні прошарки з металів, що не утворюють хімічних сполук зі зварюваними матеріалами. Наприклад, при зварюванні титану зі сталлю використовують як проміжний матеріал ніобій, ванадій або тантал.

У сучасних процесах металообробки вибухом застосовують заряди ВР масою від декількох грамів до сотень кілограмів. Велика частина енергії, що виділяється при вибуху, випромінюється в навколишнє середовище у вигляді ударних хвиль, сейсмічних збурень, розльоту осколків і т. д. Повітряна ударна хвиля – найбільш небезпечний уражальний фактор вибуху. Тому зварювання вибухом виконують на полігонах (відкритих та підземних), віддалених на значні відстані від житлових і промислових об'єктів, і у вибухових камерах.

### 3.10 Магнітно-імпульсне зварювання

Магнітно-імпульсна обробка металів ґрунтується на використанні сил електромеханічної взаємодії між вихровими струмами, наведеними в стінках оброблюваної деталі при перетині їх силовими магнітними лініями імпульсного магнітного поля, і самим магнітним потоком. При цьому електрична енергія безпосередньо перетворюється в механічну, і імпульс тиску магнітного поля діє

безпосередньо на заготовку без участі будь-якого передавального середовища. В установку для магнітно-імпульсного зварювання (рис. 3.38) входять: зарядний пристрій 1, що складається з високовольтного трансформатора і випрямляча; комутувальний пристрій 3, який вмикається при подачі імпульсу підпалювання на допоміжний електрод, що викликає

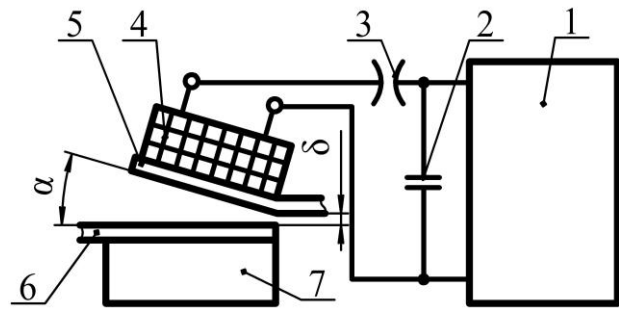


Рисунок 3.38 – Магнітно-імпульсне зварювання

розряд батареї високовольтних конденсаторів 2 на індуктор 4. Деталі 5 і 6, що зварюються, встановлюють внапуск під кутом один до одного з зазором між ними. Індуктор 4 встановлюють на поверхні, яка протилежна до зварюваній. Для запобігання переміщення при зварюванні деталь 6 жорстко закріплюється в опорі 7. Закріплення деталі 5 повинно забезпечити переміщення її зварюваного кінця до деталі 6.

При розряді батареї конденсаторів в зазорі між індуктором і заготовкою виникає сильне магнітне поле, яке індукує в заготовці струм. Взаємодія струму індуктора з індукованим струмом у заготовці веде до виникнення сил відштовхування між індуктором 4 і деталлю 5, внаслідок чого деталь 5 з великою швидкістю переміщується від індуктора в напрямку нерухомої деталі 6. Під час зіткнення в зоні контакту розвиваються високі тиски і утворюється зварне з'єднання.

Дія імпульсного магнітного поля на металевий елемент залежить від довжини і числа витків індуктора, напруги розряду, ємності батареї конденсаторів, енергії розряду, індуктивності та активного опору розрядного контуру, площі внутрішньої поверхні індуктора в поперечному перерізі та ін.

Доцільною сферою застосування цього способу є отримання різноманітних з'єднань трубчастих деталей між собою та з іншими деталями, а також плоских деталей по зовнішньому і внутрішньому контуру. Магнітно-імпульсним способом можна зварювати практично будь-які матеріали в однорідному і неоднорідному поєднаннях. Діапазон товщин металу деталей становить 0,5...2,5 мм.

### 3.11 Зварювання тертям

Процес тертя завжди супроводжується перетворенням частини механічної енергії в теплову. При взаємному сухому терті двох металевих деталей температура в контактній парі тертя зростає пропорційно швидкості відносного переміщення деталей і тиску, з яким створюється контакт. У техніці виділення тепла при терті розглядається як шкідливе явище і з ним, за винятком рідкісних випадків, ведеться боротьба. Одним із прикладів корисного використання тепла, що виділяється при терті, є процес отримання нероз'ємного з'єднання, названий зварюванням тертям.

Зварювання тертям є різновидом зварювання тиском, при якому механічна енергія, що підводиться до однієї зі зварюваних деталей, перетворюється на теплову, при цьому генерування тепла відбувається безпосередньо в місці майбутнього з'єднання.

Тепло може виділятися при обертанні однієї деталі щодо іншої (рис. 3.39, а), вставки між деталями (рис. 3.39, б, в), при зворотно-поступальному русі деталей у площині стику з відносно малими амплітудами  $A$  і при звуковій частоті (рис. 3.39, г) і т. д. Деталі при цьому притискаються постійним або зростаючим в часі тиском  $P$ . Зварювання завершується осаджуванням і швидким припиненням обертання.

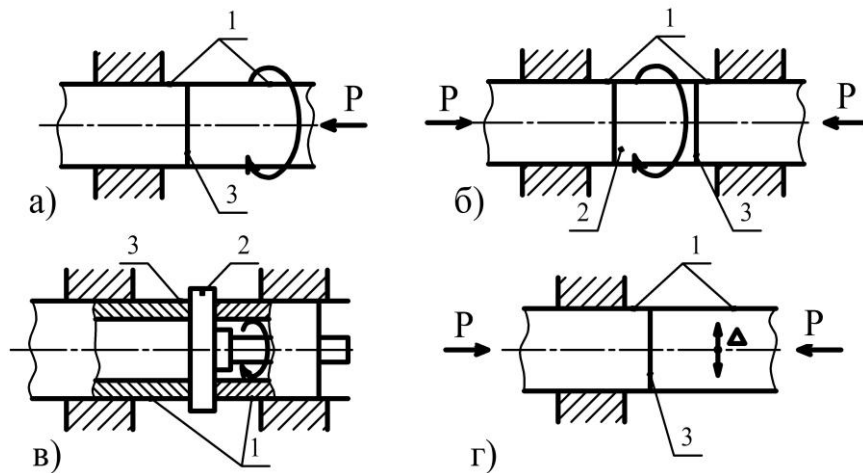


Рисунок 3.39 - Схеми процесу зварювання тертям: 1 – деталі, що зварюються; 2 - вставка; 3 - зона зварювання

У зоні стику при зварюванні протікають такі процеси. У міру збільшення частоти обертання зварюваних заготовок при наявності стискування відбувається притирання контактних поверхонь і руйнування жирових плівок, присутніх на них у вихідному стані. Граничне тертя поступає місцем сухому. У контакт вступають окремі мікрорівні, відбувається їх деформація та утворення ювенільних ділянок з ненасиченими зв'язками поверхневих атомів, між якими миттєво формуються металеві зв'язки і негайно руйнуються внаслідок відносного

руху поверхонь.

Цей процес відбувається безперервно і супроводжується збільшенням фактичної площі контакту і швидким зростанням температури в стику. З ростом температури знижується опір металу деформації і тертя поширюється на всю поверхню контакту. У зоні стику з'являється тонкий шар пластифікованого металу, що виконує роль ніби мастильного матеріалу. Під дією стискального зусилля відбувається витіснення металу зі стику і зближення зварюваних поверхонь (осаджування). Осаджування супроводжується утворенням металевих зв'язків по всій поверхні.

Особливістю зварювання тертям є обмеження застосування цього способу з'єднання формою і розмірами перерізу зварюваних деталей. При обертальному русі зварювання тертям дозволяє отримувати хороші результати лише в тих випадках, коли одна з деталей, що підлягають зварюванню, є тілом обертання (стрижень, труба), вісь якого збігається з віссю обертання, а інша деталь має плоску поверхню. Можливі такі види з'єднань, виконуваних за допомогою зварювання тертям (рис. 3.40): стрижні встик, труби встик, стрижень встик з трубою, Т-подібне з'єднання стрижня або труби та деталі з плоскою поверхнею. Можливості застосування зварювання тертям обмежуються не лише формою, але й розмірами перерізу зварюваних деталей в місці їх з'єднання. Так, зварювати стрижні діаметром більше 200 мм недоцільно, тому що для реалізації цього процесу потрібні були б машини з двигунами потужністю близько 500 кВт з осьовим зусиллям понад  $3 \cdot 10^6$  Н. Спорудження такої машини та її експлуатація були б настільки дорогими, що не окупилися б вигоди, які може дати зварювання тертям.

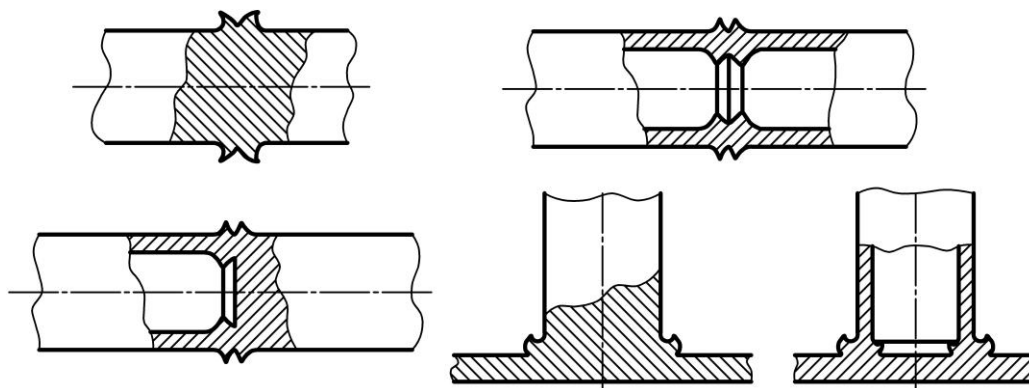


Рисунок 3.40 – Типи з'єднань, виконаних зварюванням тертям

Неможливо зварити навіть у лабораторних умовах і стрижні діаметром менше 3,5 мм, для яких потрібна установка зі швидкістю обертання шпинделя близько  $200 \text{ s}^{-1}$  і складним пристроєм для здійснення миттєвого його гальмування.

Розрахунки та досвід практичного застосування зварювання тертям показують, що його поки доцільно застосовувати для зварювання деталей



діаметром від 6 до 100 мм.

Найбільш ефективним є застосування зварювання тертям у сфері виготовлення різального інструменту, при виробництві складових зварювально-кованих, зварювально-литих або зварювально-штампованих деталей. Воно виявляється незамінним при з'єднанні важкозварюваних або зовсім не зварюваних іншими способами різнорідних матеріалів, наприклад, сталі з алюмінієм, аустенітних сталей з перлітними тощо.

Ефективне застосування зварювання тертям і для з'єднання пластмасових заготовок.

Машини для зварювання тертям зазвичай мають такі основні вузли (рис. 3.41): привод обертання шпинделя 1 з ремінною передачею 2; фрикційна муфта 3 для зчеплення шпинделя з приводним пристроєм; гальмо 4 для гальмування шпинделя; два затискачі для кріплення зварюваних заготовок 7; передня бабка 5 зі шпинделем, що несе на собі затискач 6, який обертається; задня бабка 8 з нерухомих затискачем; пневматичні або гідравлічні циліндри 9, які забезпечують створення необхідного робочого (осьового) зусилля машини; пневматична, пневмогідравлічна або гідравлічна схема управління силовим приводом машини; шафа управління.

У більшості машин до складу приводу обертання входять трифазний асинхронний електродвигун, клиноремінна передача з зубчастим ременем. У машинах для мікро- і прецизійного зварювання, шпиндель яких повинен розвивати дуже високу частоту обертання ( $80 \dots 650 \text{ с}^{-1}$ ), як привод використовуються пневматичні турбінки, які характеризуються швидким розгоном і гальмуванням, дозволяють обходитися без передачі за допомогою безпосереднього з'єднання вала зі шпинделем машини.

Світовий досвід вказує на інтенсивний розвиток використання зварювання тертям в промисловості.

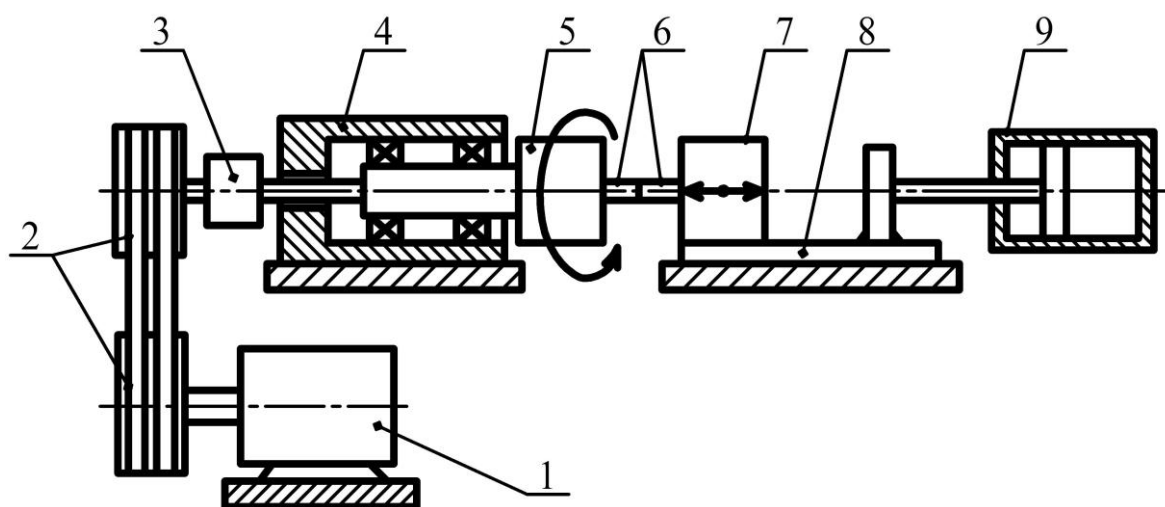


Рисунок 3.41 – Принципова конструктивно-кінематична схема машини для зварювання тертям

### 3.12 Ультразвукове зварювання

З'єднання при цьому способі зварювання утворюється під дією ультразвукових (з частотою 20...40 кГц) коливань і зусиль стиску, прикладених до зварюваних деталей.

Ультразвукові коливання у зварювальних установках отримують таким чином. Струм від ультразвукового генератора (рис. 3.42) подається на обмотку магнітострикційного перетворювача (вібратора), який збирається з пластин товщиною 0,1...0,2 мм. Матеріал, з якого вони виготовлені, здатний змінювати свої геометричні розміри під дією змінного магнітного поля.

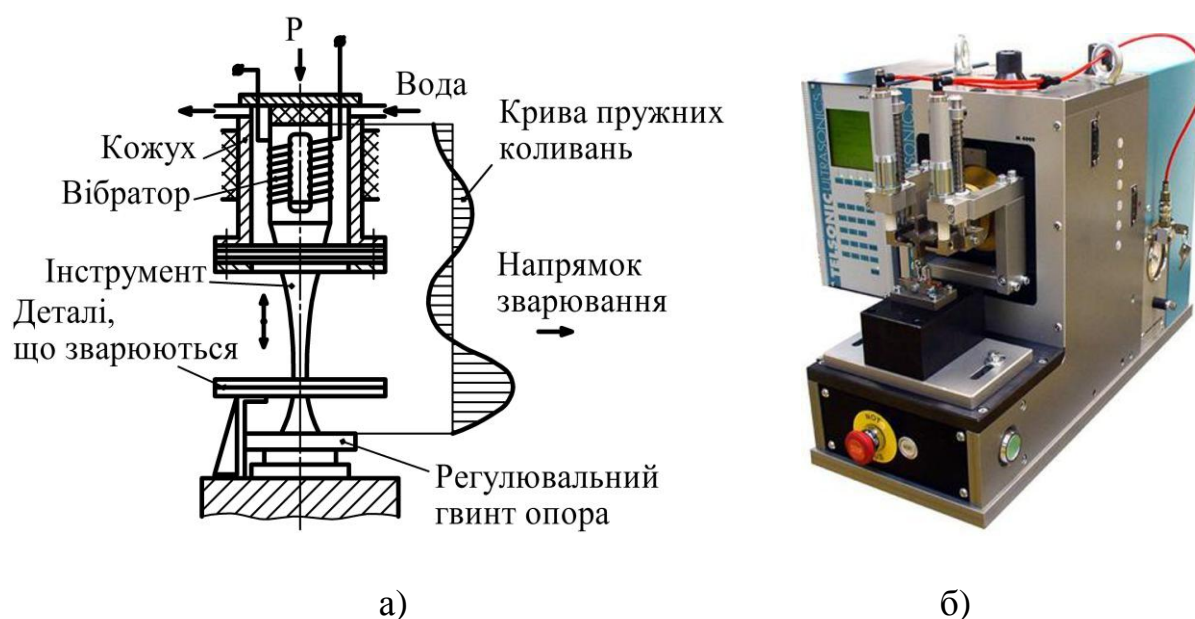


Рисунок 3.42 – Ультразвукове зварювання: а) – схема здійснення процесу; б) – установка ультразвукового зварювання

Якщо магнітне поле спрямоване вздовж пакета пластин, то будь-які його зміни ведуть до вкорочення або подовження магнітостриктора, що забезпечує перетворення високочастотних електричних коливань в механічні тієї ж частоти.

Вібратор за допомогою припою (або клею) з'єднується з хвилеводом або концентратором (інструментом), який може посилювати амплітуду коливань. Хвилеводи циліндричної форми передають коливання, не змінюючи їх амплітуди, в той час як ступінчасті, конічні концентратори посилюють їх. Розміри і форму концентратора розраховують з урахуванням необхідного коефіцієнта посилення. Як правило, достатній коефіцієнт 5, що забезпечує амплітуду коливань робочого виступу при холостому ході 20...30 мкм. Розміри хвилеводної системи підбираються так, щоб у зоні зварювання був максимум амплітудного значення коливань

(крива пружних коливань, рис.3. 42).

При цьому методі зварювання коливальні рухи ультразвукової частоти руйнують нерівності поверхні (рис. 3.43) і оксидний шар. Спільний вплив на зварювані деталі механічних коливань і відносно невеликого тиску зварювального хвилеводу - інструмента забезпечує течію металу в зоні з'єднаних поверхонь без зовнішнього підведення тепла. За рахунок тертя, викликаного зворотно-поступальним рухом стиснутих у контакті поверхонь, відбувається нагрівання поверхневих шарів матеріалів. Тертя не є домінуючим джерелом теплоти при зварюванні, наприклад, металів, але його внесок в утворення зварного з'єднання є істотним.

Ультразвукове зварювання (УЗЗ) може застосовуватися для з'єднання металів невеликих товщин, широко використовується для зварювання полімерних матеріалів. При зварюванні полімерів ультразвукові коливання подаються хвилеводом перпендикулярно до з'єднаних поверхонь і під їх впливом виникає інтенсивна дифузія – переміщення макромолекул з однієї частини в іншу.

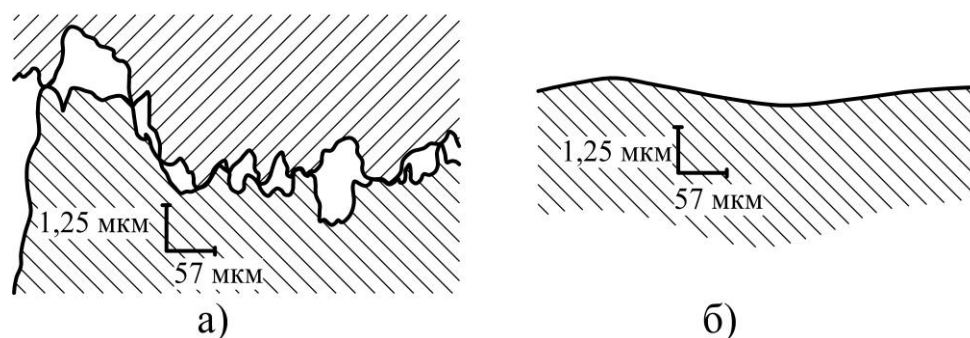


Рисунок 3.43 – Профіль поверхні: а) – двох зібраних мідних деталей перед УЗЗ; б) – нижньої деталі після впливу ультразвуку

Розроблено процес УЗЗ кісткових тканин в живому організмі, оснований на властивості ультразвуку прискорювати процес полімеризації деяких мономерів. Так, циакрин, що являє собою етиловий ефір ціанакрилової кислоти, під дією ультразвуку утворює твердий полімер протягом десятків секунд, у той час як без ультразвуку процес полімеризації йде кілька годин. Це явище і лягло в основу з'єднання або зварювання уламків кісткової тканини між собою за допомогою циакрину, змішаного з кістковою стружкою. Циакрин твердне і міцно з'єднується з кістковою тканиною, проникаючи в її капіляри під дією ультразвукових коливань. У результаті виходить міцне з'єднання окремих частин кістки між собою.

УЗЗ дозволяє вирішити проблему приєднання до кристалів кремнію напівпровідникових приладів алюмінієвих провідників-виводів, якими здійснюється підключення приладів до зовнішніх електричних ланцюгів.

Діапазон геометричних розмірів контактних площадок напівпровідникових приладів дуже широкий – від декількох мікронів у інтегральних схемах і дискретних транзисторах до 400...700 мкм у потужних транзисторах і діодах. Приєднання виводів – найбільш трудомістка операція в усьому циклі виготовлення напівпровідникових приладів.

### **3.13 Зварювання прокатуванням**

Зварювання прокатуванням – високопродуктивний технологічний процес, який використовується для отримання біметалів як з різнорідних металів, так і з металів, що близькі за хімічним складом, але відрізняються за властивостями. Цей процес застосовується для виробництва листів, смуг, стрічок, фасонних профілів, прутків, дроту. З'єднання компонентів біметалу відбувається при їх спільній гарячій або холодній пластичній деформації, яка здійснюється на прокатних станах у вакуумі або на повітрі.

Оскільки надійне з'єднання шарів забезпечується при 5...7-кратному обтисненні, для отримання біметалевого листа товщиною 25 мм вихідна товщина пакета повинна становити не менше 250...350 мм. Ширина слябів, які застосовуються для основного шару при виробництві двошарових корозійно-стійких листів зі сталі, зазвичай становить 700...1200 мм, а довжина – 1700...2500 мм. Сляби основного шару з вуглецевої і низьколегованої сталі виправляють на пресі і механічно обробляють по зварюваній поверхні з наступним знежиренням, промиванням і сушінням. Одночасно готують пластини плакувального шару.

Для зменшення ступеня окислення поверхонь заготовок при їх нагріванні перед зварюванням прокатуванням пакети герметизують зварним швом по периметру, а в ряді випадків зварювання виконують в захисній атмосфері (вакуумі або інертному газі).

Для нагрівання пакетів перед прокатуванням використовують нагрівальні шахтні або камерні печі звичайної конструкції. Температура нагрівання, наприклад, пакетів з вуглецевої і корозійностійких сталей становить 1200...1250 °С.

При отриманні біметалевих листів з покриттям з активних металів (наприклад, титану) використовують герметичну конструкцію пакета з розміщеним всередині пакета пірофорним матеріалом – церієм, який при нагріванні пакета згорає і зв'язує кисень навколишнього середовища. Надійне з'єднання деталей, що легко окислюються в процесі гарячого прокатування, досягається при використанні вакуумних прокатних станів.

Пакети прокатують на звичайних прокатних станах, що використовуються для отримання одношарових листів аналогічних розмірів.

Холодне зварювання прокатуванням застосовують для отримання дво- або тришарових біметалів, що складаються з сталевих основи і плакувальних шарів з кольорових металів, наприклад, сталь + мідь, сталь +

латунь, мідь + алюміній, алюміній + титан, алюміній + сталь + алюміній тощо. Отримання якісного з'єднання шарів у біметалах вимагає значної деформації при зварюванні прокатуванням і чистоти з'єднуваних поверхонь, причому особливо важлива відсутність органічних речовин (рис. 3.44).

При зварюванні прокатуванням спочатку відбувається змінання мікронерівностей і збільшення контактних поверхонь через значне витягування, що приводить до стоншення і часткового руйнування оксидних плівок. В окремих місцях контактування між зварюваними поверхнями утворюються ділянки схоплювання, між якими залишаються порожнини, що містять гази. Можливість подальшого збільшення числа і площі ділянок схоплювання визначається розвитком процесу адсорбції залишкових газів металом. При додатковій пластичній деформації в міру поглинання газу металом ділянки схоплювання розширюються, формуються зони взаємодії, межа з'єднання перетворюється на безперервну міжфазну межу.

При зварюванні прокатуванням з'єднання утворюється в умовах примусового деформування і малої тривалості взаємодії. Утворення з'єднання закінчується схоплюванням контактних поверхонь і релаксацією напружень такою мірою, якою це необхідно для збереження утворених міжатомних зв'язків.

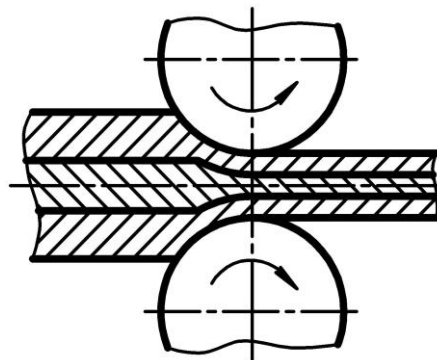


Рисунок 3.44 – Схема зварювання прокатуванням

### 3.14 Дифузійне зварювання

Відмінною особливістю дифузійного зварювання від інших способів зварювання тиском є застосування відносно високих температур нагрівання ( $0,5...0,7 T_{пл}$ ) і порівняно низьких питомих тисків стискання ( $0,5...0,7$  МПа) при ізотермічному витримуванні від декількох хвилин до декількох годин.

Формування дифузійного з'єднання визначається такими фізико-хімічними процесами, що протікають при зварюванні, як взаємодія нагрітого металу з газами навколишнього середовища; очищення зварюваних поверхонь від оксидів; розвитком високотемпературної повзучості і рекристалізації. У більшості випадків це дифузійні процеси активовані термічно.

Для зменшення швидкості окислення зварюваних заготовок і створення умов очищення контактних поверхонь від оксидів при зварюванні можуть бути застосовані гази – відновники, розплави солей, флюси, обмазки, але в більшості випадків використовують вакуум або

інертні гази.

Очищення поверхонь металів від оксидів може відбуватися в результаті розвитку процесів сублімації і дисоціації оксидів, розчинення оксидів за рахунок дифузії кисню в метал (іонів металу в оксид), відновлення оксидів елементами-розкислювачами, що містяться в сплаві і дифундують при нагріванні до межі розділу метал – оксид .

Розрахунки і експерименти показують, що, наприклад, на сталі оксиди видаляються найбільш інтенсивно шляхом їх відновлення вуглецем, а на титані – за рахунок розчинення кисню в металі.

Зближення зварюваних поверхонь відбувається, в першу чергу, за рахунок пластичної деформації мікровиступів і приповерхневих шарів, обумовленої прикладанням зовнішніх стискальних напруг і нагріванням металу.

У процесі деформації зварюваних поверхонь, вільних від оксидів, відбувається їх активація і при розвитку фізичного контакту між такими поверхнями реалізується їх схоплювання.

При дифузійному зварюванні однойменних металів зварне з'єднання досягає рівномірності з основним матеріалом в тому випадку, коли структура зони з'єднання не відрізняється від структури основного матеріалу. Для цього в зоні контакту повинні утворюватися спільні для з'єднаних матеріалів зерна. Це можливо за рахунок міграції меж зерен, яка здійснюється або шляхом рекристалізаційної обробки, або шляхом збиральної рекристалізації.

За допомогою дифузійного зварювання у вакуумі отримують високоякісні з'єднання кераміки з коваром, міддю, титаном, жароміцними і тугоплавкими металами і сплавами, електровакуумним склом, оптичною керамікою, сапфірами; графіту з металами, композиційними і порошковими матеріалами та ін.

З'єднувані заготовки можуть бути дуже різні за своєю формою і мати компактні (рис. 3.45, а–в) або розвинені (рис. 3.45, г–ж) поверхні контактування. Геометричні розміри зварюваних деталей знаходяться в межах від декількох мікрон (при виготовленні напівпровідникових приладів) до декількох метрів (при виготовленні шаруватих конструкцій).

Схематично процес дифузійного зварювання можна описати таким чином. Зварювані заготовки збирають в пристосуванні, що дозволяє передавати тиск в зону стикування, вакуумують і нагрівають до температури зварювання. Після цього прикладають стискальне зусилля на заданий період часу. У деяких випадках після зняття тиску виріб додатково витримують при температурі зварювання для більш повного протікання рекристалізаційних процесів, що сприяють формуванню якісного з'єднання. Після закінчення зварювального циклу конструкція охолоджується у вакуумі, інертному середовищі або на повітрі в залежності від типу обладнання.

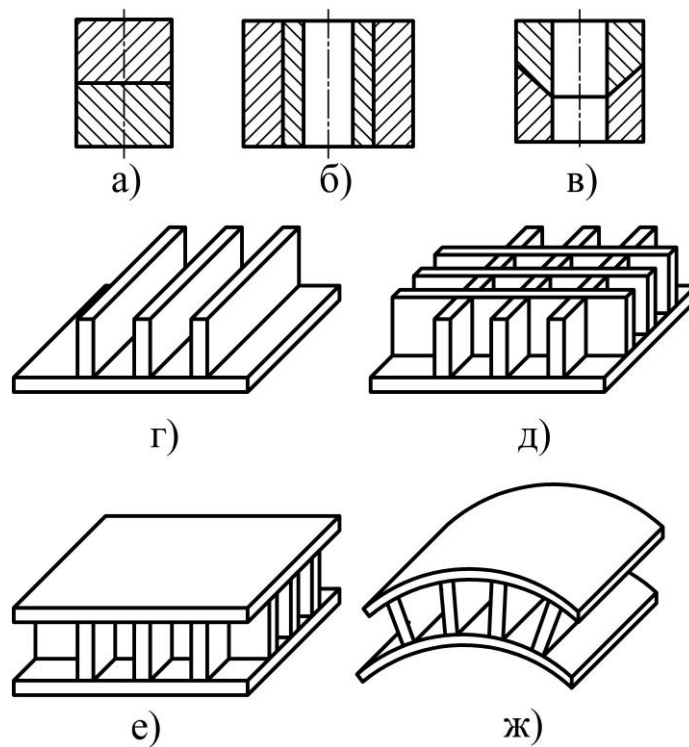


Рисунок 3.45 - Деякі типи конструкцій, одержуваних дифузійним зварюванням

Залежно від напружень, що викликають деформацію металу в зоні контакту і визначають процес формування дифузійного з'єднання, доцільно умовно розрізняти зварювання з високоінтенсивним ( $P > 20$  МПа) і низькоінтенсивним ( $P < 2$  МПа) силовими впливами.

При зварюванні з високоінтенсивним впливом зварювальний тиск створюють, як правило, за допомогою преса, забезпеченого вакуумною камерою і нагрівальним пристроєм (рис. 3.46).

Але такі установки дозволяють зварювати деталі обмежених розмірів (як правило, діаметром до 80 мм (див. рис. 3.45, а–в).

При виготовленні великогабаритних двошарових конструкцій (рис. 3.45, г, д) використовують відкриті преси. При цьому зварювані деталі перед встановленням у прес збирають в герметичні контейнери, які вакуумують і нагрівають до зварювальної температури.

Для унеможливлення втрати стійкості зварюваних елементів, передачі тиску в зону зварювання та створення умов локально-спрямованої деформації металу, що зварюється в зоні стику, дифузійне зварювання здійснюють у пристосуваннях з використанням для заповнення "порожнеч" (міжреберних просторів) технологічних вкладишів та блоків, які після зварювання демонтують або видаляють хімічним травленням.

При зварюванні з високоінтенсивним силовим впливом локальна

деформація металу в зоні з'єднання, як правило, досягає декількох десятків відсотків, що забезпечує стабільне отримання якісного з'єднання.

Для виготовлення шаруватих конструкцій (рис. 3.45, е, ж) перспективне дифузійне зварювання з низькоінтенсивним силовим впливом, при якому допустимі стискальні зусилля обмежені стійкістю тонкостінних елементів. При цьому способі дифузійного зварювання не потрібно створення складного спеціалізованого обладнання.

При виготовленні конструкцій складного криволінійного профілю може бути використана технологічна схема, при якій тиск нейтрального газу сприймається безпосередньо зовнішніми елементами самої конструкції (несучими обшивками, оболонками тощо).

У ряді випадків можна уникнути застосування зовнішнього тиску для стискання зварюваних заготовок, використовуючи явище термічного напруження, яке виникає при нагріванні матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного розширення. При зварюванні коаксіально зібраних заготовок коефіцієнт лінійного розширення охоплювальної деталі повинен бути менше коефіцієнта лінійного розширення охоплюваної деталі.

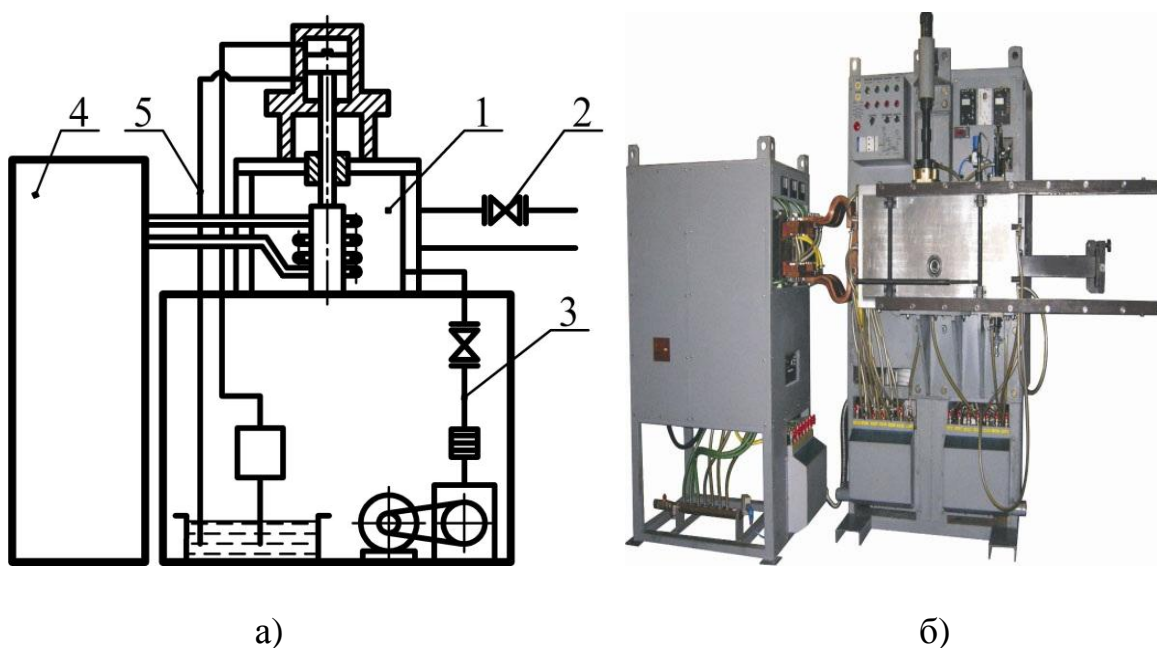


Рисунок 3.46 – Принципова схема (а) і загальний вигляд установки для дифузійного зварювання (б): 1 – вакуумна камера, 2 – система охолодження камери; 3 – вакуумна система, 4 – високочастотний генератор; 5 – гідросистема преса

Якість з'єднання при дифузійному зварюванні у вакуумі визначається комплексом технологічних параметрів, основними з яких є температура, тиск, час витримки.



Дифузійні процеси, що лежать в основі формування зварного з'єднання, активуються термічно, тому підвищення температури зварювання стимулює їх розвиток.

Розробка і створення установок для дифузійного зварювання в даний час ведеться в напрямку уніфікації систем (вакуумної, нагрівання, тиску, управління) та зварювальних камер.

### **3.15 Паяння**

Швидкий розвиток техніки в різних галузях промисловості зумовив широке застосування паяння, особливо в машинобудуванні, електроніці та електротехнічній промисловості. Це пов'язано, по-перше, з тим, що паяння як процес формування з'єднань матеріалів здійснюється при температурах нижчих температури початку плавлення паяльного матеріалу і характеризується можливістю автоматичного її регулювання. По-друге, це пояснюється все більшим впровадженням у виробництво нових конструкційних матеріалів і переходом на високолеговані сплави, зварювання яких викликає значні труднощі.

Сутність паяння полягає у створенні рідкого прошарку з розплавленого припою між твердими поверхнями, що їх спаюють. Рідкий припой змочує поверхні і розтікається в тонкому зазорі між спаюваними деталями, а після кристалізації утворює паяний шов, в якому між поверхневими атомами (іонами) заготовок і припою формуються хімічні (металеві) зв'язки.

Процес паяння ускладнює наявність на поверхні металів оксидних та інших шарів, що перешкоджають розтіканню припою по зазору між деталями. Рідкий метал припою також піддається окисленню з поверхні і не розтікається по металевих поверхнях: з'являються непропаї, що є дефектом з'єднання. Тільки такі метали, як золото, і, частково, срібло, можна паяти без застосування флюсів для зняття оксидних шарів. Цю властивість золота використовують у приладобудівному виробництві: поверхні виробу спочатку покривають тонким шаром золота, а потім паяють. Такий метод досить дорогий, і його застосовують, наприклад, у виробництві напівпровідникових приладів (мікросхем).

Поверхні під час паяння активують за допомогою флюсів – речовин, що розчиняють оксиди металів або хоча б порушують суцільність їх шару для того, щоб припой зміг проникнути під них, змочуючи чистий метал. Для цієї мети застосовують нашатир, буру або суміші хлоридів активних металів, що утворюють легкоплавкі системи. Після паяння сліди застосованих флюсів слід ретельно видаляти, оскільки може виникнути корозія, і паяні з'єднання почнуть руйнуватися.

Слід зазначити, що флюси не видаляють з паяних заготовок сторонні речовини органічного та неорганічного походження, наприклад, плівки жирового походження, забруднення, залишки лакофарбових покриттів тощо. У процесі паяння вони перешкоджають змочуванню основного

металу флюсом і припоєм, викликають непропаї, погіршують якість паяних з'єднань. Сторонні речовини з поверхонь з'єднуваних деталей перед паянням видаляють хімічною або механічною обробкою.

Переваги флюсового паяння – можливість здійснювати процес у звичайній атмосфері, застосовувати універсальне устаткування та інструмент (газополуменеві пальники, паяльники).

Недоліки флюсового паяння – агресивність ряду флюсів; неможливість досить надійно видаляти поверхневі оксиди деяких металів (наприклад, оксиди титану); екологічні проблеми – забруднення атмосфери і стічних вод. У зв'язку з цим кращим слід вважати паяння без флюсів – в контрольованих атмосферах: у вакуумі, аргоні, гелії.

Останнім часом розробляють так звані самофлюсувальні припої, які при високих температурах паяння можуть розчиняти свої оксиди, забираючи цим самим кисень від оксидів, що утворилися на поверхні металу. Такі припої містять як розкислювачі бор, алюміній та інші активні елементи.

Видаленню оксидних плівок з поверхні металу сприяє ультразвук (рис. 3.47), що порушує їх суцільність, і це часто використовують на виробництві (наприклад, при паянні алюмінію ультразвуковими паяльниками).

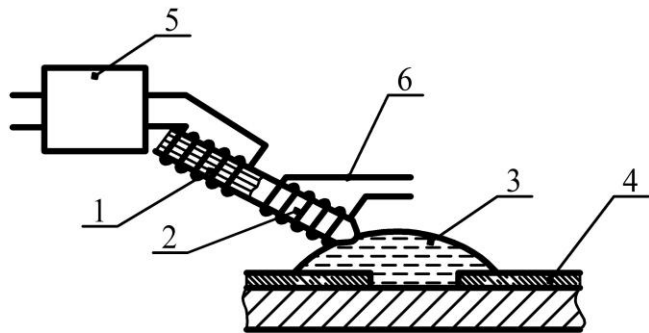


Рисунок 3.47 - Схема паяння ультразвуковим паяльником

Паяльник має магнітостриктор (1), який випромінює коливання, що передаються наконечнику (2). Збуджені наконечником в розплавленому припої кавітаційні бульбашки (3) ефективно руйнують оксидні плівки (4). Обмотка магнітостриктора підключається до високочастотного генератора (5), що виробляє імпульси з частотою 15...20 кГц. Нагрівається наконечник спіраллю (6), через яку пропускається електричний струм. При лудінні наконечник розташовується якомога ближче до деталі, не торкаючись її. Облужені таким чином деталі можна паяти звичайним електричним паяльником без флюсу із застосуванням олов'яно-цинкових або олов'яно-свинцевих припоїв.

При виготовленні паяних виробів особливо важлива якість складання під паяння, при цьому мають бути гарантовані зазори для заповнення їх рідким припоєм. При так званому капілярному паянні, що широко вживається, використовують здатність рідин самовільно підніматися в тонкі капіляри (трубочки) або плоскі щілини за рахунок сил поверхневого натягу за наявності змочування рідиною твердої поверхні. Якщо зазори залишені великі, то припой не буде в них затікати, і будуть з'являтися непропаяні ділянки, тобто паяний шов буде низької якості. Навпаки, якщо

зазори дуже малі, то швидкість проникнення в них рідкого металу буде дуже мала, і теж можуть з'являтися непропаяні ділянки. Таким чином, існують оптимальні розміри зазорів, що забезпечують хорошу якість паяних з'єднань. У виробничих умовах особливі труднощі викликає складання деталей виробу під паяння за оптимальними зазорами, від чого залежить якість паяного виробу (міцність, електропровідність, корозійна стійкість).

При паянні виробів, зібраних з некапілярним або нерівномірним зазором для утримання рідкої фази припою в зазорі і управління розтіканням його по поверхні використовують композиційні припої, які містять наповнювач для утворення в паяльному зазорі системи капілярів. Такі припої отримують, наприклад, спіканням порошку або волокон тугоплавкого матеріалу з подальшим просоченням рідкою легкоплавкою фазою.

Для з'єднання різнорідних металів, наприклад, титану зі сталлю, алюмінію з міддю і інших застосовується контактено-реактивне паяння, при якому припій утворюється в результаті контактено-реактивного плавлення. Воно засноване на здатності деяких металів утворювати в місці контакту сплави (евтектики або тверді розчини), температура плавлення яких нижча температури плавлення будь-якого зі з'єднаних металів. Коли з'єднані метали не утворюють між собою подібного типу сплаву, то при паянні однорідних металів використовують проміжний прошарок або наносять покриття на з'єднані поверхні напиленням, гальванічним або якимось іншим способом. Метал прошарку або покриття підбирається так, щоб він взаємодіяв з кожним зі з'єднаних металів, утворюючи більш легкоплавкі сплави.

Процес контактеного плавлення починається з утворення фізичного контакту між з'єднаними поверхнями, по активних центрах. У них у твердому стані відбувається взаємна дифузія металів і безперервна зміна їх концентрації в точці контакту. При деякій температурі відбувається розплавлення і утворюється зона розплаву, яка буде збільшуватися і розчиняти в своєму об'ємі метали, які взаємодіють. Кількість таких контактів буде зростати в процесі здійснення паяння.

При контактено-реактивному паянні деталі необхідно стискати. Це створює кращий фізичний контакт між деталями і сприяє видавлюванню надлишку рідкої фази. Разом з надлишками рідини видаляються частинки оксидів, присутність яких в паяному шві може знижувати його міцність. Слід зазначити, що рідкий прошарок, що утворюється при контактено-реактивному паянні, більш активний, ніж коли вноситься в зазор готовий припій: він краще змочує основний метал і більш інтенсивно його розчиняє.

При реактивно-флюсовому паянні припій утворюється в результаті відновлення металів з компонентів флюсу. Наприклад, паяння алюмінію флюсом з хлористого цинку ґрунтується на здатності алюмінію витіснити

цинк з розплавленої солі при температурі 400 °С. Утворений цинк і є припоєм, що з'єднує деталі з алюмінію.

У ряді випадків продукт взаємодії основного металу з флюсом не є припоєм, однак він покриває поверхню в місці паяння і покращує змочуваність додатковим припоєм, який вводиться в зазор. Наприклад, за допомогою флюсу  $\text{AgCl}$  можна здійснювати реактивно-флюсове лудіння (покриття) титану сріблом.

При температурі 350...400 °С хлорид титану у вигляді газу випаровується з поверхні титану, руйнуючи при цьому окисну плівку  $\text{TiO}_2$ , а відновлене срібло покриває чисту поверхню титану, яку потім можна піддавати паянню іншими методами.

Паяні з'єднання мають дуже малий рівень залишкових напружень, оскільки весь виріб піддається одночасно нагріванню і охолодженню. Однак досить тривалий термічний цикл паяння (нагрівання, витримка, охолодження) може зруйнувати основний метал виробу, особливо при високотемпературному паянні (1000...1200 °С).

Паяння в машинобудуванні та приладобудуванні застосовують дуже широко, починаючи від паяння вузлів реактивних двигунів і закінчуючи мікромодульними схемами сучасних елементів електроніки. Останнім часом паяння стали використовувати і в будівництві для з'єднання оцинкованих труб і листів, щогл електропередач тощо.

### **3.16 Наплавлення та напилювання**

Процеси наплавлення займають важливе місце в зварювальному виробництві при ремонті та відновленні первісних розмірів зношених деталей і при виготовленні нових виробів з метою отримання поверхневих шарів, що мають підвищену твердість, зносостійкість, жароміцність, кислотостійкість та інші спеціальні властивості.

Наплавлення здійснюють нанесенням розплавленого металу на поверхню виробу, нагріту до оплавлення або до температури надійного змочування рідким металом, що наплавляється. У результаті взаємодії розплавленого металу з опаленою (або достатньо підігрітою) поверхнею деталі між ними утворюються металеві зв'язки. Товщина наплавленого металу може бути різною: від 0,5 до 10 мм і більше.

Такі шари можна наносити на зовнішні поверхні деталей, наприклад, вали, валки прокатного обладнання тощо (рис. 3.48, а), або внутрішні поверхні виробів – корпуси хімічних та енергетичних реакторів, обладнання хімічних виробництв тощо (рис. 3.48, б).

Наплавлення дозволяє значно збільшити термін служби деталей і скоротити витрати дефіцитних матеріалів на їх виготовлення. Часто виявляється доцільним весь виріб виготовляти з дешевшого і досить працездатного металу для конкретних умов експлуатації і тільки на поверхнях, що працюють в особливих умовах, мати необхідний по товщині

шар іншого матеріалу.

У цьому випадку для виготовлення деталей зазвичай застосовують відносно прості і дешеві матеріали (наприклад, низьковуглецеві сталі), а на робочі поверхні наплавляють, наприклад, бронзу, замінюючи тим самим суцільно бронзову деталь.

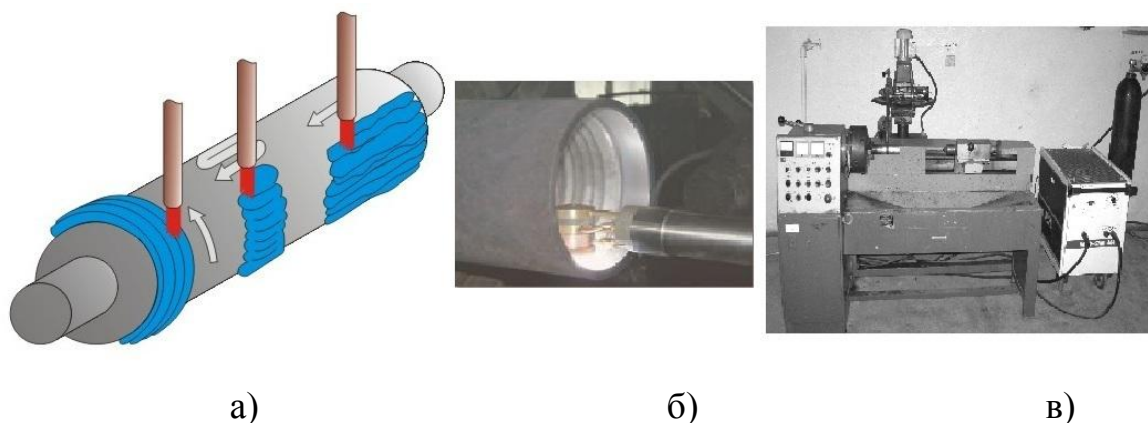


Рисунок 3.48 – Наплавлювання в захисному газі циліндричних поверхонь: а) – зовнішніх; б) – внутрішніх; в) – установка для наплавлення.

При відновленні (ремонті) деталей наплавлення виконують тим же або близьким за складом металом, з якого виготовлено виріб.

Для захисту нагрітого і розплавленого металу від взаємодії з повітрям використовують флюси і захисні гази (активні та інертні).

Якість самого наплавленого шару та зони його з'єднання з основним матеріалом у ряді випадків може бути підвищено за рахунок термічної обробки (попередньої, супутньої, наступної). Попередній або супутній нагрів застосовують, наприклад, при наплавленні сталей, схильних до гартування і утворення тріщин; це знижує ймовірність отримання крихких підгартованих зон у металі деталі або в наплавленому шарі. Наступна термообробка зазвичай застосовується для зниження внутрішніх напружень і вирівнювання мікроструктури.

Коли для металу або зони з'єднання небажано тривале перебування при високих температурах, рекомендується інтенсифікувати охолодження наплавлюваної деталі.

Таким чином, при наплавленні в кожному конкретному випадку необхідно комплексно вирішувати ряд складних питань: вибір матеріалу, що забезпечує відповідні умовам експлуатації властивості; можливість наплавлення цього матеріалу безпосередньо на основний метал деталі або підбір матеріалу для наплавлення підшару; вибір способу і режиму наплавлення; вибір термічного режиму для виконання наплавлення.

Для захисту поверхонь деталі від корозії, зміцнення поверхні, захисту

від абразивного зношування, для відновлення зношених деталей тощо в ряді випадків використовують напилення (металізацію). При напиленні основний метал не розплавляється і товщина шару, що наноситься, значно менше товщини шару, одержуваного наплавленням: він становить десяти частки міліметра, зазвичай 0,2...0,3 мм.

Процес напилення протікає в такий спосіб. У розпилювальну головку металізаційного апарата безперервно подається металевий дріт напилюваного металу або порошок неметалевого матеріалу, які розплавляються ацетилено-кисневим полум'ям або електричною дугою непрямої дії, що горить між двома дротами-електродами, або стиснутою дугою при плазмовому напиленні.

Розплавлений метал струменем продуктів згоряння і повітря, що виходить з сопла головки зі швидкістю до 200 м/с розпорошується і у вигляді частинок розміром 10...150 мкм наноситься на поверхню деталі (рис. 3.49).

Внаслідок великої швидкості частинки досягають поверхні деталі в рідкому або пластичному стані і впроваджуються в цю поверхню, міцно зчіплюються з нею, утворюючи металізаційний (напилений) шар.

В даний час в техніці найчастіше використовується плазмове напилення, перевагами якого є: можливість напилення тугоплавких матеріалів; висока продуктивність при напиленні керамічних матеріалів; можливість напилення порошкових матеріалів.

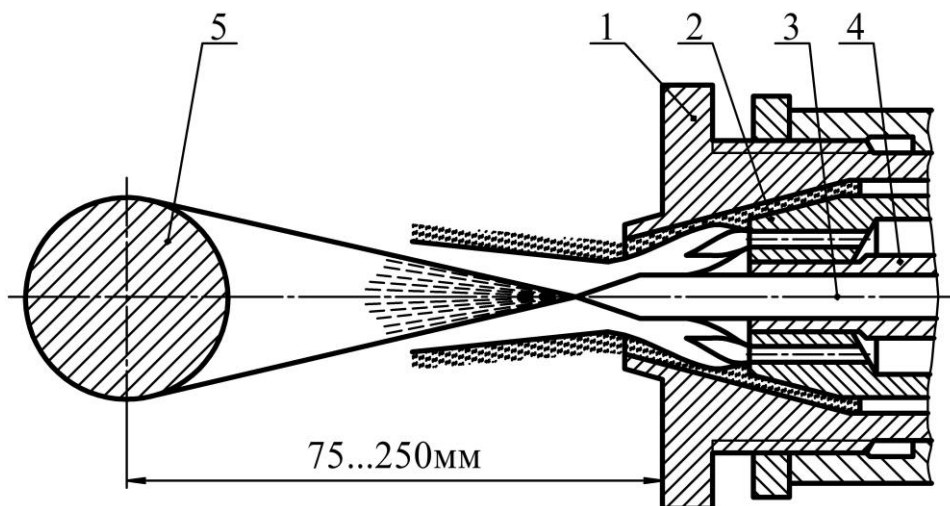


Рисунок 3.49 – Схема роботи розпилювальної головки газометалізаційного апарата: 1 – сопло зовнішнє для подачі повітря; 2 – мундштук для подачі газу; 3 – дріт; 4 – сопло для подачі дроту; 5 – деталь

При плазмовому напиленні поверхню не слід перегрівати понад 300 °С, тому що при цьому виникають внутрішні напруження, здатні викликати руйнування покриття.

Для попередження перегрівання поверхню біля місця напилення

охолоджують стисненим повітрям, потік якого направляють на покриття за допомогою додаткового кільцевого сопла, що охоплює мундштук пальника.

Плазмове напилення застосовують, як правило, для нанесення жароміцних покриттів, необхідних в ракетній техніці. Для підвищення міцності зчеплення керамічних покриттів з основним металом їх напилюють на підшарок. При напиленні оксиду алюмінію для матеріалу-підшару використовують ніхром.

Плазмові покриття використовують також для електроізоляції, наприклад, при виготовленні МГД-генераторів, теплообмінників, тензодатчиків, дисків електропил тощо.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Савуляк В. І. Зварювання. Вступ до фаху: навчальний посібник / Савуляк В. І., Заболотний С. А. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 96 с.
2. Акулов А. И Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
3. Корниенко А. Н. У истоков "Электрогестфа" / А. Н. Корниенко. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.
4. Николаев Г. А. Специальные методы сварки / Г. А. Николаев, Н. А. Ольшанский. – М. : Машиностроение, 1975. – 231 с.
5. Патон Б. Е. Огонь сшивает металл / Б. Е. Патон, А. Н. Корниенко. – М. : Педагогика, 1988. – 144 с.
6. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / [Редкол. Г. А. Николаев (пред.) и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. Т.2. / Под ред. А. И. Акулова. – 1978. – 462 с.
7. Специальные методы сварки и пайка / В. А. Саликов, М. Н. Шушпанов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский. – Воронеж : ВГТУ, 2000. – 214 с.
8. Теория сварочных процессов / [Под ред. В. В. Фролова]. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
9. Технология и оборудование сварки плавлением / [Под ред. Г. Д. Никифорова]. – М. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / [Под ред. Б. Е. Патона]. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
11. Фетисов Г. П. Сварка и пайка в авиационной промышленности / Г. П. Фетисов – М. : Машиностроение, 1983. – 216 с.
12. Фролов В. В. Молодёжи о сварке / В. В. Фролов, В. А. Парахин – М. : Машиностроение, 1979. – 111 с.
13. Шебеко Л. П. Оборудование и технология дуговой автоматической сварки / Л. П. Шебеко – М. : Высшая школа, 1986. – 279 с.
14. Андреев В. В. Инверторные источники питания сварочной дуги / В. В. Андреев // Сварщик. – 1999. – №6. – С. 25 – 29.
15. Блащук В. Е. Металл и сварка в монументальной скульптуре / В. Е. Блащук // Автоматическая сварка. – 2002. – №5. – С. 46 – 52.
16. Корниенко А. Н. Сварочная техника в годы второй мировой войны / А. Н. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1997. – №7. – С. 42 – 51.
17. Корниенко А. Н. Первые изобретения в области контактной сварки / А. Н. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1996. – №5. – С. 45 – 52.
18. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – №1. – С. 4 – 14.
19. Зорин Е. Е. Сварка. Вступление в специальность / Е. Е. Зорин,



Н. Г. Худолей – М. : ТОВ «Недра-бизнесцентр», 2004. – 232 с.  
20.