

621.78(03)

К 83

В.А. Кроха

**УПРОЧНЕНИЕ
МЕТАЛЛОВ
ПРИ
ХОЛОДНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

СПРАВОЧНИК



В. А. Кроха

**УПРОЧНЕНИЕ
МЕТАЛЛОВ
ПРИ
ХОЛОДНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

СПРАВОЧНИК



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1980

ББК 34.65
К83
УДК 621.787:669—131.2(031)

Рецензент Г. А. Навроцкий

Кроха В. А.

К83 Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.—157 с., ил. 50 к.

В справочнике приведены кривые упрочнения сталей, цветных металлов и сплавов при различных схемах деформирования, изложены методы определения напряжения течения, приведены показатели деформационного упрочнения металлов и сплавов, рассмотрены факторы, влияющие на их величину. Даны примеры практического использования кривых упрочнения.

Справочник предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных заводов, проектно-конструкторских, технологических и научно-исследовательских институтов.

К $\frac{31103-088}{038(01)-80}$ 88-80.

2704070000

ББК 34.65
БПЗ.4

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ПОЯСНЕНИЯ

I. ПО МАРКАМ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Марки сталей и сплавов с индексом ¹ указаны по британскому стандарту (British Standard); с индексом ² — по американскому стандарту AISI; с индексом ³ — по японскому стандарту; с индексом ⁴ — по стандарту Чехословакии, остальные иностранные марки указаны по немецкому стандарту DIN (Deutsche Industrie Normale).

Марки сталей с повышенным содержанием серы имеют индекс *.

II. ПО МЕТОДАМ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

- А — непрерывная осадка образцов с торцовыми цилиндрическими выточками, заполненными смазкой;
- А₁ — двухступенчатая осадка образцов с торцовыми цилиндрическими выточками, заполненными смазкой;
- А₂ — непрерывная осадка образцов с торцовыми цилиндрическими выточками, заполненными смазкой, в условиях гидростатического давления;
- Б — осадка коническими бойками образцов с торцовыми коническими выточками;
- В₀ — испытание образцов на сжатие ($\frac{h_0}{d_0}$ — неизвестно);
- В — непрерывная осадка высоких образцов ($\frac{h_0}{d_0} = 1,5-2,0$);
- В₁ — ступенчатая осадка высоких образцов;
- В₂ — изотермическая осадка высоких образцов;
- В₃ — сжатие в условиях гидростатического давления;
- В₄ — сжатие в условиях ультразвуковых колебаний;
- В₅ — осадка высоких образцов в вакууме;
- В₆ — осадка образцов с первоначальным отношением $\frac{h_0}{d_0} = 1$;
- В₇ — осадка на пластометре;
- В₈ — динамическое сжатие;
- Г — осадка образцов с различными первоначальными отношениями $\frac{h_0}{d_0}$;
- Ж — передавливание металла двумя плоскими плитами;
- К — сжатие плитами при дополнительном перемещении одной из них в плоскости контакта;
- Д — растяжение;
- Д₁ — одноосное растяжение;
- Д₂ — растяжение с корректировкой кривых по Бриджмену;
- Д₃ — растяжение в условиях гидростатического давления;
- Д₄ — растяжение в условиях ультразвуковых колебаний;
- Д₅ — растяжение на пластометре;

- Д_а — двухосное растяжение;
- Д₇ — одноосное растяжение вдоль прокатки;
- Д₈ — одноосное растяжение поперек прокатки;
- Д₉ — двухосное растяжение статическое;
- Д₁₀ — двухосное растяжение динамическое;
- Е — кручение;
- И — гидростатическое выпучивание;
- Л — гидравлическая вытяжка

III. ПО СКОРОСТЯМ ИСПЫТАНИЯ

- а — скорость деформации определялась в с⁻¹;
- б — скорость деформации определялась в мм/мин;
- в — скорость деформации определялась в м/с;
- г — скорость деформации определялась в мм/с;
- д — указана продолжительность испытания в с;
- ЛГ — опыты проводились на лабораторной гидравлической испытательной машине;
- ЛМ — опыты проводились на лабораторной механической испытательной машине.

IV. ПО ПРИЛАГАЕМОЙ НАГРУЗКЕ

- М — предварительная и последующая (при испытании) деформации имеют противоположные знаки;
- Н — предварительная деформация того же знака, что и последующая.

V. ПО ВЕЛИЧИНАМ

- σ_s — напряжение течения;
- σ_{s0} — экстраполированный предел текучести;
- τ — касательное напряжение;
- n — показатель деформационного упрочнения;
- σ_T — предел текучести при растяжении;
- σ_B — временное сопротивление разрыву;
- ϵ — логарифмическая степень деформации;
- q — относительная степень деформации при сжатии;
- δ — относительное удлинение после разрыва;
- ϵ_p — наибольшее равномерное относительное удлинение при растяжении;
- ψ — относительное сужение после разрыва;
- ψ_p — наибольшее равномерное относительное сужение при растяжении;
- γ — относительный сдвиг при кручении;
- $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации;
- S — толщина листа;
- a_{0*} — предельное значение первоначального отношения высоты к поперечным размерам заготовки, гарантирующее ее деформирование без изгиба;
- d_z — диаметр зерна.

VI. В таблицах для углеродистых сталей марки приведены в порядке возрастания содержания в них углерода, а для легированных — в порядке увеличения количества легирующих элементов, содержания каждого элемента и углерода. Иностранные марки сталей указаны в таблицах рядом с отечественными, близкими к ним по химическому составу.

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый справочник является как бы продолжением ранее опубликованной монографии автора «Кривые упрочнения металлов при холодной деформации» (М., «Машиностроение», 1968). В нем обобщены материалы большого количества работ, вышедших за последние 15 лет в СССР и за рубежом, а также результаты исследований автора, выполненных в последние 10 лет и опубликованных в периодических изданиях.

В справочнике представлены основные экспериментальные кривые упрочнения, полученные в последние годы. В предлагаемой работе не приведены экспериментальные кривые упрочнения при холодной пластической деформации, построенные автором и другими исследователями, содержащиеся в ранее изданных книгах [13, 14, 16].

Для характеристики изменения напряжения течения σ_s в процессе холодной пластической деформации служат диаграммы зависимости этой величины от степени деформации, называемые кривыми упрочнения.

Напряжение течения σ_s действует в пластически деформируемом теле при линейном напряженном состоянии. Оно рассчитывается по формуле

$$\sigma_s = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P — деформирующее усилие; F — площадь поперечного сечения образца после деформации.

Кривые упрочнения строят по результатам испытания на растяжение, сжатие и кручение.

Степень деформации, характеризующая степень формоизменения металла, определяется в логарифмических (эквивалентных) или относительных (приближенных) единицах. Логарифмические степени деформации при испытании

на растяжение $\epsilon = \ln \frac{l}{l_0}$, а при испытании на сжатие $\epsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ (h_0, l_0 — исходные значения соответственно высоты и расчетной длины образца; h, l — конечные значения высоты и длины образца). Относительные степени деформации в случае пластического растяжения $\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} = \frac{l - l_0}{l}$, а в слу-

чае пластического сжатия $q = \frac{F - F_0}{F} = \frac{h_0 - h}{h_0}$ (F_0, F — исходная и конечная площади поперечного сечения образца). Формулы для определения относительных степеней деформации дают уменьшенные значения степени деформации по сравнению с логарифмическими.

При деформировании кручением относительный сдвиг (относительная степень деформации) $\gamma = \operatorname{tg} \beta = \frac{\varphi}{l} r$ (φ — угол поворота одного конца образца

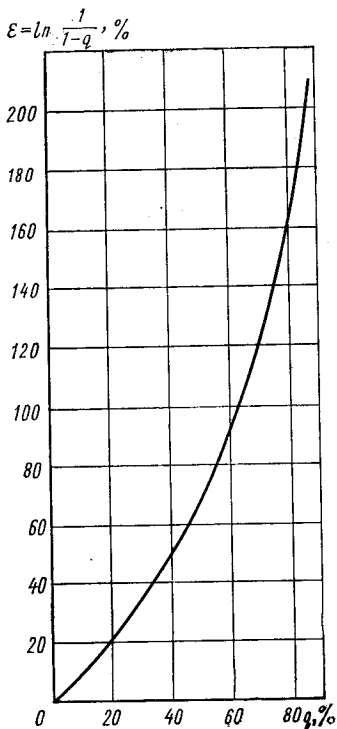


Рис. 1. Взаимосвязь между логарифмической и относительными степенями деформации

относительно другого; β — угол сдвига; r — радиус образца; l — расчетная длина образца).

Между логарифмическими и относительными степенями деформации существует функциональная связь, выраженная следующими зависимостями:

при сжатии

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{1}{1-q}; \quad (2)$$

при растяжении

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{1}{1-\psi}; \quad (3)$$

при кручении

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\gamma}{2} \right). \quad (4)$$

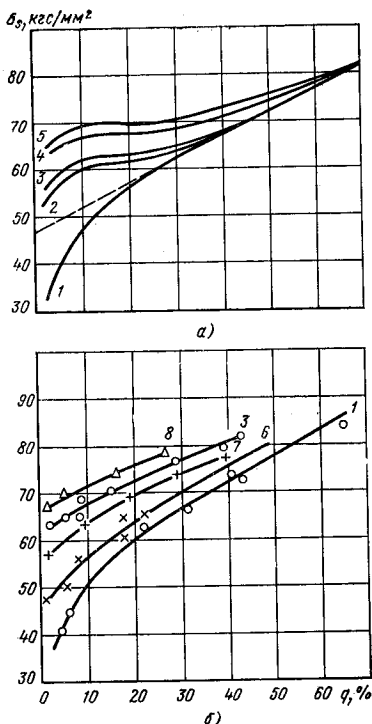


Рис. 2. Кривые упрочнения при сжатии горячекатаных и предварительно деформированных в холодном состоянии волоочением стали 15 (а) и осадкой стали 20 (б) при различных относительных степенях предварительной деформации (по данным автора):

1 — $q=0$ (горячекатаная); 2 — $q=0,165$; 3 — $q=0,20$; 4 — $q=0,32$; 5 — $q=0,47$; 6 — $q=0,10$; 7 — $q=0,15$; 8 — $q=0,30$; точка пересечения касательной к кривой 1 с осью ординат есть σ_{80}

Графическая связь между логарифмическими и относительными степенями деформации при испытании на сжатие и растяжение представлена на рис. 1. Так как между логарифмическими и относительными степенями деформации существует функциональная связь, то практическое использование приведенных в литературных источниках кривых упрочнения не представляет трудностей независимо от того, для каких видов степеней деформации они построены.

Имеется ряд формул, аппроксимирующих кривые упрочнения. На основании анализа экспериментальных данных, полученных автором и другими исследователями, установлено, что в области нормальных и близких к ним температур при деформировании со скоростями деформации $2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ в диапазоне логарифмических степеней деформации 0,1 — 1,25 кривые упрочнения неупрочненных пластической деформацией в холодном состоянии углеродистых и легированных конструкционных, инструментальных, высоколегированных ферритных и аустенитных сталей, алюминия и алюминиевых сплавов, легких металлов, меди, труднодеформируемых металлов (церия, стронция, ниобия, титана, вольфрама, урана, тантала, молибдена) и их сплавов наиболее точно аппроксимируются известным уравнением

$$\sigma_s = m\varepsilon^n, \quad (5)$$

где m — напряжение течения при $\varepsilon = 1,0$; n — показатель деформационного упрочнения.

Уравнение (5) описывает также кривые упрочнения при отрицательных температурах: до -196°C для сталей, до -50°C для алюминия.

Кривые упрочнения при $\varepsilon \geq 1,0 - 1,25$ имеют характер, приближающийся к прямолинейному. Кривые упрочнения при сжатии металлов и сплавов, предварительно упрочненных пластической деформацией в холодном состоянии, имеют другой характер (рис. 2). С достаточной для практики точностью кривые упрочнения металлов и сплавов, претерпевших предшествующую испытанию пластическую деформацию в холодном состоянии, как в случае совпадения направления приложения нагрузки при предварительном и последующем нагружении, так и при противоположных направлениях приложения нагрузки могут быть линеаризованы. Вследствие этого такие кривые упрочнения могут быть аппроксимированы выражением

$$\sigma'_s = \sigma'_{s0} + bq, \quad (6)$$

где σ'_s — напряжение течения предварительно деформированных в холодном состоянии сталей; σ'_{s0} — экстраполированный предел текучести кривых упрочнения предварительно деформированных сталей (отрезок, отсекаемый касательной прямой на оси ординат) [5]; b — коэффициент, характеризующий наклон линеаризованных кривых упрочнения.

1. ПРИМЕНЕНИЕ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ В ТЕОРИИ И ПРАКТИКЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И ШТАМПУЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ

Предельная пластичность металлов при холодной объемной штамповке зависит от схемы напряженного состояния и его интенсивности. Наиболее точные характеристики напряженного состояния следующие: коэффициент жесткости Бабиčkова [27]

$$K_{\text{ж}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_s}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения; коэффициент жесткости Смирнова — Аляева [27]

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_s}; \quad (1.2)$$

показатель напряженного состояния Колмогорова $\left(\frac{\sigma}{T}\right)$ [11], который в случае растяжения образцов при высоком гидростатическом давлении определяется по уравнению

$$\frac{\sigma}{kT} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{3}{4} \frac{d}{R}\right) - \frac{\Gamma P}{0,58\sigma_s}, \quad (1.3)$$

где d — диаметр поперечного сечения образца по шейке; R — радиус кривизны контура продольного сечения образца в месте шейки.

В области листовой штамповки кривые упрочнения служат для определения штампуемости. В случае одноосного или двухосного растяжения максимальная однородная деформация при максимальной нагрузке перед локализацией будет тем значительнее, чем больше показатель деформационного упрочнения n (Щеглов Б. А.). Равномерность распределения деформаций по штампуемой детали также зависит от величины n : чем больше n , тем более равномерно распределены деформации по детали (Щеглов Б. А.). Максимально допустимая деформация, зависящая от ряда факторов, возрастает с увеличением деформационного показателя упрочнения n [15]. Следовательно, чем больше n , тем выше штампуемость листовой заготовки.

В работе Матвеева А. Д. [15] показано, что величина деформации в момент нарушения устойчивости при растяжении как реальных стержней, так и листовых заготовок (в том числе биметаллических) при операциях листовой штамповки является функцией показателя деформационного упрочнения.

Предельное формоизменение при изгибе с растяжением тонкостенных стержней различных сечений также зависит от характеристик кривой упроч-

нения [15]. При раздаче длинной тонкостенной трубы с поперечной разнотолщиной или неоднородностью металла предельная деформация находится из выражения [15]

$$\epsilon_{0y} = n - \frac{\sqrt{3}}{2} \epsilon_0, \quad (1.4)$$

где ϵ_0 — исходная степень деформации.

При формовке листовой заготовки коническими пуансонами со скругленной по сфере вершиной предельный угол $\beta_{\text{пр}}$, характеризующий предельное углубление при заданных соотношениях размеров, также является функцией параметров кривой упрочнения [15].

$$n = \frac{1 - 2 \cos \beta_{\text{пр}}}{1 - \cos \beta_{\text{пр}}} \left(\epsilon_0 + 2 \ln \frac{2}{1 - \cos \beta_{\text{пр}}} \right). \quad (1.5)$$

Согласно исследованиям ряда авторов [30], деформация по толщине в полусе образца в момент нарушения устойчивости процесса при гидростатическом деформировании прямо пропорциональна показателю деформационного упрочнения:

$$\epsilon_{i0}^* \approx 0,25 + 1,1n; \quad (1.6)$$

$$\epsilon_{i0}^* \approx 0,375 + 0,7n; \quad (1.6a)$$

$$\epsilon_{i0}^* \approx 0,362 + 0,9n; \quad (1.6b)$$

$$\epsilon_{i0}^* \approx 0,364 + 0,727n. \quad (1.6в)$$

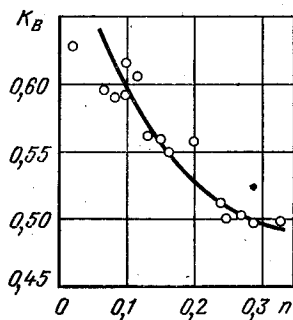
При глубокой вытяжке, когда полая деталь получается в основном вследствие деформации фланца, предельная степень деформации зависит от различных факторов, в том числе от среднего напряжения течения в зоне фланца.

Опыты Аверкиева А. Ю. [1] с листовыми материалами в отожженном и наклепанном вследствие пластической деформации состоянии показали, что с увеличением показателя деформационного упрочнения штампуемость тонколистового металла повышается (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Зависимость предельного коэффициента вытяжки K_B от n [1]

Очередность местного прекращения деформации и возникновения максимума давления рабочей среды при формоизменении жидкостным пуансоном длинной ленты, жестко закрепленной по четырем сторонам на матрице вдоль ее проема, зависит от параметров кривой упрочнения и разнотолщинности, причем, если $n - \frac{\sqrt{3}}{2} \epsilon_0 < 0,45$, то местное прекращение деформации наступит раньше, чем максимум давления рабочей среды [15].

Неравномерность деформации в конце периода устойчивого растяжения листа, а также в период раздачи жидкостью длинной тонкостенной трубы с поперечной разнотолщиной или неоднородностью металла наряду с дру-



гими факторами характеризуется параметрами кривой упрочнения [15]:

$$K = \frac{l}{l_0 e^{n-\varepsilon_0}}; \quad (1.7)$$

$$K_{\text{ц}} = \frac{l}{l_0} \exp\left(n - \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_0\right), \quad (1.8)$$

где K , $K_{\text{ц}}$ — коэффициенты неравномерности деформации при растяжении листа и цилиндрической трубы соответственно; l — предельная длина базы измерения, в исходном состоянии $l = l_0$.

В результате обобщения серии исследований по испытанию десяти сортов спокойной и кипящей стали, выполненных на заводах и в институтах Франции международной исследовательской группой по вопросам глубокой вытяжки (International Deep Drawing Research Gruppe — IDDRG), установлено, что между штампуемостью, определяемой испытанием по Эриксену, гидравлической формовкой — по Жовиньо и показателем деформационного упрочнения существует корреляционная зависимость (см. рис. 1.2).

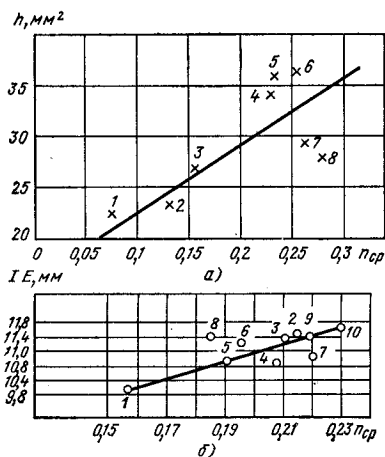


Рис. 1.2. Зависимость между средним показателем деформационного упрочнения по трем направлениям относительно направления прокатки n_{cp} и глубиной формовки после разрыва h при испытании гидравлической формовкой по Жовиньо (а) и глубиной вытянутой лунки IE при испытании по Эриксену (б):

1, 4, 6, 8 — кипящая сталь; 2, 3, 5, 7, 9 и 10 — спокойная сталь (Pomey G., Grumbach M.)

Группа IDDRG сравнением различных методов испытания на штампуемость листовых заготовок толщиной 1 мм из малоуглеродистых раскисленных сталей, двух марок коррозионно-стойких сталей типа 18-8, двух марок алюминия, алюминий-медного сплава с 3% молибдена, электролитической меди и латуни с 63% меди установила, что при испытании на гидравлическую формовку наблюдается четкое соответствие штампуемости и величины n .

Штампуемость листов из легких сплавов, определяемая испытанием по Жовиньо и Фукуи, также коррелирует с величиной n , хотя и не так четко, как у листов из сталей, латуни и меди.

Способность металла к глубокой вытяжке при испытании по Engenhardt В. также определяется величиной показателя деформационного упрочнения.

Köhler G., Vochinski E. (на семнадцати марках стали) установили, что при вытяжке квадратных и эллиптических деталей производство Rn (R — коэффициент нормальной анизотропии) является критерием успешной вытяжки этих деталей.

Для сложных штампованных деталей, получаемых сочетанием глубокой вытяжки с двухосным растяжением, штампуемость, определяемая по Фукуи, хорошо коррелирует с производением Rn .

Потеря устойчивости при глубокой вытяжке, изгибе пластин и их правке зависит от параметров кривых упрочнения: с увеличением n и уменьше-

нием m опасность потери устойчивости уменьшается, и легче проходит выправление дефектов [3].

При осадке цилиндрических заготовок момент появления неустойчивости деформации можно установить по показателю деформационного упрочнения n .

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Критерием устойчивости процесса деформации является предельное отношение a_{0*} продольных размеров заготовки к поперечным, характеризующее их формоизменение без изгиба. Для определения a_{0*} пользуются параметрами кривых упрочнения.

При осадке неупрочненных холодной пластической деформацией цилиндрических образцов с гладкими торцами и с торцовыми выточками, заполненными твердой смазкой, экстремальное первоначальное отношение высоты заготовки h_0 к диаметру d_0

$$a_{0*} = \frac{h_0}{d_0} = 2,24 \frac{\sqrt{n}}{\nu}, \quad (1.9)$$

где ν — коэффициент приведения высоты, зависящий от способа закрепления концов заготовки (в случае осадки образцов с гладкими торцами $\nu = 0,5$; при осадке образцов с торцовыми выточками, заполненными твердой смазкой, $\nu = 0,74 \div 0,785$).

По данным Мошнина Е. Н. и Ромашко Н. И., при осадке неупрочненных холодной пластической деформацией пластин

$$a_{0*} = \left(\frac{h_0}{S_0} \right)_{\text{пр}} = 6\sqrt{n}, \quad (1.10)$$

где S_0 — толщина пластины.

При высадке изделий на холодновысадочных и холодноштамповочных автоматах, как правило, используются металлы, упрочненные при волочении холодной пластической деформацией. Кривые упрочнения волоченных сталей имеют характер, отличный от кривых упрочнения термически обработанных и горячекатаных сталей [13]. Поэтому для определения предельных отношений заготовок при изготовлении стержневых изделий на холодновысадочных и холодноштамповочных автоматах как для операции обжатия части стержня проталкиванием через фильер матрицы, так и для операции высадки механические свойства деформируемых металлов должны учитываться по кривым упрочнения волоченых материалов.

Исследованиями автора совместно со Смирновым-Аляевым Г. А. установлено, что при изготовлении стержневых изделий из волоченных сталей на холодновысадочных и холодноштамповочных автоматах предельные отношения при обжатии части стержня путем проталкивания через фильер матрицы и высадке можно рассчитывать по формуле

$$a_{0*} = \frac{1,3}{\nu} \sqrt{\frac{b}{\sigma'_{s0} + 0,28b}}. \quad (1.11)$$

В случае высадки по схеме a (рис. 1.3) $\nu = 0,495 \div 0,507$; по схеме b $\nu = 0,354 \div 0,358$; по схеме α $\nu = 0,318 \div 0,321$; по схеме β $\nu = 0,45$ [для головок с небольшим отношением проекции диаметра головки к ее высоте $\left(\frac{D}{H} = 3,0 \div 3,1 \right)$] и $\nu = 0,477$ [для головок с большим отношением $\frac{D}{H}$ $\left(\frac{D}{H} = 5,0 \right)$]; при обжатии части стержня путем проталкивания через фильер матрицы ν может быть принято равным 0,5.

Величины σ'_{s0} и b , зависящие от природы деформируемого металла и степени деформации при волочении q_1 , для некоторых углеродистых и легированных сталей представлены на рис. 1.4 и 1.5.

При изготовлении стержневых изделий из отожженных металлов и сплавов предельные отношения рекомендуется рассчитывать по уравнению (1.9), используя при этом указанные значения коэффициента приведения высоты ν , зависящие от схемы деформации, либо по следующим формулам [24]:

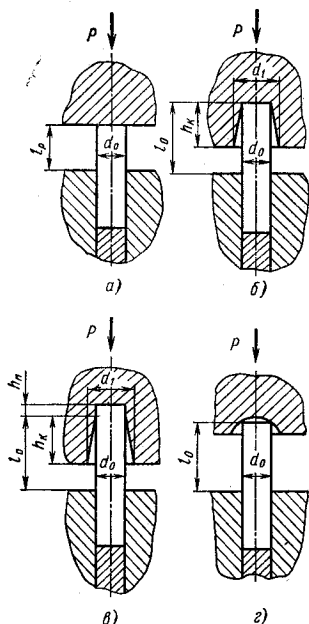


Рис. 1.3. Схема высадки изделий:

a — пуансоном с гладкими торцами; *b* — пуансоном с коническим гнездом; *v* — пуансоном с коническим гнездом и цилиндрическим пояском; *z* — пуансоном для оформления полукруглой головки; h_k — высота части заготовки, не закрепленная в матрице; h_k — глубина конического гнезда; l_0 — длина цилиндрического пояса; d_0 — диаметр заготовки; d_1 — больший диаметр конического гнезда

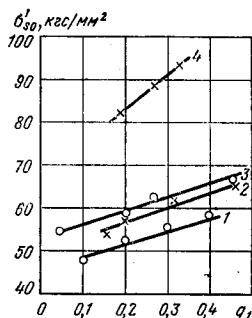


Рис. 1.4. Зависимость σ'_{s0} от q_1 для сталей:

1 — 08 кп; 2 — 15 кп; 3 — 25; 4 — 45X [28]

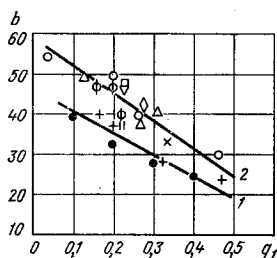


Рис. 1.5. Зависимость b от q_1 для сталей:

1 — низкоуглеродистых 08 кп (●), 10 кп (◻) и 15 (+); 2 — среднеуглеродистых 30 (◊), 35 (▽), 45 (△) и хромистых 20X (Φ), 35X (○), 40X (□) и 45X (×) [28]

a) для утолщения в виде усеченного конуса с цилиндрическим хвостовиком диаметром, равным диаметру заготовки,

$$a_{0*} = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{n} \frac{1}{K^3 (1-K^2)^{1/2}} + \frac{1}{6 \operatorname{tg} \gamma} \frac{1-K^3}{K^3}; \quad (1.12)$$

$$\frac{\pi}{4\nu} \sqrt{n} \frac{3-4K^2}{(1-K^2)^{3/2}} + \frac{1}{2 \operatorname{tg} \gamma} = 0, \quad (1.13)$$

где $K = \frac{d_0}{d}$ (d_0 — диаметр заготовки; d — больший диаметр конуса); γ — половина угла конуса при вершине;

б) для утолщения в виде двух усеченных конусов с цилиндрическими хвостовиками диаметрами, равными диаметру заготовки,

$$a_{0*} = \frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\bar{n}} \frac{1}{K^3 (1-K^2)^{1/2}} + \frac{1}{3 \operatorname{tg} \gamma} \frac{1-K^3}{K^3}; \quad (1.14)$$

$$\frac{\pi}{4\nu} \sqrt{\bar{n}} \frac{3-4K^2}{(1-K^2)^{3/2}} + \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} = 0. \quad (1.15)$$

В формулах (1.13) — (1.15) величину ν рекомендуется принимать равной 0,5 [24]. Для расчета a_{0*} по формулам (1.12) и (1.14) вначале определяют K по уравнениям (1.13) и (1.15).

Предельное отношение a_{0*} при обжатии части стержня путем проталкивания через фильер матрицы (осуществляется как самостоятельный процесс), при котором применяются отожженные или горячекатаные заготовки, может быть рассчитано по уравнению (1.9).

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В существующих формулах для определения усилий деформирования самых различных технологических процессов холодной штамповки механические свойства деформируемого металла учитываются величиной напряженности течения; потребные усилия деформирования будут тем выше, чем больше значение σ_s .

При идеальном деформировании (без потерь) металла объемом V потребная работа деформации в общем виде

$$A_{и} = V \int_0^{\varepsilon} \sigma_s d\varepsilon. \quad (1.16)$$

С учетом влияния внешнего трения полная потребная работа деформации

$$A = \frac{A_{и}}{\eta}. \quad (1.17)$$

Рекомендуется определять работу деформации конкретных технологических процессов либо по общим уравнениям (1.17) с указанием величины η для отдельных видов технологических процессов либо по формулам, в которые входят параметры, отражающие условия осуществления деформирования при том или другом технологическом процессе.

Изгибающий момент при чистом изгибе стержней

$$M = \frac{\sigma_{\max} J n^{2n}}{h^n}, \quad (1.18)$$

где σ_{\max} — напряжение в наружных волокнах; h — высота сечения стержня; J — момент инерции поперечного сечения стержня.

При изготовлении гнутых П-образных деталей из листовых заготовок для расчета изгибающего момента применяют формулу [17]

$$M = m' W \sigma_T, \quad (1.19)$$

где m' — относительный изгибающий момент, определяемый по уравнению

$$m' = 3 \frac{1 + \delta_{III}}{2 + n} \beta \left(\frac{\beta}{\epsilon_{III}} \right)^n \eta_1^2 \epsilon_{\theta n}^n \frac{\sigma_B}{\sigma_{\theta}}; \quad (1.20)$$

W — момент сопротивления сечения изгибу.

Здесь δ_{III} , ϵ_{III} — соответственно относительное удлинение и логарифмическая деформация в момент образования шейки при растяжении [ϵ_{III} может быть определено по зависимости $\epsilon_{III} = \ln(1 - \delta_{III})$]; β — коэффициент Лодэ; η_1 — коэффициент упрочнения; $\epsilon_{\theta n}$ — логарифмическая тангенциальная деформация наружных волокон при изгибе.

1.4. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Возникающее в процессе пластической деформации повышение температуры металла определяется с помощью напряжения течения [4]. Например, при процессе прессования изменение температуры металла dT в i -й точке очага деформации [4]

$$dT = \frac{\eta_k}{q_T \rho c t_{пл}} N_i dt, \quad (1.21)$$

где $N_i = \sigma_s \dot{\epsilon}_i$ — удельная работа деформации или удельная мощность внутренних сил ($\dot{\epsilon}_i$ — интенсивность скорости деформации); η_k — коэффициент, учитывающий изменение внутреннего потенциала деформируемого металла (для процесса горячей обработки $0,9 \leq \eta_k \leq 1,0$); q_T — механический эквивалент теплоты; ρ — плотность металла; c — удельная теплоемкость металла; $t_{пл}$ — температура плавления металла; dt — время деформации.

Повышение температуры при осадке заготовки вследствие превращения энергии деформации в тепловую энергию (по данным Müller Geck):

$$\Delta v_u = \frac{\sigma_s \epsilon}{c\rho}. \quad (1.22)$$

1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА

С помощью кривых упрочнения можно определить напряженно-деформированное состояние в отдельных местах отштампованной детали.

Используя разработанный Г. А. Смирновым-Аляевым [27] метод микроструктурного анализа, позволяющий полностью установить деформированное состояние металла в отдельных точках, и зная зависимость $\sigma_s = f(\epsilon)$ для рассматриваемого металла, можно определить напряженное состояние в отдельных зонах деформированного металла.

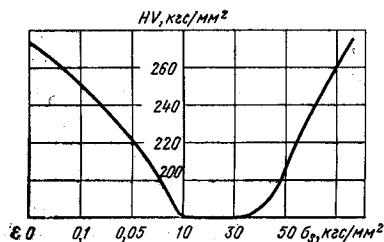


Рис. 1.6. Связь между твердостью по Виккерсу и интенсивностями напряжений и деформаций при сложном напряженном состоянии [8]

Напряженно-деформированное состояние деформированного тела можно определить, измеряя твердость в этом теле и используя тарировочный график напряжения течения — твердость — степень деформации (рис. 1.6), полученный при испытании рассматриваемого материала на сжатие, а также контролируя твердость его при различных степенях деформации [8].

1.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ

Кривые упрочнения дают возможность определить ряд механических свойств деталей, изготовленных с применением технологических процессов обработки металлов давлением, и деталей, подвергаемых пластическим деформациям в процессе их работы, и таким образом, оценить их эксплуатационные качества.

Так, по данным Лукьянова В. Ф., Джулай Л. Л., Фомина В. Н., запас пластичности при сложном напряженном состоянии непосредственно зависит от показателя деформационного упрочнения n : чем меньше n , тем ниже запас пластичности при прочих равных условиях и динамическая прочность детали при ее эксплуатации; при заданном соотношении компонентов напряжений и известном n можно определить разрушающее напряжение при трехосном растяжении.

По кривым упрочнения можно найти предельную прочность цилиндрических сосудов и оценить чувствительность металла к концентрации напряжений (Куркин С. А., Лукьянов В. Ф.).

По кривой упрочнения можно установить предел текучести упрочненного на заданную степень деформации металла. На примере исследования ряда чистых металлов и их сплавов, а также различных марок сталей установлено, что диаграммы усталости амплитудное напряжение σ_A — число циклов до разрушения N коррелируют с кривыми упрочнения [10]. Чем больше наклон кривых упрочнения в двойных логарифмических координатах, тем меньше наклон диаграмм усталости $\left(\frac{d\sigma_A}{dN}\right)$ [10]. Мясниковым А. М. установлено, что разница в наклонах кривых усталости при асимметричном цикле со средним растягивающим напряжением по сравнению с симметричным нагружением уменьшается с увеличением показателя деформационного упрочнения. В области больших долговечностей чувствительность к асимметрии цикла также связана с величиной усредненного показателя упрочнения. Rowe G. показано, что между усталостной прочностью и параметрами кривых упрочнения связь значительно лучше, чем между усталостной прочностью и пределом прочности.

О влиянии предварительной пластической или термической обработки, микроструктуры, легирования и других факторов на усталостную прочность можно судить по кривой упрочнения.

1.7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ИЗМЕНЕНИЙ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Кривые упрочнения отражают внутренние структурные изменения, возникающие в процессе пластической деформации либо до нее вследствие какой-либо термической или пластической обработки. Это позволяет изучить многие зависимости, вызванные внутренними изменениями строения металлов и сплавов.

Так, построением кривых напряжение течения — температура можно установить температурный диапазон деформационного старения и температуру максимума «деформационного горба», а также изучить влияние скорости деформации на протекание процесса деформационного старения, что необходимо для назначения правильных режимов пластической и термической обработки металлов. Температура аллотропических превращений также будет

обнаружена с помощью вышеуказанных кривых. Использование кривых упрочнения может быть применено для анализа тонкой структуры стали.

Гладштейн Л. И., Соколовский П. И. и Рудченко А. В. склонность сталей к деформационному старению определяли совмещением кривых упрочнения стали в исходном состоянии и кривой упрочнения этой же стали после предварительной деформации и старения. Величина упрочнения, возникающего вследствие старения, определяется как разность ординат кривых упрочнения исходного и состаренного металлов при одинаковых значениях деформации.

Стародубовым К. Ф., Поляковым С. Н. и Наугольниковым Л. М. путем использования анализа кривых упрочнения были изучены различные процессы, протекающие при отпуске предварительно нормализованной и отпущенной при температурах 150—700° С стали Ст3 сп.

2. ПОКАЗАТЕЛЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Показатель деформационного упрочнения n характеризует способность металлов к упрочнению в процессе пластической деформации. Его величина при растяжении имеет функциональную связь с относительным сужением после разрыва ψ [5] и численно равна максимальному равномерному удлинению ε_p :

$$n_3 = \frac{\psi}{1 - \psi}; \quad (2.1)$$

$$n = \varepsilon_p, \quad (2.2)$$

где n_3 — показатель деформационного упрочнения в случае построения кривых упрочнения в координатах напряжение течения — относительное сужение.

2.1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ n

Кривая упрочнения, аппроксимированная выражением (5), в логарифмических координатах имеет вид прямой линии. Показатель деформационного упрочнения n численно равен тангенсу угла наклона прямой $\lg \sigma_s = \lg m + n \lg \varepsilon$ к оси степени деформации. Следовательно, величина n может быть определена графически при построении кривой упрочнения в логарифмических координатах. Как показывает опыт, графический метод обеспечивает недостаточно высокую точность ($\pm 10\%$) и поэтому не может быть признан в качестве основного.

При аналитическом методе

$$n = \frac{\lg \sigma_{s2} - \lg \sigma_{s1}}{\lg \varepsilon_2 - \lg \varepsilon_1}, \quad (2.3)$$

где $\sigma_{s2} > \sigma_{s1}$ и $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

Аналитический метод определения показателя n дает наибольшую ошибку $\sim 3\%$, если нагрузка находится с точностью до 1% , а линейные размеры образцов с точностью до $0,1$ мм, что на практике вполне выполнимо.

Поскольку показатель деформационного упрочнения n численно равен максимальному равномерному удлинению ε_p , при испытании на растяжение его можно найти из следующего выражения:

$$n = \varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_B}, \quad (2.4)$$

где d_0 , d_B — диаметр образца до испытания и в момент максимальной нагрузки соответственно.

Для листовых материалов при наличии кривых упрочнения величину n можно определить графически либо аналитически по уравнению (2.3). Существуют и другие методы определения параметра n для листовых материалов, базирующиеся главным образом на учете исходных и конечных размеров образцов, исходных размеров образцов и логарифмических степеней деформации, логарифмических степеней деформации и максимальной нагрузки при разрыве.

Достаточно высокую точность определения n обеспечивают следующие методы:

а) испытания на растяжение с измерением степеней деформации с помощью механического прибора индикаторного типа со встроенным в него фотоэлементом; при этом n рассчитывается по формуле

$$n = \frac{\lg \frac{P_2}{P_1} + 0,4343 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\lg \varepsilon_2 - \lg \varepsilon_1}, \quad (2.5)$$

где P_1, P_2 — приложенные усилия в разные моменты деформации; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — степени деформации, соответствующие нагрузкам P_1 и P_2 ;

б) испытания на растяжение на специальной машине, оснащенной электронными вычислительными узлами, позволяющими получать средние и мгновенные величины n .

Средний показатель деформационного упрочнения листовых материалов

$$n_{\text{ср}} = \frac{1}{4} (n_0 + 2n_{45} + n_{90}), \quad (2.6)$$

где n_0, n_{45}, n_{90} — показатели деформационного упрочнения в продольном, поперечном направлениях и под углом 45° к оси прокатки.

2.2. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ n ПРУТКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Химический состав. Увеличение содержания углерода в углеродистых сталях вызывает уменьшение n по экспоненциальной зависимости для всех видов предварительной обработки (рис. 2.1, 2.2).

Существенное влияние содержания углерода на показатель деформационного упрочнения наблюдается у сталей с содержанием углерода до 0,6%. Дальнейшее увеличение содержания углерода практически не сказывается на величине n . Абсолютная величина n , при прочих равных условиях, тем выше, чем на меньшую прочность обработана сталь.

Величины n для технического железа и ряда углеродистых сталей, прошедших различные виды предшествующей обработки, представлены в табл. 2.1 и 2.2. Добавление в незначительных количествах таких легирующих элементов, как хром, марганец, кремний, никель, молибден, медь, уменьшает величины показателей деформационного упрочнения. При прочих равных условиях, легированные конструкционные стали обладают меньшим показателем деформационного упрочнения, чем углеродистые конструкционные. В табл. 2.3 для сравнения приведены значения n отожженных и горячекатаных хромистых и углеродистых сталей с примерно одинаковым содержанием основных элементов, кроме хрома. Данные табл. 2.3 свидетельствуют о том, что присутствие хрома в углеродистых сталях в количестве (0,9—1,03)% вызывает уменьшение n на 0,025—0,045. Добавление марганца в количестве (0,3—0,5)% уменьшает n примерно на 0,02 (см. рис. 2.2).

По данным Приданцева М. В. и Коперниковой В. Н., в сталях ГСНД при увеличении содержания меди от 0,23 до 0,56% n уменьшается от 0,28 до 0,20; в сталях 17ГСНД $n = 0,27$ при содержании 0,30% меди и $n = 0,18$ при содержании меди 0,90%.

Различно по своему характеру влияние на показатель n постоянных примесей в стали: азота, кислорода, фосфора и серы. Кислород в чистом железе не вызывает изменения n , а в низкоуглеродистой кипящей стали уменьшает его (см. рис. 2.2). Фосфор вызывает весьма существенное уменьшение n для чистого железа и незначительное уменьшение для низкоуглеродистой кипящей стали: увеличение содержания фосфора в чистом железе до 0,105% понижает величину

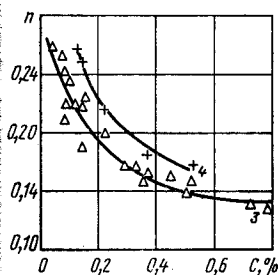
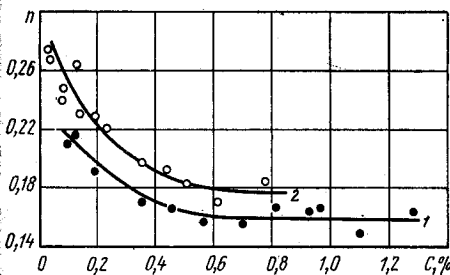


Рис. 2.1. Зависимость n от содержания углерода (по данным автора):

1 — неполный отжиг; 2 — отжиг; 3 — горячая прокатка; 4 — нормализация

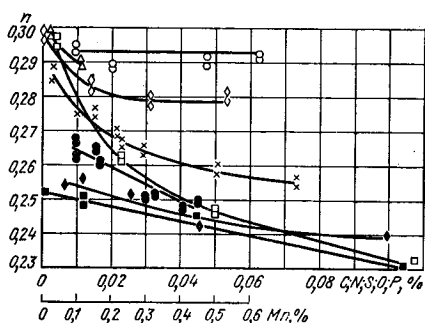


Рис. 2.2. Зависимость n от содержания С (×), N (Δ), S (◆, ○, ●), P (□, ■), Mn (◇) в чистом железе (×, Δ, ◇, ○, □) и низкоуглеродистой кипящей стали (●, ◆, ■) (по Masui H., Kawaharada M., Takechi H.)

n на 0,065, а в кипящей низкоуглеродистой стали только на $\sim 0,022$. Увеличение содержания серы в кипящей стали уменьшает n еще в меньшей степени, чем фосфор: примерно на 0,015 при возрастании содержания серы до 0,10%.

2.1. Значения показателя деформационного упрочнения n технического железа

| Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|-------------------------|------|------|-------|-------|---------------------------|----------------|---|--------------------------------|
| C | Si | Mn | P | S | | | | |
| 0,025 | 0,08 | 0,10 | 0,01 | 0,02 | Отжиг | В ₀ | 0,276; ЛГ | По данным автора |
| 0,03 | — | 0,17 | 0,012 | 0,015 | — | | 0,23 | [43] |
| 0,038 | 0,01 | 0,33 | 0,010 | 0,023 | Отжиг | | $a=8,3 \cdot 10^{-3} + 8,3 \cdot 10^{-1}$ | Roger Cannon Oleg D.Scherby |
| — | — | — | — | — | — | — | 0,28 | [2] |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4

2.2. Значения показателя деформационного упрочнения n углеродистых сталей

| Название и марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|-------------------------|-------------------------|------|------|-------|-------|---------------------------|----------------|--|-----------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | | | | |
| Низкоуглеродистая сталь | 0,058 | 0,17 | 0,20 | — | — | Горячая прокатка | A | 0,252; ЛМ | По данным автора |
| | 0,05 | — | — | — | — | | Д | 0,244 | [40] |
| St34 | 0,05 | 0,37 | 0,37 | 0,024 | 0,038 | — | В ₀ | 0,208 | [43] |
| | 0,07 | 0,03 | 0,41 | 0,041 | 0,033 | | | 0,205 | |
| Ск10 | 0,07 | 0,27 | 0,28 | — | — | 0,20 | | | |
| St37 | | 0,06 | 0,36 | 0,023 | 0,031 | 0,215 | | | |
| Ma8 | 0,08 | 0,03 | 0,30 | 0,012 | 0,014 | Отжиг | В ₀ | 0,24—0,25; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | [45] |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,21; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | |
| Мик7 | 0,08 | 0,03 | 0,39 | 0,04 | 0,009 | Отжиг | | 0,23—0,24; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,22; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | |
| | | | | | | Отжиг | Д | 0,207; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | |
| St34 или St37 | 0,07—0,08 | — | — | — | — | В ₀ | 0,24 | Schwandt S. | |
| 08 кп | 0,09 | — | 0,40 | — | — | Горячая прокатка | A | 0,237; ЛМ | По данным автора |
| Ск10 | 0,10 | 0,25 | 0,35 | 0,014 | 0,028 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,21 | [43] |
| 10 | 0,11 | 0,21 | 0,45 | — | — | Горячая прокатка | A | 0,22; ЛМ | По данным автора |
| Ск15 | 0,12 | 0,24 | 0,44 | 0,017 | 0,026 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,215 | [43] |
| Ск10 | 0,13 | 0,23 | 0,31 | 0,010 | 0,022 | Горячая прокатка | | 0,20 | |
| С10 | 0,13 | — | — | — | — | | | Отжиг° Нормализация° | 0,22 |
| | 0,13 | 0,24 | 0,31 | 0,010 | 0,022 | 0,266 0,256 | | | — |

| Название и марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n; скорость деформации | Литературный источник | | |
|------------------------|-------------------------|------|------|-------|--------------|---------------------------|---------------------------|--|-----------------------|------------------|-------------|
| | C | Si | Mn | P | S | | | | | | |
| Ск15 | 0,13 | 0,27 | 0,41 | 0,013 | 0,03 | Отжиг | В ₀ | 0,23 | [45] | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,19 | | | |
| | | | | | | Отжиг | Д | 0,182 ÷ 0,207; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,169—0,174; $a=10^{-3} \div 10^{-1}$ | | | |
| С15 | — | — | — | — | Нормализация | В ₀ | 0,246 | [43] | | | |
| | | | | | Отжиг | Д | 0,18 | Herold G. | | | |
| 15 | 0,15 | 0,27 | 0,43 | — | — | Горячая прокатка | А | 0,224; ЛМ | По данным автора | | |
| Ст3 | — | — | — | — | — | — | Е | 0,23 | [25] | | |
| 20 | 0,19 | 0,37 | 0,37 | — | — | Горячая прокатка | А | 0,218; ЛМ | По данным автора | | |
| St54 | 0,19 | 0,26 | 0,55 | 0,047 | 0,03 | Отжиг ^o | В ₀ | 0,227 | [43] | | |
| | | | | | | Нормализация ^o | | 0,218 | | | |
| Ск22 | 0,19 | 0,27 | 0,34 | 0,010 | 0,021 | Неполный отжиг | | 0,192 | | | |
| St42 | 0,22 | — | 0,44 | 0,017 | 0,043 | Отжиг ^o | | 0,220 | | | |
| | | | | | | Нормализация ^o | | 0,217 | | | |
| | | | | | | 0,22 | | — | | 0,49 | 0,017 |
| 25 | 0,29 | 0,13 | 0,55 | — | — | Горячая прокатка | | А | | 0,20 | Schwandt S. |
| | | | | | | | | | | 0,177 | |
| 30 | 0,32 | 0,25 | 0,58 | — | — | | | 0,177 | | По данным автора | |
| 35 | 0,36 | 0,29 | 0,66 | — | — | | | 0,173 | | | |
| С35 | 0,35 | — | — | — | — | | В ₀ | 0,17 | Schwandt S. | | |
| | | | | | | | | 0,18 | | | |
| | | | | | | | 0,36 | 0,27 | 0,69 | 0,025 | 0,032 |
| Ск35 | 0,37 | 0,27 | 0,64 | 0,017 | 0,019 | | Нормализация ^o | 0,175 | | | |
| | | | | | | | Неполный отжиг | 0,185 | | | |

| Название и марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | v; скорость деформации | Литературный источник |
|------------------------|-------------------------|------|------|-------|-------|---------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | | | | |
| C45 | 0,44 | 0,21 | 0,70 | 0,021 | 0,020 | Отжиг° | Д | 0,196 | — |
| 45 | 0,45 | 0,20 | 0,66 | — | — | Горячая прокатка | А | 0,173 | По данным автора |
| Ск45 | 0,46 | 0,28 | 0,60 | 0,022 | 0,024 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,166 | [43] |
| 45 | 0,45 | 0,20 | 0,66 | — | — | Нормализация | А | 0,196 | По данным автора |
| | — | — | — | — | — | — | Е | 0,18 | — |
| 50 | 0,50 | 0,27 | 0,70 | — | — | Горячая прокатка | А | 0,168 | По данным автора |
| St70 | 0,51 | 0,28 | 0,55 | 0,016 | 0,041 | — | В ₀ | 0,175 | [43] |
| | | | | | | Отжиг° | | 0,182 | — |
| | 0,51 | 0,28 | 0,55 | 0,016 | 0,041 | Нормализация° | | 0,178 | |
| | 0,51 | — | — | — | — | Горячая прокатка | | 0,16 | Schwandt S. |
| Ск60 | 0,57 | 0,24 | 0,76 | 0,018 | 0,024 | Неполный отжиг | | 0,158 | [43] |
| С60 | 0,62 | 0,24 | 0,40 | 0,025 | 0,28 | Отжиг° | | 0,169 | — |
| | — | — | — | — | — | — | Д | 0,14 | Herold G. |
| Инструментальная сталь | 0,7 | 0,22 | 0,17 | 0,07 | 0,023 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,157 | [43] |
| У7 | 0,72 | 0,23 | 0,20 | — | — | Горячая прокатка | А | 0,153 | По данным автора |
| У8 | 0,78 | 0,26 | 0,21 | — | — | Отжиг | | 0,184 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,15 | |
| Инструментальная сталь | 0,81 | 0,24 | 0,26 | 0,006 | 0,025 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,167 | [43] |
| С100W1 | 0,97 | 0,20 | 0,19 | 0,010 | 0,011 | Неполный отжиг | В ₀ | 0,163 | [43] |

| Название и марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n: скорость деформации | Литературный источник |
|------------------------|-------------------------|------|------|-------|--------|---------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | | | | |
| Инструментальная сталь | 1,10 | 0,25 | 0,22 | 0,06 | 0,01 | Неполный отжиг | B ₀ | 0,149 | [43] |
| | 1,29 | 0,19 | 0,36 | 0,007 | 0,0017 | Неполный отжиг | | 0,166 | |
| 7S10* | 0,10 | 0,03 | 0,57 | 0,052 | 0,122 | Отжиг | B ₀ | 0,21 | [45] |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,22 | |
| | | | | | | Нормализация + старение | | 0,13 | |
| | | | | | | Отжиг | Д | 0,186 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,166 | |
| | | | | | | Нормализация + старение | | 0,147 | |
| 1CS10* | 0,12 | 0,03 | 0,56 | 0,009 | 0,129 | Отжиг | B ₀ | 0,22 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,20 | |
| | | | | | | Нормализация + старение | | 0,155 | |
| | | | | | | Отжиг | Д | 0,21 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | 0,17 | |

Примечания. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

2. Со значком ° значения n рассчитаны автором по экспериментальным данным работ [38, Kraft- und Arbeitsbedarf für Kalt- und Warmstauchen, Berlin, 1960, S. 64].

Влияние основных легирующих элементов на величину n для отожженных по различным режимам сталей можно учитывать с помощью формулы (по Jonk R., Just E., Wicke)

$$n = 0,22 - 0,14 Mo - 0,04 Cr - 0,09 Si - 0,02 Mn - 0,01 Ni + 0,03C, \quad (2.7)$$

где Mo, Cr, Si, Mn, Ni, C — содержание легирующих элементов и углерода, % по массе.

В табл. 2.4 приведены значения n для ряда конструкционных и инструментальных легированных сталей, претерпевших различные виды предшествующей обработки.

У высоколегированных сталей величины n для одних и тех же состояний металлов отличаются друг от друга в несколько раз в зависимости от того,

к какому классу сталей принадлежит рассматриваемый сплав. Так, высоколегированные ферритные стали имеют низкое значение показателя деформационного упрочнения, а аустенитные — весьма высокое по сравнению со сталями ферритно-перлитного класса (табл. 2.5).

В некоторых сплавах цветных металлов повышение содержания легирующих элементов вызывает увеличение показателя деформационного упрочнения (рис. 2.3).

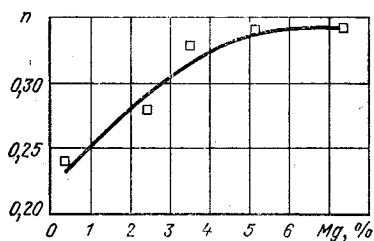


Рис. 2.3. Зависимость n от содержания магния в алюминий-магниевых сплавах (Perce and Joshi)

Значения n для цветных металлов и сплавов представлены в табл. 2.6.

Предварительная термическая или пластическая обработка. Проведенные до испытания пластическая или термическая обработки оказывают существенное влияние на показатель деформационного упрочнения. Наибольшим показателем обладают стали отожженные; нормализация, а также закалка с последующим отпуском вызывают уменьшение n (табл. 2.2 и 2.4 и рис. 2.1). При этом уменьшение n при эквивалентных условиях тем меньше, чем на большую твердость (прочность) термообработана сталь. Так, у за-

2.3. Сравнение показателей деформационного упрочнения n углеродистых и хромистых сталей

| Марка стали | Предварительная обработка | Содержание элементов, % | | | | n |
|-------------|---------------------------|-------------------------|------|------|------|-------|
| | | C | Mn | Si | Cr | |
| St54 | Отжиг | 0,19 | 0,55 | 0,26 | — | 0,227 |
| 20X | | | 0,59 | 0,30 | 0,91 | 0,204 |
| C35 | | 0,36 | 0,69 | 0,27 | — | 0,196 |
| 40X | | 0,38 | 0,62 | 0,32 | 1,03 | 0,153 |
| 15 | Горячая прокатка | 0,15 | 0,43 | 0,27 | — | 0,224 |
| 15X | | 0,13 | 0,42 | 0,32 | 0,90 | 0,197 |
| | | | 0,49 | — | 1,0 | 0,179 |
| 45 | | 0,45 | 0,66 | 0,20 | — | 0,173 |
| 45X | | 0,44 | 0,61 | 0,32 | 0,90 | 0,148 |

Примечание. Пояснения по маркам сталей см. на с. 3, 4.

2.4. Значение показателя деформационного упрочнения для конструкционных и инструментальных легированных сталей

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n; скорость деформации | Литературный источник |
|-------------|-----------------------------|-----------|------|------|----|---|---|-----------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S | | | | |
| 15X | 0,13 | 0,42 | 0,32 | 0,9 | — | — | — | Горячая прокатка | A | 0,197; ЛГ | По данным автора |
| | | 0,49 | — | 1,0 | — | — | — | | | 0,179; ЛГ | |
| 15Cr3 | — | — | — | — | — | — | — | | B ₀ | 0,18 | Schwandt S. |
| 20X | 0,24 | 0,67 | 0,25 | 0,91 | — | — | — | | Отжиг | A | 0,186; ЛГ |
| | | | | | | | | Нормализация | 0,204; ЛГ | | |
| | Закалка+отпуск при t=650° C | 0,191; ЛГ | | | | | | | | | |
| | Закалка+отпуск при t=500° C | 0,113; ЛГ | | | | | | | | | |
| 35X | — | — | — | — | — | — | — | Горячая прокатка | A | 0,112; ЛГ | По данным автора |
| | | | | | | | | | | 0,166; ЛГ | |
| 40X | 0,38 | 0,62 | 0,32 | 1,03 | — | — | — | Отжиг | A | 0,153; ЛГ | По данным автора |
| | | | | | | | | Нормализация | | 0,128; ЛГ | |
| | | | | | | | | Закалка+отпуск при t=600° C | | 0,134; ЛГ | |
| | | | | | | | | Закалка+отпуск при t=500° C | | 0,102; ЛГ | |
| | | | | | | | | Закалка+отпуск при t=400° C | | 0,104; ЛГ | |

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | л; скорость деформации | Литературный источник |
|------------------------|-------------------------|------|------|------|------|-------|-------|---|----------------|------------------------|----------------------------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S | | | | |
| 41Cr4 | — | — | — | — | — | — | — | Горячая прокатка | B ₀ | 0,15 | Schwandt S. |
| 45X | 0,44 | 0,61 | 0,19 | 0,90 | — | — | — | | A | 0,148; ЛГ | По данным автора |
| 11523* | 0,21 | 1,34 | 0,30 | — | — | 0,043 | 0,023 | Отжиг | B ₀ | 0,225 | Расчет сделан по данным Pasek V. |
| | | | | | | | | Нормализация | | 0,160 | |
| 10Г2 | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг ($t=860^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | A | 0,19; ЛГ | По данным автора |
| 16MnCr5 | 0,16 | 1,20 | 0,28 | 1,02 | — | 0,08 | 0,017 | Отжиг | B ₀ | 0,16—0,17 | [45] |
| | | | | | | | | Горячая прокатка | | 0,14—0,15 | |
| | | | | | | | | Нормализация+старение | | 0,14—0,15 | |
| 65Г | 0,65 | 0,98 | 0,23 | — | — | — | — | Горячая прокатка | A | 0,156; ЛГ | По данным автора |
| 40ХН | 0,11 | 0,79 | 0,17 | 1,13 | 1,02 | — | — | Отжиг ($t=800^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | | 0,144; ЛГ | |
| 13240* | 0,36 | 1,18 | 1,21 | — | — | 0,016 | 0,034 | Отжиг | B ₀ | 0,175 | Расчет сделан по данным Pasek V. |
| | | | | | | | | Нормализация | | 0,145 | |
| Сталь, содержащая 1%Cu | 0,05 | — | — | — | 1,0 | — | — | Горячая прокатка | Д | 0,198 | [40] |
| | | | | | | | | Горячая прокатка + старение при $t=500^{\circ}\text{C}$ | | 0,140 | |

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|------|--------|------|------|-------|-------|--------------------------------|----------------|-----------|--|
| 8ХФ (0,21%V) | 0,84 | — | — | 0,70 | — | — | — | Горячая прокатка | А | 0,166; ЛГ | По данным автора |
| 9SMn28* | 0,11 | 1,12 | < 0,03 | — | — | 0,07 | 0,32 | Отжиг | Д | 0,188 | [45] |
| | | | | | | | | Горячая прокатка | | 0,17 | |
| | | | | | | | | Нормализация+ +старение | | 0,144 | |
| | | | | | | | | Отжиг | В _о | 0,205 | |
| | | | | | | | | Горячая прокатка | | 0,21 | |
| | | | | | | | | Нормализация+ +старение | | 0,14 | |
| 12ХН3А | 0,16 | 0,40 | 0,36 | 0,66 | 2,81 | — | — | Отжиг | А | 0,193; ЛГ | По данным автора |
| | | | | | | | | Нормализация | | 0,174; ЛГ | |
| | | | | | | | | Закалка+отпуск при t=600° С | | 0,097; ЛГ | |
| Горячая прокатка | 0,171; ЛГ | | | | | | | | | | |
| 40ХНМА (0,15—0,25% Мо) | 0,37 | 0,60 | 0,24 | 0,66 | 1,39 | — | — | Отжиг | | 0,134; ЛГ | |
| | | | | | | | | Нормализация | | 0,123; ЛГ | |
| | | | | | | | | Закалка+отпуск при t=600° С | 0,097; ЛГ | | |
| 40ХНМА (0,25% Мо) | 0,43 | 0,69 | 0,19 | 0,74 | 1,55 | — | — | Горячая прокатка | | 0,157; ЛГ | |
| 30ХГСА | 0,34 | 0,98 | 1,13 | 1,08 | — | — | — | Отжиг | | 0,169 | |
| 14331* | 0,28 | 0,95 | 1,20 | 0,86 | 0,17 | 0,018 | 0,016 | Отжиг | В _о | 0,186 | Расчет сделан по данным Pasek V. |
| | | | | | | | | Нормализация | | | |

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | Предварительная обработка | Вид испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник | | |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------|------|-------------------|-------------------|---|---------------|-------------------------------|--|---|--------------------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S | | | | | | |
| 18ХГТ | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг ($t=860^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,1741; ЛГ | По данным автора | | |
| 17ГСНД (0,76% Cu) | 0,16 | 1,39 | 0,54 | — | 0,70 | 0,005 | 0,05 | Нормализация ($t=920^{\circ}\text{C}$, 0,5 ч) + старение ($t=500^{\circ}\text{C}$, 3 ч) | Д | 0,22; $\delta=1,7$ | Приданцев М. В., Коперникова В. Н. | | |
| 17ГСАЮ (0,063% Al) | 0,17 | 1,35 | 0,64 | — | 0,05 | 0,004 | 0,05 | | | | | Нормализация ($t=920^{\circ}\text{C}$, 0,5 ч) | 0,27; $\delta=1,7$ |
| 17ГСАФ (0,15% V) | 0,16 | 1,33 | 0,58 | — | 0,05 | 0,004 | 0,007 | | | | | — | 0,19; $\delta=1,7$ |
| ХВГ (1,32% W) | 0,95 | 1,05 | 0,28 | 0,98 | 0,19 | 0,025 | 0,030 | Отжиг | В | 0,23; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | Расчет сделан по данным Таловой В. Н., Мурасова А. Ш., Наумчева Б. Н. | | |
| 5ХНВ (0,64% W) | 0,56 | 0,63 | 0,16 | 0,71 | — | — | — | | | 0,146; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| 7Х3 | 0,68 | 0,31 | 0,25 | 3,7 | — | 0,025 | 0,020 | | | 0,160; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| X12Ф (0,35% V) | 1,58 | 0,23 | 0,17 | 11,9 | 0,25 | 0,020 | 0,026 | | | 0,135; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| 3Х2В8Ф (7,93% W; 0,45% V; 0,18% Cu) | 0,38 | 0,34 | 0,18 | 2,46 | 0,21 | 0,024 | 0,025 | | | 0,165; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | | | |
| 20Х13 | 0,17 | 0,58 | — | 12,58 | — | — | — | Отжиг ($t=870^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,2067; ЛГ | По данным автора | | |
| Р6М3 | — | — | — | — | — | — | — | — | Е | 0,13; $\delta=1,7$ | [25] | | |
| Р12 (12—13% W; 1,5—1,9% V) | 0,8— 0,9 | Не более 0,4 | Не более 0,5 | 3,1— 3,6 | 0,4 | Не более 0,030 | Не более 0,030 | | | 0,11; $\delta=1,7$ | | | |
| Р18 | 0,7— 0,8 | Не более 0,4 | Не более 0,5 | 3,8— 4,4 | 0,4 | Не более 0,030 | Не более 0,030 | | | 0,10; $\delta=1,7$ | | | |
| Р18 (17,0—18,5% W; 1,0—1,4% V) | 0,7— 0,8 | Не более 0,4 | Не более 0,5 | 3,8— 4,4 | 0,4 | Не более 0,030 | Не более 0,030 | Отжиг | В | 0,147; $a=3 \cdot 10^{-3}$ | Расчет сделан по данным Таловой В. Н., Мурасова А. Ш. и Наумчева Б. А. | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

2.5. Значения показателей деформационного упрочнения
высоколегированных ферритных и аустенитных сталей

| Марка стали | Вид предшествующей обработки, химический состав | Вид испытания | Температура, °С | n ; скорость деформации | Литературный источник* |
|---------------------------------|---|----------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------|
| 12X18H9 | Нормализация | В ₀ | 20 | 0,625 | |
| | | | 150 | 0,4663 | |
| 12X18H9T | Закалка в воде от $t=1050^{\circ}\text{C}$ | А | | 0,390 | По данным автора |
| | Закалка в масле от $t=1050^{\circ}\text{C}$ | | | 0,370 | |
| X5CrNiMo18.10 (типа 18-8) | Закалка от $t=1080^{\circ}\text{C}$ | | 20 | 0,526 | Schwandt S. |
| | — | | | 0,54 | |
| X18CrNiTi18.10 (типа 18-8) | Закалка в воде от $t=1050^{\circ}\text{C}$ (C=0,09%, Mn=1,12%; Cr=17,50%; Ni=9,90%; Ti=0,72%) | В | 100 | 0,4663; $a=1,5$ | |
| | | | | 0,52 $a=90$ | |
| X12CrNi 18.10 (типа 18-8) | | | 20 | 0,534 | Neubauer A., Meyer P. Osterburg U. |
| | | | | X8CrNiMoTi 18.10 | |
| X12CrNi 17.7(A) (типа 18-8) | | Д | 100 | 0,713 | |
| | | | | 0,6371 | |
| X12 CrNi 17.7(B) (типа 18-8) | | В | 20 | 0,4452 | |
| | | | | Д | |
| X12 CrNi 18.8 (типа 18-8) | | | 20 | 0,613 | |
| | | | | Д | |
| X5 CrNi 18.9 (типа 18-8) | | В | 20 | 0,60 | Schwandt S. |
| X5 CrNi 18.9 (типа 18-8) | | В | 20 | 0,60 | Schwandt S. |

| Марка стали | Вид предшествующей обработки, химический состав | Вид испытания | Температура, °С | μ ; скорость деформации | Литературный источник* |
|---|--|---------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|
| T546-1 ^a (типа 18-8) | Отжиг | Д | 25 | 0,5067 | [41] |
| T5482-1 ^a | — | | | 0,5067 | |
| 305 ^a | C=0,12% max; Mn=2,0%; Si=1,0%; Cr=17,0÷ ÷19,0%; Ni=10,5÷ ÷13,0% | В | 20 | 0,475 | Таваарвек, Сауэрби, Пламитри |
| X18 CrNi 18.12 (типа 18-12) | — | | | 0,4557 | |
| | | Д | 100 | 0,3040 | |
| | | | | 0,3839 | |
| 10X17H13M2T | Закалка в воде от $t=1100^{\circ}\text{C}$ | А | 20 | 0,365 | По данным автора |
| Сталь 17 Cr-15Ni- 0,45N ^a | Отжиг; C=0,044÷ ÷0,14%; Mn=1,07÷2,65%; Ni=9,23÷14,1%; Cr=16,3÷20,6%; N=0,036÷0,093% | Д | 25 | 0,4778 | [41] |
| 20X23H18 | Закалка в масле от $t=1100^{\circ}\text{C}$ | В | | 0,328 | |
| X15 CrNi Si25.20 (типа 25-20) | Закалка | | | 0,3346 | |
| 302 ^a | C=0,08% max; Mn=2,0%; Si=1,0%; Cr=17,0÷ ÷19,0%; Ni=8,0÷ ÷10%; Cu=3,0÷4,0% | Д | 20 | 0,34 | Таваарвек, Сауэрби, Пламитри |
| X22CrNi17 | — | В | | 0,11 | Schwandt S. |
| | | | | 0,18 | |
| X10Cr3 | Отжиг | | | 0,107; $a=1,5$ | |
| | | | | 0,094; $a=90$ | |

* В тех графах, где не указаны фамилии исследователей, величины μ рассчитаны автором по экспериментальным данным работ [9, 22, 26, 38].

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

2.6. Значения показателя деформационного упрочнения цветных металлов и сплавов

| Металл, сплав и его марка | Предварительная обработка | Вид испытан | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|---------------------------|--|-------------|-----------------------------------|------------------------------|
| М2 | Отжиг ($t=540^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,47; ЛГ | По данным автора |
| Медь 99,99% | — | Д | 0,45 | Tiainen T., Kettunen P.O. |
| Медь | Отжиг | | 0,336; $\partial=2$ | Heye W. |
| | — | | 0,4054; $a=1,75 \cdot 10^{-3}$ | [41] |
| | — | Е | 0,37 | [25] |
| Л63 | Отжиг ($t=600^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,406 | По данным автора |
| Латунь CuZn15 (15%Zn) | — | Д | 0,410; $\partial=2$ | Heye W. |
| Латунь CuZn30 (30%Zn) | | | 0,501; $\partial=2$ | |
| ЛС59-1 | | Е | 0,44 | [25] |
| ЛС59-1В | Отжиг ($t=600^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,277; ЛГ | По данным автора |
| Латунь 70-30 (30%Zn) | Отжиг | Д | $d_3=0,015$ мм | 0,489 |
| | | | $d_3=0,02$ мм | 0,51 |
| | | | $d_3=0,025$ мм | 0,55 |
| | | | $d_3=0,035$ мм | 0,574 |
| | | | $d_3=0,12$ мм | 0,704 |
| | | | $d_3=0,20$ мм | 0,745 |
| Бронза CuAl4 (41% Al) | — | — | 0,565; $\partial=2$ | Heye W. |
| АД1 | Отжиг ($t=340^{\circ}\text{C}$, 1 ч) | А | 0,151; ЛГ | По данным автора |
| | — | — | 0,22 | Алюшин Ю. А. Еленев С. А. |

| Металл, сплав и его марка | Предварительная обработка | Вид испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|---------------------------|--|----------------|-----------------------------------|---|
| Алюминий | — | Д | 0,201; $\delta=2,0$ | Heue W |
| | Отжиг | | 0,216; $a=1,75 \cdot 10^{-3}$ | [41] |
| AMg2M | — | В ₀ | 0,194 | — |
| AMg6 | Деформация в холодном состоянии, $\varepsilon=0,2$ | | 0,15 | Лукьянов В. Ф., Джулай Л. Л., Фомин В. Н. |
| | Отжиг | 0,26 | | |
| OT4 | Отжиг в вакууме 10-4 мм рт. ст. ($t=680^\circ\text{C}$) | FA | 0,128; ЛГ | По данным автора |
| BT16 | Отжиг в вакууме 10-4 мм рт. ст. ($t=780^\circ\text{C}$, 1 ч) | | 0,034; ЛГ | |
| Ц1 | Отжиг в кипящей воде (1 ч) | | 0,218; ЛГ | |
| Никель | Отжиг | Д | 0,357; $a=1,75 \cdot 10^{-3}$ | [41] |
| | — | | 0,50; $\delta=2,0$ | Tiainen T., Kettunen P.O |
| Серебро | Отжиг | А | 0,4354; $a=1,75 \cdot 10^{-3}$ | [41] |
| Олово | — | | 0,1386; ЛГ | По данным автора |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

каленной и отпущенной при температуре 500°C стали 20X n меньше, чем у этой же отожженной стали в 1,8 раза, в то время как у нормализованной лишь в 1,08 раза.

Следствие нормализации углеродистых сталей происходит незначительное (в 1,02—1,12 раза) понижение n (табл. 2.7). Горячая прокатка вызывает более существенное изменение n (в 1,1—1,21 раза), нежели нормализация (табл. 2.8), исключение составляют лишь стали с повышенным содержанием серы (10S10, 7S10 и 9SMn28), у которых показатели деформационного упрочнения примерно одинаковые для отожженных и горячекатаных состояний.

Нормализация с последующим старением углеродистых сталей с повышенным содержанием серы, напротив, вызывает существенное понижение n (в 1,3—1,7 раза).

В работах некоторых исследователей также было отмечено влияние предварительной обработки на величину n .

Так, было установлено, что n при растяжении состаренного при 200°C железа меньше, чем несостаренного.

2.7. Значение показателей деформационного упрочнения при сжатии углеродистых сталей после нормализации n_H и отжига n_{OT}

| Марка стали | n_H | n_{OT} | $\frac{n_{OT}}{n_H}$ |
|-------------|-------|----------|----------------------|
| C10 | 0,256 | 0,266 | 1,04 |
| St54 | 0,227 | 0,248 | 1,09 |
| C35 | 0,175 | 0,196 | 1,12 |
| St70 | 0,178 | 0,182 | 1,02 |

Примечание. Пояснения по маркам сталей см. на с. 3, 4.

Согласно данным Клементса Н. Ж., n у сплавов Fe-C-N и Fe-1,0 Cu-1,0 Ni-C-N уменьшается по мере старения. М. Н. Скурихиным показано, что значение n для низкоуглеродистой стали после деформационного старения уменьшается до 0,1.

Bühlicke Dieter и Vošek Michase определили, что промежуточная деформация монокристаллов кадмия кручением вызывает незначительное увеличение n при испытании на растяжение. Холодная пластическая деформация сплава AlMg6 до степени деформации $\epsilon = 0,2$ уменьшает n от 0,20 до 0,15.

Влияние предварительной обработки на показатель n особенно хорошо видно на примере стали C15 и сплава меди с бериллием (1,8% Be) (табл. 2.9).

При исследовании сплавов Cu-Al, Cu-Ca, Cu-G Дударев Е. Ф., Панин В. Е. и Дерюгин Е. Е. установили, что уменьшение степени ближнего порядка вследствие увеличения температуры закалки приводит к возрастанию n .

2.8. Значения показателей деформационного упрочнения при сжатии углеродистых и легированных сталей после горячей прокатки n_T и отжига n_{OT}

| Марка стали | n_T | n_{OT} | $\frac{n_{OT}}{n_T}$ |
|-------------|-----------|-----------|----------------------|
| Ск15 | 0,19 | 0,23 | 1,21 |
| Ma8 | 0,21 | 0,25 | 1,19 |
| У8 | 0,15 | 0,184 | 1,23 |
| 7S10* | 0,22 | 0,21 | 0,95 |
| 10S10* | 0,20 | 0,22 | 1,1 |
| 20X | 0,153 | 0,185 | |
| 16MnCr5 | 0,14—0,15 | 0,16—0,17 | 1,14 |
| 9SMn28* | 0,21 | 0,205 | 0,97 |

Примечание. Пояснения по маркам сталей см. на с. 3, 4.

2.9. Значения показателя деформационного упрочнения при растяжении в зависимости от различных видов предварительной обработки

| Материал | Предварительная обработка | n |
|----------------------------------|---|-------|
| Углеродистая сталь C15 | Отжиг при $t=680^\circ\text{C}$, 4 ч Отжиг при $t=1040^\circ\text{C}$, 14 ч Нормализация Закалка в воде от $t=920^\circ\text{C}$ | 0,305 |
| | | 0,283 |
| | | 0,264 |
| | | 0,145 |
| Сплав меди с бериллием (1,8% Be) | $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}$ (нагрев до $t=790^\circ\text{C}$ и охлаждение в воде) $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}/100^\circ\text{C}/2\text{ч}$ (нагрев до $t=790^\circ\text{C}$ с охлаждением в воде, нагрев до $t=100^\circ\text{C}$ с выдержкой при этой температуре 2 ч) $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}/250^\circ\text{C}/2\text{ч}$ $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}/400^\circ\text{C}/2\text{ч}$ $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}/500^\circ\text{C}/2\text{ч}$ $t=790^\circ\text{C}/\text{H}_2\text{O}/600^\circ\text{C}/2\text{ч}$ | 0,360 |
| | | 0,327 |
| | | 0,120 |
| | | 0,053 |
| | | 0,165 |
| | | 0,313 |

Примечание. Пояснения по маркам сталей см. на с. 3, 4.

Различное влияние на показатель n сталей и сплавов оказывает отпуск при разных температурах: с увеличением температуры отпуска n изменяется не монотонно, появляются минимумы и максимумы, обусловленные либо явлением старения, либо аллотропическими превращениями. В качестве примера на рис. 2.4 показана зависимость n от температуры отпуска алюминий-медно-магниевого сплава AlCuMg1.

Размер зерна. Для большинства сталей, цветных металлов и сплавов, имеющих кристаллическую решетку объемно-центрированный куб (ОЦК)

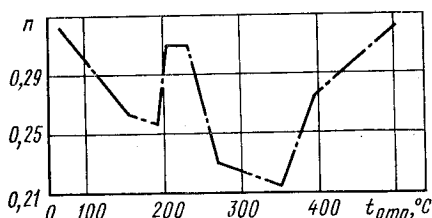


Рис. 2.4. Влияние температуры отпуска на величину n сплава AlCuMg1 (Pysz G.)

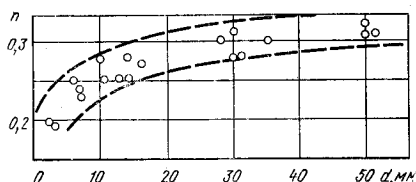


Рис. 2.5. Зависимость n от диаметра зерна d_3 для углеродистых сталей с содержанием углерода (0,09—0,20)% (по Morrison)

и гексагональную плотноупакованную (ГП), с увеличением диаметра зерна d_3 растет показатель n . Влияние размера зерна на n для низкоуглеродистых сталей представлено на рис. 2.5.

Согласно данным Carreker R. P. и Guard R. W., Larson F. R. и Bula E., а также W. J. Fogart для молибдена (ОЦК), титана (ГП) и кадмия (ГП) n будет тем выше, чем крупнее зерно.

Большинство экспериментальных данных свидетельствуют о слабой зависимости n от d_3 для металлов и сплавов с кристаллической решеткой гранецентрированный куб (ГЦК). Так, экспериментами Tiainen T. и Kettunen P. O. при испытаниях на растяжение меди высокой чистоты (99,99%) с d_3 , равными 0,021; 0,161 и 0,909 мм, установлено, что в большинстве диапазонов степеней деформации фактически n не зависит от d_3 (рис. 2.6), а для никеля высокой чистоты (99,9%) с d_3 , равным 0,058; 0,222 и 0,685 мм, n мало зависит от d_3 . Опытные данные Larson F. R. и Bula E. показывают слабую зависимость n от d_3 для алюминия. Однако экспериментальные данные Hollomon для латуни 70-30 (30% Zn) свидетельствуют о влиянии размера зерна на n (см. табл. 2.6).

С увеличением степени деформации влияние размера зерна для одних и тех же металлов и сплавов на показатель деформационного упрочнения уменьшается.

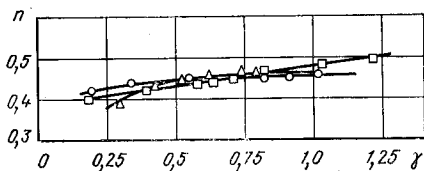


Рис. 2.6. Влияние диаметра зерна d_3 на n у меди (Cu 99,99%) при испытании на кручение (по данным Tiainen T., Kettunen P. O.):

□ — $d_3=0,021$ мм; ○ — $d_3=0,161$ мм; △ — $d_3=0,909$ мм

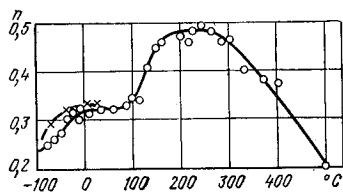


Рис. 2.7. Влияние температуры на показатель деформационного упрочнения n в области равномерной деформации для технического железа:

× — данные Morrison; ○ — данные Bergström Y., Aronsson B.

Температура испытания. Температура деформации оказывает существенное влияние на показатель n , причем оно непостоянно.

Для большинства металлов и сплавов (техническое железо, феррито-перлитные стали, алюминий, цинк, титан, молибден) с изменением температуры от 20°C до $100\text{--}400^\circ\text{C}$ n возрастает, а затем, достигнув максимума, уменьшается (рис. 2.7). Положение максимума зависит от скорости деформации, типа кристаллической решетки и энергии дефекта упаковки. С увеличением скорости деформации максимум сдвинется в область более высоких температур. Для скоростей деформации порядка $10^{-4}\text{--}10^{-1}\text{ с}^{-1}$ максимум кривой $n=f(t)$, согласно данным Соколова Л. Д. и Дмитриева Н. П., находится при температурах $100\text{--}300$ (для технического железа), $50\text{--}250$ (для титана), $20\text{--}100^\circ\text{C}$ (для алюминия). У молибдена максимальные значения n соответствуют температуре 200°C .

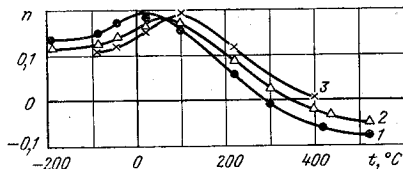
Для труднодеформируемых металлов: ниобия, тантала, молибдена и вольфрама — температурная зависимость n в области температур, превышающих нормальные, имеет сложный характер (с максимумами и минимумами), а абсолютные величины показателя n даже при температурах более 1000°C , весьма существенны, и в ряде случаев превышают величины n при нормальных температурах.

Максимум на температурной зависимости n для чистых металлов — железа, меди, алюминия, церия, стронция, ниобия, цинка — лежит в области гомологических температур $\theta = (0,2\div 0,4) T_{\text{пл}}$, а для молибдена характерный максимум $n = f(t)$ находится в области $\theta = 0,08 T_{\text{пл}}$ (Соколов Л. Д., Дмитриев Н. П.).

На рис. 2.8 приведена температурная зависимость n при сжатии алюминия при разных скоростях. Для других указанных выше металлов и сплавов температурная зависимость n аналогична.

Рис. 2.8. Температурная зависимость n при сжатии алюминия с различными скоростями деформации (по Дмитриеву Н. П.):

1 — $2,4 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$; 2 — $2,4 \cdot 10^{-2}\text{ с}^{-1}$;
3 — $1,44 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$



Температурная зависимость n меди (ГЦК) по своему характеру отличается от подобных зависимостей для указанных выше металлов и сплавов с решеткой ОЦК и ГП: с ростом температуры деформации (от нормальной) n убывает монотонно (Соколов Л. Д., Дмитриев Н. П.) либо с наличием минимума. У цирколая-4 (98% циркония) на зависимости $n = f(t)$ в области 400°C (температура рекристаллизационного перегиба) наблюдается минимум (рис. 2.9).

Дмитриев Н. П. и Соколов Л. Д. установили, что у металлов с одинаковой кристаллической решеткой n будет тем меньше, чем выше энергия дефекта упаковки γ_0 , а при одинаковых γ_0 показатель деформационного упрочнения уменьшается в следующей последовательности, определяемой типами кристаллических решеток: ГЦК — ГП — ОЦК.

В области отрицательных температур от -200°C с повышением температуры n для меди уменьшается во всем диапазоне отрицательных температур, для титана наблюдается уменьшение лишь до температуры -100°C , а затем увеличение до появления максимума, а для всех остальных рассмотренных ранее металлов и сплавов в этом случае n заметно возрастает. Изменение показателя деформационного упрочнения при отрицательных температурах у циркония (ГП) такое же, как и у титана.

В области температур, близких к нормальным ($-70\div 27^\circ\text{C}$), показатель n поликристаллического железа не зависит от температуры при деформировании со скоростями деформации $1,67 \cdot 10^{-3}\text{--}1,67 \cdot 10^{-4}\text{ с}^{-1}$.

Скорость деформации. О влиянии скорости деформации в области нормальных температур имеются противоречивые сведения. Так, для технического железа, согласно данным Bergström и Aronsson, изменение скорости деформации на два порядка ($8,3 \cdot 10^{-5}$ — $8,3 \cdot 10^{-3}$), а по данным Либерава Ю. П. и Исайчева М. Н. — на четыре порядка ($1,4 \cdot 10^{-5}$ — $1,4 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$) совершенно не оказывает влияния на n при нормальной температуре. Schneider S. при изучении листовых и прутковых сплавов установил, что в изотермических условиях деформации n с увеличением скорости деформации практически не меняется, а в политропических условиях падает. Согласно данным Schwandt S. для углеродистой стали Ск10 при изменении скорости от $9 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ величина n изменяется от 0,16 до 0,14. Кявин О. В. пришел к выводу, что при температуре 1,3К изменение скорости деформации от $2 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-2} с^{-1} не оказывает влияния на n алюминия, в то же время Шукин Е. Н., Горюнов Ю. В. и Рожанский В. Н. установили, что происходит изменение n алюминия при нормальной температуре с увеличением скорости деформации на два порядка.

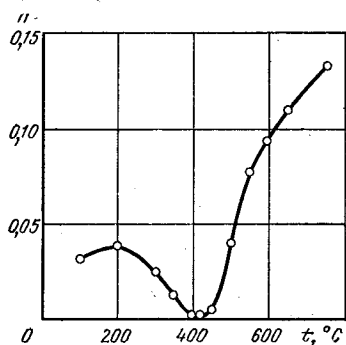


Рис. 2.9. Температурная зависимость n циркалоя-4 (по Boratto F. J. M., Cetlin P. R., Veado J. F.)

Для высоколегированной ферритной стали X10Cr3 изменение скорости более чем на порядок, практически не сказывается на показателе n , а для аустенитных сталей влияние скорости деформации на n ощутимо (см. табл. 2.5).

Схема деформации. Показатель деформационного упрочнения при сжатии n_1 выше показателя деформационного упрочнения при растяжении n_2 . Об этом свидетельствуют экспериментальные данные Schwandt S. [45], определявшего величину n для ряда сталей как по результатам испытания на сжатие, так и по результатам испытания на растяжение, а также данные различных исследователей, полученные при испытании на растяжение и сжатие при сравнении величин n одних и тех же материалов, прошедших одинаковую предварительную обработку (табл. 2.10). Исключение составляют только стали с повышенным содержанием серы, претерпевшие нормализацию с последующим старением. Разница между n_1 и n_2 в основном составляет 10—27%.

2.10. Сравнение показателей деформационного упрочнения, полученных по результатам испытания на сжатие n_1 и растяжение n_2

| Материал | Предварительная обработка | n_1 | n_2 | $\frac{n_1}{n_2}$ |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| Сталь С15 | Отжиг | 0,23 | 0,18 | 1,27 |
| Сталь Ск35 | | 0,196 | 0,16 | 1,22 |
| Сталь С60 | | 0,169 | 0,14 | 1,21 |
| Низкоуглеродистая сталь (C=0,05%) | Горячая прокатка | 0,252 | 0,244 | 1,03 |
| Медь | | 0,45—0,47 | 0,336—0,35 | 1,29—1,40 |
| Сталь Ск15 | | 0,19 | 0,167—0,174 | 1,09—1,14 |
| Сталь Ма8 | | 0,24 | 0,207 | 1,15 |
| Сталь Мак7 | | 0,23 | 0,207 | 1,11 |

| Материал | Предварительная обработка | n_1 | n_2 | $\frac{n_1}{n_2}$ |
|---------------|----------------------------|-------|-------|-------------------|
| Сталь 7S10* | Отжиг | 0,21 | 0,186 | 1,13 |
| | Горячая прокатка | 0,22 | 0,166 | 1,32 |
| | Нормализация+ +старение | 0,13 | 0,147 | 0,89 |
| Сталь 10S10* | Отжиг | 0,22 | 0,21 | 1,045 |
| | Горячая прокатка | 0,20 | 0,17 | 1,18 |
| Сталь 9SMn28* | Отжиг | 0,205 | 0,188 | 1,09 |
| | Горячая прокатка | 0,21 | 0,17 | 1,235 |
| | Нормализация+ +старение | 0,14 | 0,148 | 0,94 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

2.3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ n ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Влияние углерода, легирующих и сопутствующих элементов на показатель n для листовых материалов аналогично их влиянию на n для прутковых материалов. Зависимость n от химического состава можно проследить на примере коррозионно-стойкой ферритной стали типа 17% Cr—Steel, прошедшую предварительную обработку в виде холодной прокатки со степенью деформации $\varepsilon = 1,10$ с последующим отжигом при $t = 788^\circ \text{C}$ в течение 2 мин (рис. 2.10).

Среднее значение n для листов из ферритных коррозионно-стойких сталей можно рассчитать по уравнению

$$n = 0,199 - 0,062 (\% \text{C}) - 0,016 (\% \text{Mn}) + 0,014 (\% \text{Si}) + 0,0005 (\% \text{Cr}) - 0,021 (\% \text{Mo}) + 0,0067 (\% \text{Nb}) + 1,12 \times (\% \text{C} - 0,097)^2 - 0,033 (\% \text{Nb} - 0,50)^2 + 0,089 (\% \text{C} - 0,097) (\% \text{Cr} - 17,05). \quad (2.8)$$

Значения показателей деформационного упрочнения для листовых материалов из стали представлены в табл. 2.11, а из цветных металлов и сплавов — в табл. 2.12. Для ферритных коррозионно-стойких сталей типа 17% Cr—Steel [C = (0,05 ÷ 0,15)%; Cr = (15,2 ÷ 18,6)%; Mn = (0,34 ÷ 0,98)%; Si = (0,23 ÷ 0,94)%; Mo = (0,32 ÷ 1,02)%; Nb = (0,028 ÷ 0,96)%] толщиной 1,016 мм, полученных холодной прокаткой со степенью деформации 1,10 с последующим отжигом ($t = 788^\circ \text{C}$, выдержка 2 мин), величина n при растяжении со скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ составляет 0,181—0,213.

Для аустенитных сталей n существенно зависит от содержания никеля, определяющего устойчивость аустенита (рис. 2.11) [32].

Между показателями деформационного упрочнения при растяжении n_1 и размером зерна d_3 для листовых углеродистых и низколегированных сталей существует следующая зависимость:

$$n_1 = \frac{a}{b + d_3^{-1/2}}. \quad (2.9)$$

Согласно Blickwede Donald J. для углеродистых сталей

$$n = \frac{5}{10 + d_3^{-1/2}}. \quad (2.10)$$

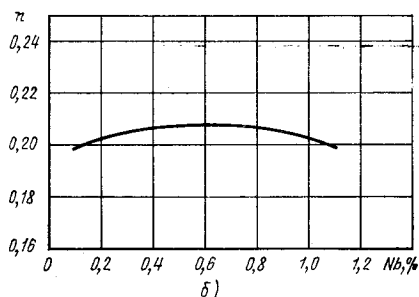
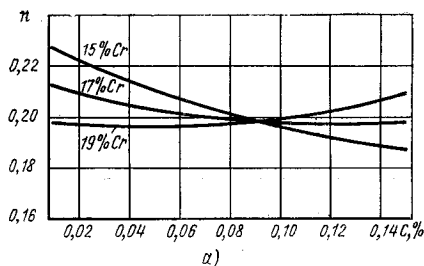


Рис. 2.10. Зависимость n от содержания углерода и хрома (а) и ниобия (б) для коррозионно-стойкой ферритной стали типа 17% Cr—Steel (по Вриспер К. Г., Бергер Ж. А.)

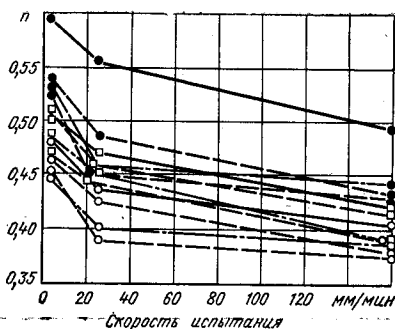


Рис. 2.11. Влияние скорости испытания на n листовых аустенитных сталей с различным содержанием Ni (сплошные и штрихпунктирные линии относятся к различным методам испытаний) [32]:
● — 8,58%; □ — 9,30%; ○ — 9,65%

Влияние скорости деформации $\dot{\epsilon}$ на n различно в зависимости от испытуемого материала. Для углеродистых и аустенитных сталей с увеличением скорости деформации n уменьшается (табл. 2.11, рис. 2.11), причем для аустенитных сталей в области низких скоростей деформации интенсивно, а затем значительно слабее. По аустенитным сталям исключение составляют данные Ludwigson D. S., но следует учесть, что диапазон применяемых скоростей деформации изменялся незначительно. У высоколегированной ферритной (с включением карбидов) стали X8Cr17 [содержание хрома (16—17)%] величина n не зависит от скорости испытания (рис. 2.12). Согласно данным Namel H.-J., обобщившего экспериментальные результаты ряда исследователей, для алюминия высокой чистоты (Al 99,99%) величина n в интервале 10^{-4} — 10^{-2} с $^{-1}$ (для Al 99,999% даже в интервале 10^{-4} — 10^0 с $^{-1}$) не зависит от скорости деформации, но при увеличении $\dot{\epsilon}$ за пределами указанного диапазона линейно возрастает; для алюминия меньшей чистоты (Al 99,3%) n имеет глубокий минимум в области $\dot{\epsilon} = 1$ — 10 с $^{-1}$ и составляет примерно 0,2, а затем существенно увеличивается с возрастанием $\dot{\epsilon}$. Приведенные в табл. 2.12 данные F. Gologranc согласуются с результатами работы Namel H.-J.

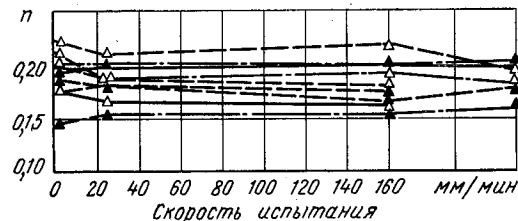


Рис. 2.12. Влияние скорости на n листовой высоколегированной ферритной стали X18Cr17 толщиной 0,8 мм [32] (сплошные, штриховые и штрихпунктирные линии относятся к различным методам испытаний):

▲ — 0,035% C; 0,37% Si; 0,47% Mn; 16,16% Cr; 0,30% Ni; △ — 0,041% C; 0,49% Si; 0,67% Mn; 16,75% Cr; 0,13% Ni

2.11. Значения показателя деформационного упрочнения n для сталей

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | Вид предварительной обработки | Толщина листа δ , мм | Метод испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|--|-------------------------|------|------|----|----|----|-------|-------|---------------------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|--|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Nb | P | S | | | | | |
| 08кп | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В | 0,28 | [30] |
| 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В | 0,20 | |
| RSt 37-1 | 0,06 | 0,06 | 0,44 | — | — | — | 0,083 | 0,028 | Горячая прокатка | 16 | В ₀ | 0,234; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | Рассчитано по экспериментальным данным Helms R., Ledworuski S. |
| | | | | | | | | | Холодная прокатка ($\epsilon=0,47$) | 10 | | 0,025; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | |
| | | | | | | | | | Холодная прокатка ($\epsilon=0,98$) | 6 | | 0,014; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | |
| RSt 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | 1,0 | Д ₁ | 0,3137; $\partial=400$ 0,2056; $\partial=30$ | Gologranc F. | |
| StVIIIc | — | — | — | — | — | — | — | — | 1,52 2,02 | | 0,23 | Galal S. A. Schawki | |
| Легированная сталь | 0,17 | 0,02 | 1,14 | — | — | — | 0,016 | — | — | 3,58 | — | 0,19 | Pearce R., Mazhar A. A. |
| QSt52—3Cu3 (0,085% Al, 0,26% Cu) | 0,17 | 0,39 | 1,30 | — | — | — | 0,013 | 0,015 | Горячая прокатка | 6,5 | В ₀ | 0,211; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | Рассчитано по экспериментальным данным Helms R., Ledworuski S. |
| | | | | | | | | | Холодная прокатка ($\epsilon=0,26$) | 5,0 | | 0,066; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | |
| | | | | | | | | | Холодная прокатка ($\epsilon=0,49$) | 4,0 | | 0,0265; $a=6 \cdot 10^{-3}$ | |

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | Вид предварительной обработки | Толщина листа δ , мм | Метод испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|--|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|------------|---|-----------------------------|-----------------|--|--------------------------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Nb | P | S | | | | | |
| 12X18H9T | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Б | 0,52 | Щеглов Б. А. Титлянов А. Е. |
| Коррозионно-стойкая ферритная сталь типа 17% Cr—Steel (0,32—1,02%Mo, 0,049—0,058%Cu) | 0,05—0,15 | 0,23—0,94 | 0,34—0,98 | 15,2—18,6 | — | 0,028—0,96 | 0,016—0,018 | 0,004—0,44 | Холодная прокатка ($\epsilon=1,10$) + отжиг ($t=788^\circ\text{C}$, выдержка 2 мин) | 1,016 | Д ₁ | 0,181—0,213; $a=10^{-4}$ | Brickner K. G. Berger J. A. |
| T5462-1 ² | 0,044—0,14 | — | 1,07—2,65 | 16,3—20,6 | 9,22—11,1 | — | — | — | — | 1,25 | | 0,4353; $a=1,75 \cdot 10^{-3}$ | Ludwigson D. C. |
| | | | | | | | | | | 0,87 | | 0,4124; $a=1,75 \cdot 10^{-2}$ | |
| X5CrNi18,9 | 0,040 | 0,40 | 1,61 | 17,67 | 9,65 | — | — | — | — | 0,8 | Д ₁ | 0,4375; $\delta=25$ 0,405; $\delta=160$ | [32] |
| | 0,050 | 0,39 | 1,48 | 17,16 | 8,58 | — | — | — | — | 0,6 | | 0,565; $\delta=25$ 0,490; $\delta=160$ | |
| | 0,045 | 0,31 | 1,66 | 17,90 | 9,30 | — | — | — | — | | | 0,452; $\delta=25$ 0,422; $\delta=160$ | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

2.12. Значения показателей деформационного упрочнения n цветных металлов и сплавов (при нормальной температуре)

| Металл или сплав и их марки | Вид предварительной обработки | Толщина листа δ , мм | Вид испытания | n ; скорость деформации | Литературный источник |
|--|-------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--|
| Медь | — | 0,84 | Д ₁ | 0,367 | Kleemola H. J., Kanta—Eskola A. J. |
| Латунь 63—37 ² (63% Cu) | | | Д ₉ | 0,320 | |
| | | 1,0 | Д ₁ | 0,447 | |
| Д ₉ | | | 0,530 | | |
| Латунь 70—30 ² (70%Cu) | Отжиг | 0,75 | — | 0,485 | El-Sebaie M. G., Mellor P. B. |
| Латунь М ₃ 63 | — | — | — | 0,42 | Galal S. A. Schawki |
| Алюминий Al99,5 | | | | Мягкий отжиг | |
| | 0,21167; $\delta=40$ | | | | |
| | 0,22248; $\delta=10$ | | | | |
| | Д ₇ | 0,26151 | | | |
| | Д ₈ | 0,32173 | | | |
| АД1М | — | — | И | 0,27 | [30] |
| АМг3 | | | | 0,255 | |
| АМг6М | | | | 0,23 | |
| Д16М | | | | 0,18 | |
| АМцАМ | | | | 0,12 | |
| ОТ4 | | | | 0,13 | |
| Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4. | | | | | |

2.4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ n ОТ КЛАССА СТАЛЕЙ И ТИПА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Сравнительно высокие значения n характерны для нелегированных ферритных сталей (табл. 2.13). Высоколегированные ферритные стали обладают наименьшими величинами показателей деформационного упрочнения $\sim 0,1$, что в 2,5—3,0 раза меньше, чем для нелегированных ферритных сталей.

Стали перлитного класса обладают меньшими значениями n , нежели нелегированные ферритные стали, причем n для легированных конструкционных сталей имеет большой разбег. При этом минимальные значения n характерны для сталей с более высоким содержанием углерода (0,34—0,38)%, а максимальные — с меньшим содержанием углерода (0,10—0,19)%.

2.13. Значение показателя n отожженных сталей различных классов

| Группа сталей | Класс стали | n | Литературный источник |
|--|--------------------|-------------|--|
| Низкоуглеродистая (типа технически чистого железа) | Ферритный | 0,27—0,276 | По данным автора |
| Высоколегированная (типа 12X13) | | 0,094—0,107 | Расчет сделан по данным работы [38] |
| Легированная конструкционная сталь | Перлитный | 0,135—0,225 | По данным автора |
| Инструментальная типа У10А, 3Х2В8Ф, 7Х3 | Перлитно-карбидный | 0,160—0,165 | Расчет сделан по данным работы Таловой В. Н., Мурасова А. Ш., Наумчева Б. А. |
| Инструментальная типа Р18 и Х12Ф1 | Карбидный | 0,135—0,142 | |
| Высоколегированная типа 08Х18Н9Т и 12Х18Н9Т | Аустенитный | 0,54—0,60 | По данным работы [40] |

Инструментальные стали карбидного класса имеют невысокие значения n , соответствующие минимальным значениям показателей деформационного упрочнения сталей перлитного класса. Несколько большую способность к упрочнению проявляют инструментальные стали перлитно-карбидного класса, причем разбег по величине n для этой группы сталей весьма незначителен и равен 0,005.

Наибольшие значения n (по сравнению со сталями ферритного или ферритно-перлитного класса) характерны для высоколегированных аустенитных сталей. Это можно объяснить двумя факторами: во-первых, аустенитные стали

обладают структурой ГЦК, а металлы и сплавы с решеткой ГЦК упрочняются значительно сильнее, чем металлы с решеткой ОЦК; во-вторых, весьма существенный вклад в упрочнение аустенитных сталей вносит явление превращения аустенита в мартенсит в процессе пластической деформации.

Низкие значения показателя деформационного упрочнения у высокопрочных ферритных сталей, характеризующие сравнительно незначительное упрочнение этих сталей, могут быть объяснены тем, что такие стали имеют структуру ОЦК, для которой характерны легкость поперечного скольжения, слабость взаимодействия типа притяжений, наличие карандашного скольжения и более высокая диффузионная подвижность, облегчающая переползание краевых дислокаций.

Исследованиями Дмитриева Н. П. и Соколова Л. Д. показано, что у металлов с одинаковой кристаллической решеткой n будет тем меньше, чем выше энергия дефекта упаковки γ , а при одинаковых величинах γ уменьшается в следующей последовательности (в зависимости от типов кристаллических решеток): ГЦК — ГП — ОЦК.

3. СВЯЗЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ СПЛАВОВ

3.1. СВЯЗЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ С ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

Из химических элементов, присутствующих в конструкционных сталях, углерод оказывает наибольшее влияние на величину σ_s . С повышением содержания углерода в углеродистых сталях увеличивается σ_s при прочих равных условиях. Кривые упрочнения располагаются тем выше, чем больше углерода в испытуемой стали. Это наблюдается как у термически обработанных, так и у горячекатаных сталей. Эксперименты показывают, что увеличение содержания углерода вызывает повышение σ_s по линейной зависимости, при этом интенсивность возрастания σ_s с увеличением содержания углерода является постоянной величиной для всех степеней деформации (рис. 3.1).

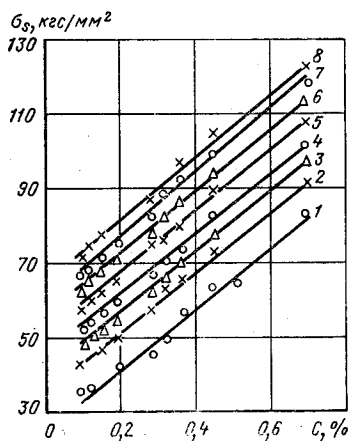


Рис. 3.1. Влияние содержания углерода на σ_s углеродистых горячекатаных сталей [13]:

1 — $q=5\%$; 2 — $q=10\%$; 3 — $q=15\%$; 4 — $q=20\%$; 5 — $q=30\%$; 6 — $q=40\%$; 7 — $q=50\%$; 8 — $q=60\%$

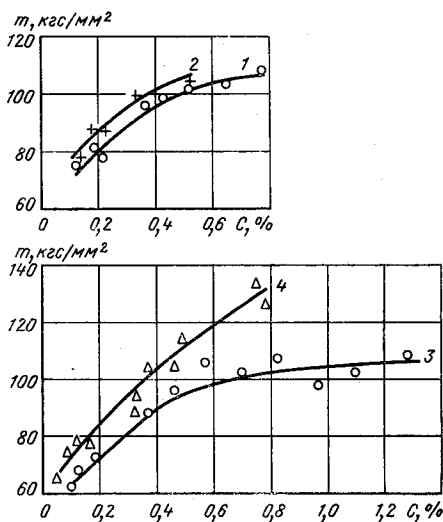


Рис. 3.2. Зависимость коэффициента t углеродистых сталей от содержания углерода после полного (1) и неполного отжига (2), горячей прокатки (4) и нормализации (3) [по данным автора]

Для горячекатаных углеродистых сталей существуют следующие зависимости между σ_s (кгс/мм²) и содержанием углерода в пределах (0,058—0,72)%:

$$\sigma_s (\varepsilon = 0,1 \div 0,2) = -25 + 80C + 36q^{0,23}; \quad (3.1)$$

$$\sigma_s (\varepsilon > 0,2) = 38 + 80C + 0,45q, \quad (3.2)$$

где q — относительная степень деформации, %; C — содержание углерода, %.

Для углеродистых сталей, прошедших другие виды термической обработки, σ_s может быть рассчитана по уравнению $\sigma_s = m\varepsilon^n$ с помощью рис. 2.1 и 3.2.

В конструкционных легированных сталях влияние углерода ослабевает при содержании его более 0,4% и, вероятно, практически прекращается при 0,6%.

Такие легирующие элементы, как никель, кремний, марганец, молибден, хром, ванадий, вызывают повышение σ_s конструкционных сталей. Вместе с тем с увеличением степени деформации суммарное влияние легирующих элементов на σ_s уменьшается. Это происходит главным образом в результате весьма существенного ослабления влияния на σ_s хрома и молибдена вследствие образования карбидов, которые мало способствуют деформационному упрочнению, так как зерна феррита остаются низколегированными. В марганцовистых и никелевых сталях почти все количество легирующих элементов марганца и никеля растворено в феррите, и поэтому их влияние на σ_s весьма существенно.

Увеличение содержания марганца при постоянном количестве других элементов вызывает повышение σ_s при различных скоростях деформации (от 0,25 до 40 с⁻¹) и температурах испытания (от 20 до 600°С) (рис. 3.3).

Хром сравнительно мало влияет на величину σ_s . Однако при малой степени деформации влияние на σ_s хрома проявляется сильнее, чем влияние марганца.

Величина σ_s при сжатии отожженных конструкционных сталей может быть приблизительно вычислена по химическому составу стали с помощью следующего уравнения:

$$\sigma_s = (68\sqrt{C} + 6Mn + 3Ni + 13Si + 47)e^{0,2}, \quad (3.3)$$

где C , Mn , Ni , Si — содержание соответствующего легирующего элемента, % по массе.

Для сталей, прошедших полный отжиг, могут быть применены следующие частные формулы [2]:

$$\sigma_s (\varepsilon = 0,2) = 52\sqrt{C} + 16Mo + 5Cr + 3Ni + 11Si + 3Mn + 31; \quad (3.4)$$

$$\sigma_s (\varepsilon = 0,5) = 57\sqrt{C} + 9Mo + 2,7Cr + 4Ni + 11Si + 3,2Mn + 41; \quad (3.5)$$

$$\sigma_s (\varepsilon = 0,8) = 65\sqrt{C} + 4,5Mo + 2Cr + 3,5Ni + 9Si + 3Mn + 45, \quad (3.6)$$

где $\sigma_{s(\varepsilon = 0,2)}$, $\sigma_{s(\varepsilon = 0,5)}$, $\sigma_{s(\varepsilon = 0,8)}$ — напряжения течения при $\varepsilon = 0,2$; 0,5 и 0,8 соответственно.

У коррозионно-стойких сталей различный уровень упрочнения вызывается различным содержанием углерода и никеля, а титан, ниобий и тантал не оказывают влияния на деформационное упрочнение.

Азот и кислород вызывают уменьшение σ_s железа. Повышение концентрации азота в железе ослабляет температурную зависимость σ_s .

В сплавах ниобий — кислород и ниобий — азот, содержащих кислорода (0,01—0,07)% и азота (0,017—0,08)% соответственно, σ_s увеличивается линейно с повышением концентрации азота и кислорода в твердом растворе.

В цветных металлах величина σ_s уменьшается с повышением концентрации примесей. Так, кривые упрочнения алюминия Al 99,99% располагаются выше кривых упрочнения Al 99,5%, а изменение скорости деформирования на шесть порядков приводит к смещению кривой деформации вверх и повышению σ_s на 60% для чистого алюминия и только на 25% для Al 99,5%.

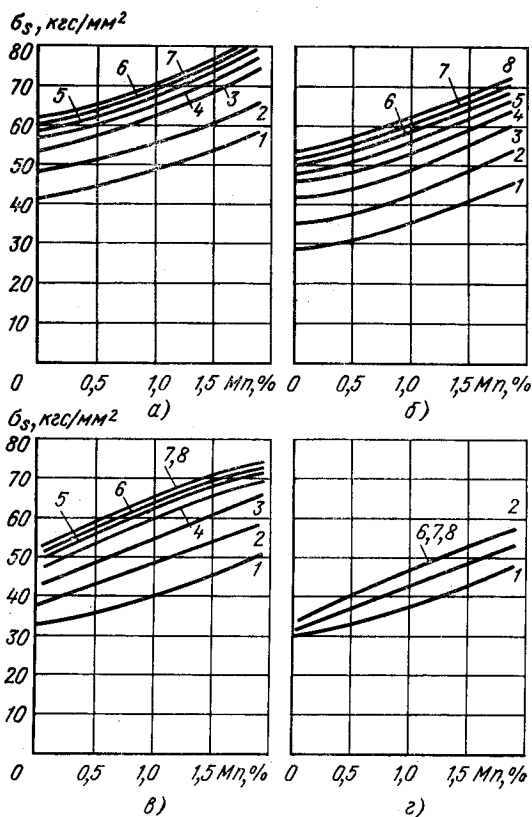


Рис. 3.3. Влияние содержания марганца на σ_s при температурах испытания: а — 20°C; б — 200°C; в — 400°C; г — 600°C (Bühler Н.); 1 — $\epsilon=0,05$; 2 — $\epsilon=0,1$; 3 — $\epsilon=0,2$; 4 — $\epsilon=0,3$; 5 — $\epsilon=0,4$; 6 — $\epsilon=0,5$; 7 — $\epsilon=0,6$; 8 — $\epsilon=0,7$.

3.2. СВЯЗЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

При испытании на растяжение между напряжением течения σ_s , параметрами кривых упрочнения m , n и временным сопротивлением на разрыв σ_B имеется взаимосвязь, определяемая следующими формулами:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p} \left(\frac{\psi}{\psi_p} \right)^{\psi_p / 1 - \psi_p}; \quad [5] \quad (3.7)$$

$$\sigma_s = \frac{4}{\pi} \sigma_{sB} \operatorname{arctg} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^{\frac{\pi}{2} \epsilon_p}; \quad (3.8)$$

$$m = \sigma_{sB} \left(\frac{\epsilon}{n} \right)^n; \quad (3.9)$$

$$\sigma_s = \sigma_B \left(\frac{\epsilon}{n} \right)^n \epsilon^n, \quad (3.10)$$

где ψ — текущее значение относительного уменьшения площади поперечного

сечения рабочей части образца [5]; ψ_p — максимальное равномерное относительное сужение поперечного сечения [5]; σ_{sB} — напряжение течения в момент появления шейки.

Как показывает анализ экспериментальных данных, при нормальных температурах между σ_s различных металлов и их сплавов, прошедших термическую или горячую пластическую обработку различных видов, и механическими свойствами (σ_B , σ_T , δ_s , ψ и НВ) этих материалов существует корреляционная связь. Корреляционные зависимости (рис. 3.4 см. с. 48, 49), установленные на основании математической обработки экспериментальных данных около 100 кривых упрочнения при сжатии при нормальных температурах горячекатаных или термически обработанных по различным режимам (отжиг, нормализация, закалка с последующим отпуском) сталей, имеют вид

$$\sigma_{s0} = 15 + 0,90 \sigma_B; \quad (3.11)$$

$$\sigma_{s0} = 6 + 1,80 \sigma_T; \quad (3.12)$$

$$\sigma_{s0} = 14 + 0,34 \text{НВ}; \quad (3.13)$$

$$\sigma_{s0} = 155 - 2,65 \delta_s; \quad (3.14)$$

$$\sigma_{s0} = 210 - 2,17 \psi; \quad (3.15)$$

где σ_{s0} — экстраполированный предел текучести, кгс/мм².

Уравнения (3.11) — (3.15) справедливы для технического железа, углеродистых сталей с содержанием углерода до 1,05%, конструкционных легированных и аустенитных сталей.

Для алюминия, меди и их сплавов установлены следующие корреляционные зависимости (рис. 3.5) в результате обработки экспериментальных данных по 25 материалам, прошедшим обработку в виде отжига, горячей прокатки или горячей штамповки:

для меди и ее сплавов

$$\sigma_{s0} = 2,25 + 1,38 \sigma_B; \quad (3.16)$$

$$\sigma_{s0} = 18 + 2,37 \sigma_T; \quad (3.17)$$

$$\sigma_{s0} = 0,802 \text{НВ} - 2; \quad (3.18)$$

для алюминия и его сплавов

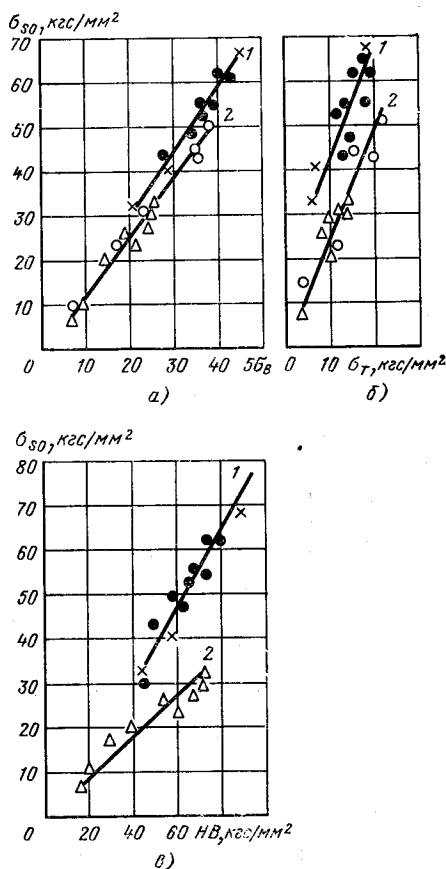
$$\sigma_{s0} = 1,325 \sigma_B - 2; \quad (3.19)$$

$$\sigma_{s0} = 2,45 \sigma_T - 2; \quad (3.20)$$

$$\sigma_{s0} = 0,48 \text{НВ} - 2. \quad (3.21)$$

Рис. 3.5. Зависимость экстраполированного предела текучести для меди и ее сплавов (1) и алюминия и его сплавов (2) от различных характеристик механических свойств:

a — $\sigma_{s0} = f(\sigma_B)$; b — $\sigma_{s0} = f(\sigma_T)$; $в$ — $\sigma_{s0} = f(\text{НВ})$; ●, × — медь и ее сплавы соответственно после отжига и после горячей штамповки; △, ○ — алюминий и его сплавы соответственно после отжига и горячей штамповки (по данным автора)



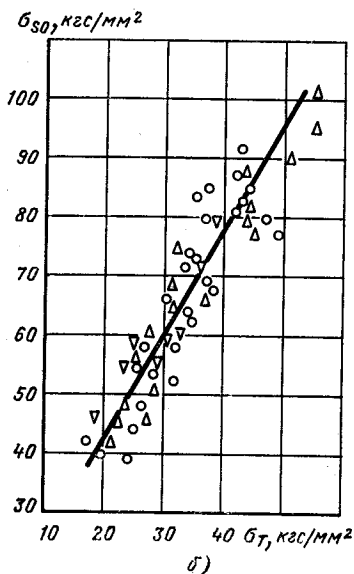
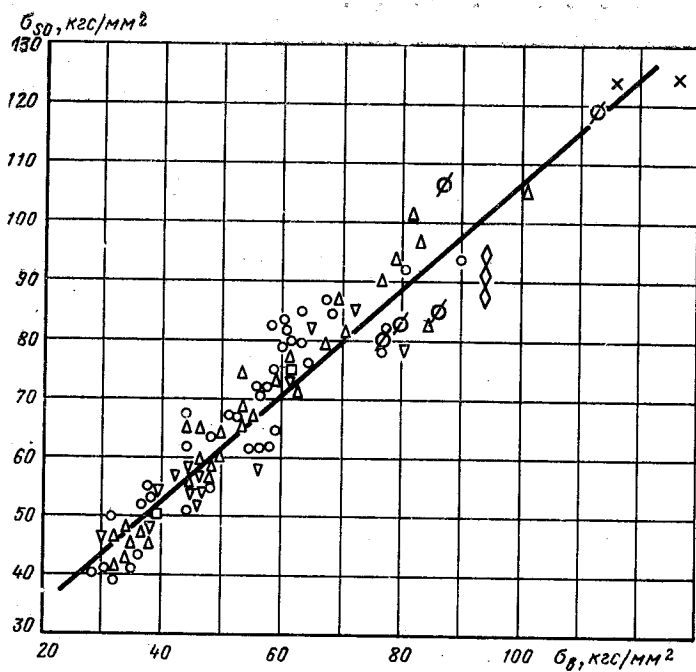
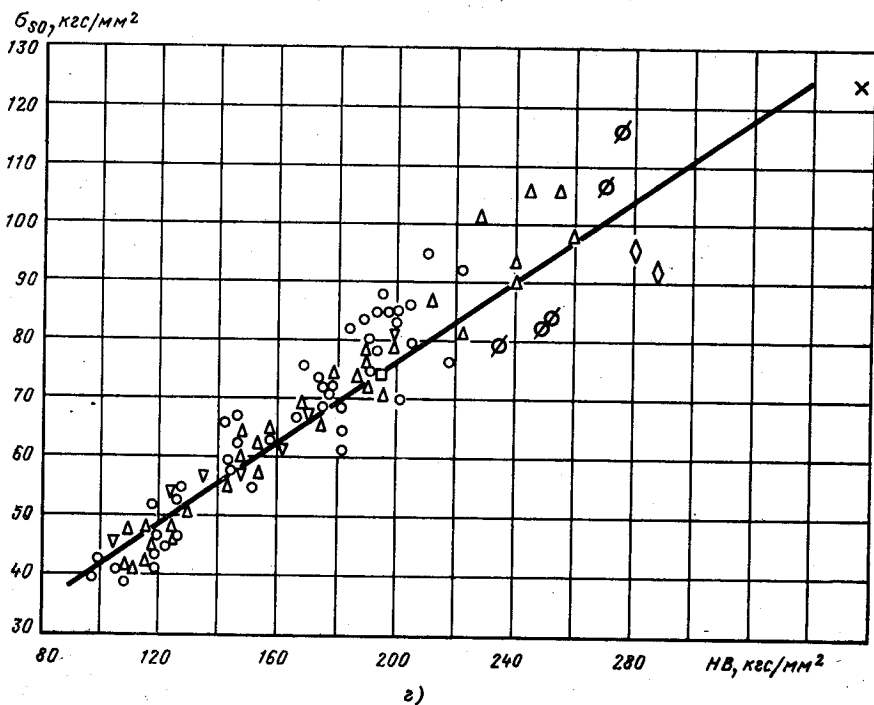
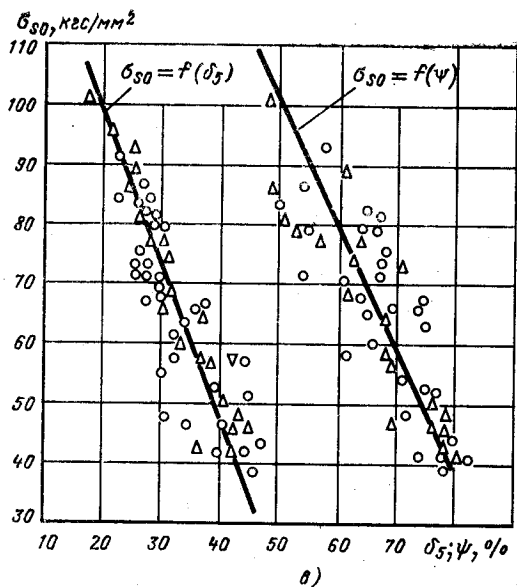


Рис. 3.4. Зависимость экстраполированного предела текучести для железа и
 а — $\sigma_{80}=f(\sigma_B)$; б — $\sigma_{80}=f(\sigma_T)$; в — $\sigma_{80}=f(\delta_5)$ и $\sigma_{80}=f(\psi)$; г — $\sigma_{80}=f(HB)$; ○ — отжиг;
 ◇ — закалка+отпуск, $t_{отп}=500^\circ\text{C}$; ∅ — закалка+отпуск, $t_{отп}=600^\circ\text{C}$; □ — закалка+от-



сталей от различных характеристик механических свойств:

Δ — нормализация; ∇ — горячая прокатка; \times — закалка + отпуск, $t_{отп}=400^\circ\text{C}$; \circ — отпуск, $t_{отп}=700^\circ\text{C}$ (по данным автора)

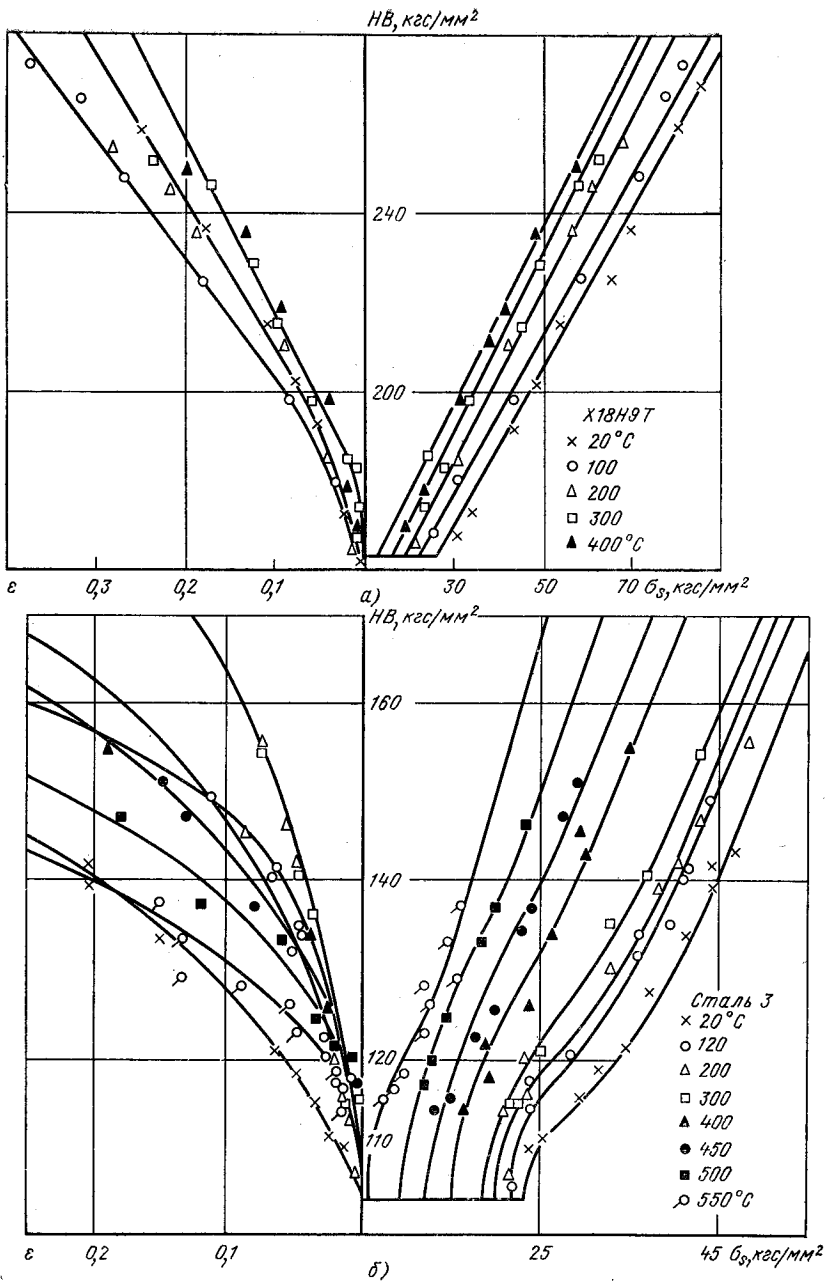
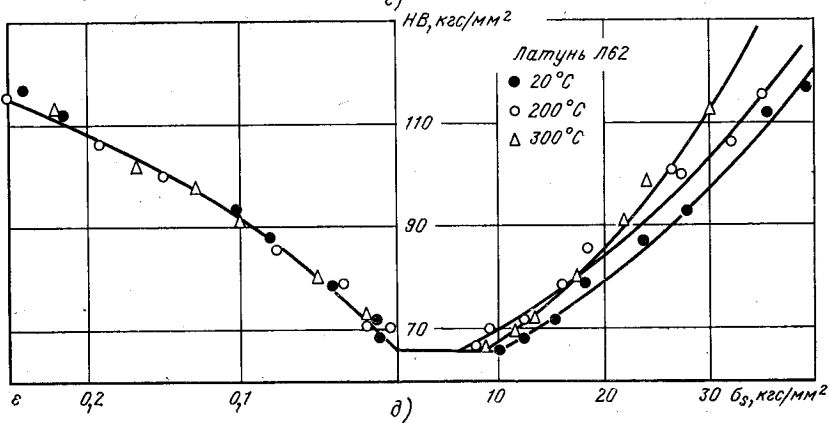
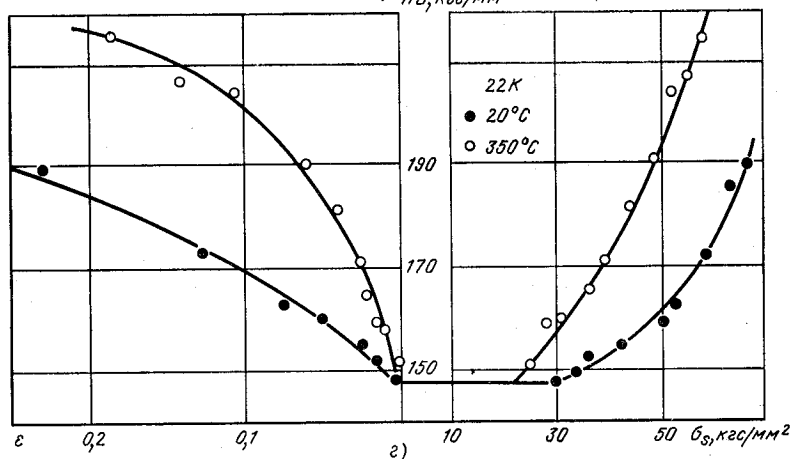
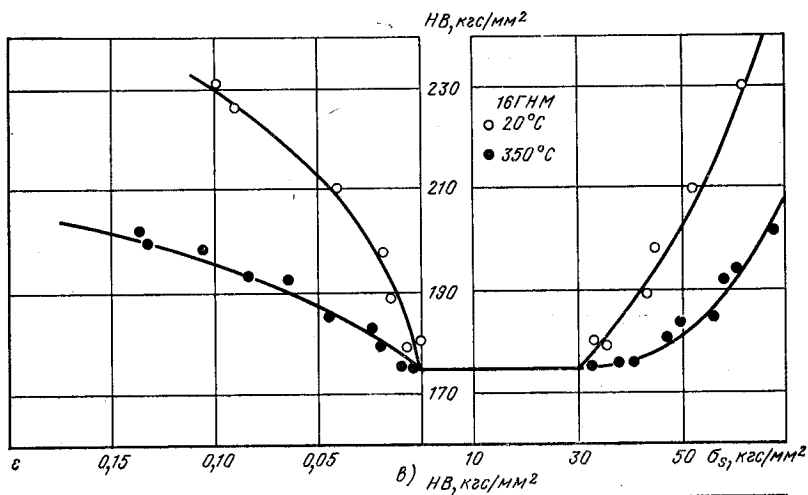


Рис. 3.6. Зависимость между ϵ , HB и напряжением течения σ_s при растяжении — сталь X18H9T; б — Ст3; в — 16ГНМ; г — 22К; д — латунь Л62 (Г. Д. Дель, 50



нии листовых материалов при повышенных температурах:
Ф. Х. Томилев)

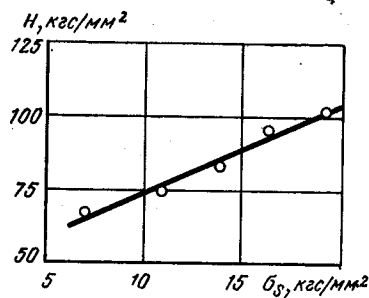
Коэффициент корреляции r_k , характеризующий меру линейной связи между σ_{s_0} и σ_B , σ_T , δ_5 , ψ , $HВ$, в целом для группы сталей является довольно большим и составляет 0,81—0,87 (только для зависимость $\sigma_{s_0} = f(\psi)$ эта величина равна 0,706). Во всех случаях для углеродистых сталей величина r_k выше, чем для легированных сталей и находится в пределах 0,90—0,94 (кроме зависимости $\sigma_{s_0} = f(\psi)$). Из всех зависимостей наименьшая мера линейной связи характерна для $\sigma_{s_0} = f(\psi)$: коэффициент корреляции находится в пределах 0,628—0,767.

Коэффициент r_k , выражающий линейную связь между σ_{s_0} и механическими свойствами, для меди, алюминия и их сплавов, очень большой и составляет 0,914—0,962.

Указанные выше корреляционные зависимости имеют большое практическое значение, так как по σ_{s_0} можно определить σ_s с помощью выражения

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + b_1 \epsilon, \quad (3.22)$$

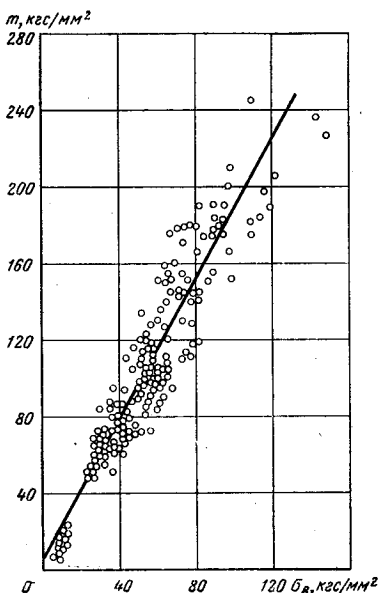
где b_1 — коэффициент, характеризующий наклон кривых упрочнения, определяемый по табл. 3.1.



Корреляционная зависимость между напряжением течения и твердостью имеется и при низких температурах, в частности, такая зависимость установлена для бескислород-

Рис. 3.7. Зависимость между микротвердостью H и σ_s при растяжении для отожженной бескислородной меди (99,98%) при температуре -193°C (Гиндин И. А., Стародубов Я. Д., Хаймович П. А.)

3.1. Значения коэффициента b_1



| Группа стали | Термическая обработка | Коэффициент b_1 |
|--------------------------------------|---|-------------------|
| Углеродистая с содержанием углерода: | до 0,30 | 0,13—0,17 |
| | 0,35—0,70 | 0,20—0,24 |
| до 0,35 | Нормализация горячая прокатка | 0,22—0,27 |
| | Нормализация горячая прокатка. закалка + отпуск | 0,35—0,40 |
| Легированная конструкционная | Отжиг | 0,18—0,27 |
| | Горячая прокатка | 0,25—0,30 |
| | Нормализация, закалка + отпуск | 0,30—0,40 |

Рис. 3.8. Зависимость между коэффициентами t и σ_s для различных материалов (углеродистых сталей с содержанием $C=1,0\%$, аустенитных сталей, латуней, никель-хромовых сплавов Zn , Ti , Zr и Ni) [44]

ной и поликристаллической меди (99,98%), отожженной при температуре 720° С в течение 2 ч.

Для ряда листовых материалов установлены экспериментальные зависимости между HV и σ_s при повышенных температурах (рис. 3.6 см. с. 50,51).

Зависимость между H и σ_s при растяжении для отожженной бескислородной меди (99,98%) при температуре — 193° С приведена на рис. 3.7.

Gottfried Pysz [44] на основании обработки экспериментальных данных 226 материалов (углеродистых сталей с содержанием $C < 1,0\%$, аустенитных сталей, латуней, никель-хромовых сплавов, цинка, титана, циркония и никеля показал (рис. 3.8), что

$$m = 1,83\sigma_B + 4,0. \quad (3.23)$$

Коэффициент корреляции для этого уравнения равен 0,95. Используя это уравнение, а также значения n , приведенные в гл. 2, можно рассчитать σ_s по формуле (1).

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

4.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ

В практике обработки металлов давлением в холодном состоянии деформированию подвергаются стали, цветные металлы и их сплавы после различных видов термической обработки (отжига, нормализации, закалки с последующим отпуском), горячей прокатки и волочения.

Различные виды термической обработки, как правило, применяют перед плоскостной чеканкой. В большинстве случаев перед холодным выдавливанием осуществляют отжиг. Холодной высадке и обжатю части стержня путем проталкивания через фильер матрицы подвергается материал, прошедший волочение с различными степенями деформации. Для технологических процессов холодной объемной штамповки используется горячекатаный материал. Нормализация и закалка с последующим отпуском вызывает увеличение напряжения течения по сравнению с отжигом, при этом напряжение течения будет тем выше, чем ниже температура отпуска [13]. Кривые упрочнения горячекатаных металлов и сплавов располагаются выше кривых упрочнения этих материалов в отожженном состоянии [13]. Предшествующая пластическая деформация в холодном состоянии влияет не только на σ_s , а также и на характер кривых упрочнения, особенно кривых упрочнения волоченых сталей (см. рис. 2). В связи с этим при расчетах энергосиловых параметров необходимо пользоваться кривыми упрочнения, построенными для материалов, претерпевших тот вид термической или пластической обработки, которой подвергается металл перед изготовлением деталей с применением методов пластической деформации.

Экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии анизотропности металлов и сплавов на σ_s как при испытании на сжатие, так и на растяжение. Анализ значений σ_s для образцов, вырезанных из металлов в различных направлениях по отношению к продольной оси, показывает, что у образцов с поперечным расположением волокон σ_s несколько ниже, чем у образцов с продольным расположением (закаленная и отпущенная при $t = 250^\circ \text{C}$ сталь 18ХНМА, титан, ниобий), или существенно превышает σ_s образцов с поперечным расположением волокон в начальный момент деформации, затем становится ему равным и даже ниже. В связи с этим желательно, чтобы направления приложения нагрузки к образцам при испытании и к заготовкам при изготовлении деталей совпадали.

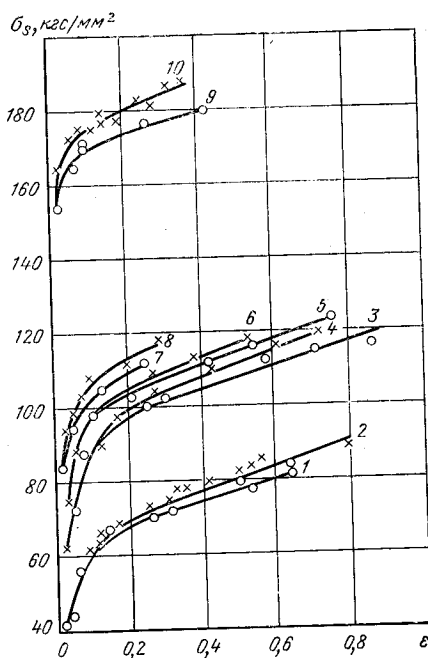
При изготовлении стержневых изделий на многопозиционных пресс-автоматах применяют операции, при которых волоченый металл подвергается осадке (высадке), а также дальнейшему обжатю по диаметру.

Обжатие части стержня проталкиванием через фильер матрицы на многопозиционных пресс-автоматах осуществляется за один или два перехода. При этом происходит пластическая деформация того же знака, что и при волочении. Если учесть, что волочение, как правило, осуществляется за несколько пропусков через волочильное очко, то выходит, что суммарная степень деформации одного и того же знака осуществляется за несколько переходов (многоступенчатое деформирование).

При расчете усилий обжатия части стержня проталкиванием через фильер матрицы при штамповке изделий на многопозиционных пресс-автоматах следует учитывать многоступенчатость деформирования при определении σ_s , поскольку многочисленными опытами установлено, что величины σ_s , определенные по результатам однократного и ступенчатого осаживания, в большинстве случаев не равны друг другу. Опытами автора было установлено, что σ_s горячекатаных, отожженных, нормализованных и улучшенных сталей 20X, 20X, 45X и 30XГСА при ступенчатом осаживании выше напряжений течения σ_s при непрерывном осаживании (рис. 4.1). Различия в σ_s при ступенчатом и непрерывном осаживании начинаются при небольших ϵ (от 0,03 до 0,10). Эти различия при максимальных ϵ возникают в наименее прочных материалах (стали 20X — отожженная и горячекатаная, 45X — отожженная и нормализованная), а при минимальных ϵ — в наиболее прочных материалах (улучшенные стали 20X, 45X и 30XГСА). Для указанных сталей разница в величинах σ_s в диапазоне логарифмических степеней деформации от 0,3 до 0,9

Рис. 4.1. Кривые упрочнения сталей марок 20X, 45X и 30XГСА, построенные по результатам непрерывного (1, 3, 5, 7, 9) и ступенчатого (2, 4, 6, 8, 10) осаживания:

1, 2 — 20X горячекатаная; 3, 4 — 45X отожженная; 5, 6 — 45X нормализованная; 7, 8 — 45X улучшенная, $HB285$ кгс/мм²; 9, 10 — 30XГСА улучшенная, $HB 302 \pm \pm 311$ кгс/мм² (по данным автора и Соколова Л. Д.)



составляет 5—10 кгс/мм², причем с ростом степени деформации эта разница возрастает.

Если степени деформации между отдельными нагружениями велики, то влияние ступенчатого нагружения не скажется на σ_s . Так, опытами автора на примере сталей 20 и 45X показано, что если логарифмическая степень деформации между отдельными ступенями осаживания составляет 0,45—0,65, то напряжения течения при прерывистом и непрерывном нагружении совпадают.

Необходимо иметь в виду, что для некоторых сталей влияние ступенчатого нагружения на σ_s отсутствует. При осадке образцов из отожженной, нормализованной и улучшенной стали 12ХНЗА и нормализованной и улучшенной стали 40ХНМА не было обнаружено разницы между σ_s при ступенчатом и непрерывном осаживании.

Поскольку еще не установлено, в каких сталях отсутствует влияние ступенчатого нагружения на σ_s , при определении энергосиловых параметров холодной объемной штамповки, осуществляемой в несколько переходов с деформацией одного и того же знака, необходимо механические свойства деформируемого металла учитывать введением величины σ_s , определенной по результатам ступенчатой осадки. При этом диапазон степеней деформации между отдельными ступенями осадки должен соответствовать диапазону степеней деформации, применяемых при изготовлении детали. В этом случае наиболее точно будут повторяться явления, происходящие в металле при осадке образцов и изготовлении деталей.

Для определений усилий деформирования при многопереходной штамповке следует использовать имеющиеся в наличии кривые упрочнения, построенные для предварительно деформированных осадкой сталей.

4.2. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ ВЫСОТЫ К ДИАМЕТРУ

Для определения предельного отношения высоты заготовки к диаметру d_0 , гарантирующего осадку заготовок без изгиба, воспользуемся уравнением (1.9):

$$a_{0*} = \left(\frac{h_0}{d_0} \right)_{\text{пр}} = 2,24 \frac{\sqrt{n}}{\nu}$$

Коэффициент ν в случае осадки образцов с гладкими торцами и отсутствием у них скоса равен 0,5. Значения показателей деформационного упрочнения возьмем из табл. 2.1, 2.2, 2.4 и 2.6.

Расчет a_{0*} для некоторых отожженных металлов и сплавов приведен ниже;

$$\text{для технического железа } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,276}{0,5}} = 2,36;$$

$$\text{для меди } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,47}{0,5}} = 3,06;$$

$$\text{для алюминия } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,151}{0,5}} = 1,73;$$

$$\text{для цинка } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,218}{0,5}} = 2,08;$$

$$\text{для серебра } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,4354}{0,5}} = 2,95;$$

$$\text{для стали 35 } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,173}{0,5}} = 1,86;$$

$$\text{для стали 40X } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,153}{0,5}} = 1,76;$$

$$\text{для стали 40XНМА } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,134}{0,5}} = 1,64;$$

$$\text{для латуни Л63 } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,406}{0,5}} = 2,85;$$

$$\text{для сплава АМг2М } a_{0*} = 2,24 \sqrt{\frac{0,194}{0,5}} = 1,975.$$

Предельное отношение a_{0*} при холодной высадке будем рассчитывать по формуле (1.11)

$$a_{0*} = \frac{1,3}{\nu} \sqrt{\frac{b}{\sigma'_{s0} + 0,28b}}$$

Пример 1. Определим a_{0*} при высадке изделий по схеме, приведенной на рис. 1.3, из волоочной стали 08кп (относительная степень деформации при волочении $q=0,3$). Для рассматриваемого случая $\nu=0,318 \div 0,321$. Величины σ'_{s0} и b определим по графикам, представленным на рис. 1.4 и 1.5 соответственно $\sigma'_{s0} = 54$ кгс/мм² и $b=30$. Тогда

$$a_{0*} = \frac{1,3}{0,3195} \sqrt{\frac{30}{54 + 0,28 \cdot 30}} = 2,75.$$

Пример 2. Определим a_{0*} при высадке изделий по схеме, представленной на рис. 1.3.6 из стали 45X, прошедшей предварительную деформацию в виде волочения ($q=0,2$). Для этого случая $v=0,354 \pm 0,358$, $\sigma_{s0}=83$ кгс/мм² (см. рис. 1.4) и $b=45$. Тогда

$$a_{0*} = \frac{1,3}{0,350} \sqrt{\frac{45}{83 + 0,28 \cdot 45}} = 2,52.$$

4.3. РАСЧЕТ УСИЛИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Для расчета усилий обжатия части стержня проталкиванием через фильер матрицы P_p используем формулы, обеспечивающие хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений усилий: по данным В. Я. Шехтера [20]

$$P_p = \sigma_s \left(2n' - \frac{n' \mu \alpha}{2} - 2 - m' + \frac{n' \mu \epsilon^{\mu \alpha} \epsilon_p}{2 \sin \alpha} + 0,5 \epsilon_p \right) F_0; \quad (4.1)$$

по данным работы [39]

$$P_p = \sigma_{ср} \left(\ln \frac{F_0}{F} + \alpha \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \left(1 + \frac{\mu}{\sin \alpha \cos \alpha} \right) F_0, \quad (4.2)$$

где

$$n' = \frac{0,5 \ln \frac{d_0}{d_p} + 1 + m'}{1 - \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{d_0}{d_p} - \frac{\mu \alpha}{4}}; \quad m' = \frac{2\mu b_{\Pi}}{d_p};$$

μ — коэффициент трения; α — угол конической части матрицы; b_{Π} — ширина цилиндрического пояса фильера; d_0, d_p — диаметр заготовки до и после обжатия соответственно части стержня проталкиванием через фильер матрицы; F_0 — площадь поперечного сечения заготовки до обжатия части стержня проталкиванием через фильер матрицы;

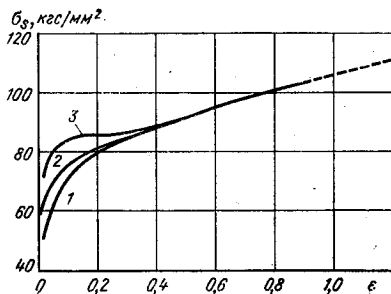
$\sigma_{ср} = \frac{\sigma_{s1} + \sigma_{s2}}{2}$ — среднее напряжение течения металла (σ_{s1}, σ_{s2} — напряжение течения металла до и после обжатия соответственно).

Пример 1. Определить P_p при изготовлении болтов из волоченой стали 45 (степень деформации при волочении $\epsilon_{вол}=0,30$) из прутка с $d_0=6,5$ мм для получения изделия с $d_p=6,01$ мм; обжатие стержня путем проталкивания происходит через фильер матрицы с $\alpha=20^\circ$.

Для расчета P_p воспользуемся уравнением (4.2). Величину μ примем равной 0,15. Значения σ_{s1} и σ_{s2} определим по кривой упрочнения горячекатаной стали 45 (рис. 4.2): $\sigma_{s1}=85$ кгс/мм². Для определения σ_{s2} нужно рассчитать

$$\epsilon_p = \ln \frac{F_0}{F_p} = \ln \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^2 = 0,157.$$

Рис. 4.2. Кривые упрочнения сталей 45 (по опытам автора): 1 — горячекатаной; 2 и 3 — волоченой со степенью обжатия при волочении соответственно 0,13 и 0,30



Суммарная степень деформации $\epsilon_c = \epsilon_{\text{вол}} + \epsilon_p = 0,30 + 0,157 = 0,457$. Для $\epsilon_c = 0,457$
 $\sigma_{s2} = 91 \text{ кгс/мм}^2$.
 Среднее значение

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{85 + 91}{2} = 88 \text{ кгс/мм}^2.$$

Тогда

$$P_p = 88 \left[\ln \left(\frac{6,5}{6,01} \right)^2 + 0,0555 \frac{4}{\sqrt[3]{3}} \right] \left(1 + \frac{0,15}{\sin 20^\circ \cos 20^\circ} \right) 3,14 \frac{6,5^2}{4} = 6600 \text{ кгс.}$$

Пример 2. Определить P_p при изготовлении болтов из отожженного сплава ВТ16 из прутка с $d_0 = 5,5 \text{ мм}$ для получения изделия с $d_p = 4,99 \text{ мм}$; обжатие стержня путем прокатки происходит через фильер матрицы с $\alpha = 20^\circ$ и $b_L = 1,5 \text{ мм}$.

Воспользуемся уравнением (4.1). Примем $\mu = 0,15$. Значения σ_s определим по кривой упрочнения отожженного сплава ВТ16 (рис. 4.3). Найдем

$$\epsilon_p = \ln \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^2 = \left(\frac{5,5}{4,99} \right)^2 = 0,193.$$

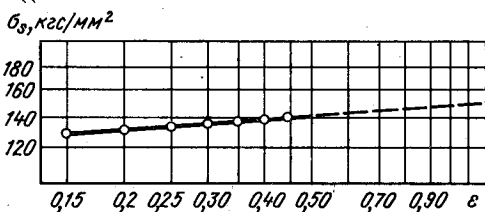


Рис. 4.3. Кривая упрочнения отожженного сплава ВТ16 (по данным автора)

Поскольку обжатие осуществляется над отожженным сплавом ВТ16, то $\epsilon_c = 0,193$. Величина $\sigma_s = 132 \text{ кгс/мм}^2$. Рассчитаем m' , n' и P_p :

$$m' = \frac{2 - 0,15 \cdot 1,5}{4,99} = 0,0905;$$

$$n' = \frac{0,5 \ln \frac{5,49}{4,99} + 1 + 0,0905}{1 - \frac{0,15}{0,055} \ln \frac{5,49}{4,99} - \frac{0,15 \cdot 0,055}{4}} = 1,68;$$

$$P_p = 132 \left[\left(2 \cdot 1,68 - \frac{1,68 \cdot 0,15 \cdot 0,055}{2} - 2 - 0,0905 + \frac{1,68 \cdot 0,15 \cdot 2,72 \cdot 0,15 \cdot 0,055}{2 \cdot 0,3420} + 0,5 \cdot 0,193 \right) \frac{3,14}{4} (5,5)^2 = 4430 \text{ кгс} = 4,43 \text{ тс.} \right]$$

Хорошее совпадение расчетных значений усилий высадки и экспериментальных дает формула [19]:

$$P_B = \sigma_s Z_\Phi \nu \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{D}{H} \right) F_r, \quad (4.3)$$

где $Z_\Phi = 1,1 \div 1,3$ — коэффициент, учитывающий неравномерность напряжений, обусловленную сложностью формы высаживаемого изделия; ν — коэффициент, учитывающий влияние механической схемы деформации, при высадке деталей различной сложности; $\nu = 1,25 \div 1,75$; D, F — соответственно диаметр и площадь поперечного сечения проекции головки высаженного болта; H — высота головки болта.

Рассчитаем P_B при изготовлении болтов из волооченой стали 45 ($\epsilon_{\text{вол}} = 0,30$) с диаметром головки $d_r = 11,95 \text{ мм}$ и $H = 3,70 \text{ мм}$. Для рассматриваемого случая $Z_\Phi = 1,2$; $\nu = 1,25$. Степень деформации при высадке $\epsilon_B = 1,11$. Величину σ_s находим по кривой упрочнения волооченой стали 45 со степенью сжатия при волочении $\epsilon_{\text{вол}} = 0,30$, для указанной ϵ_B напряжение течения σ_s составит 112 кгс/мм^2 .

$$P_B = 112 \cdot 1,2 \cdot 1,25 \left(1 + \frac{0,15}{3} \frac{11,95}{3,70} \right) \frac{3,14}{4} (11,95)^2 = 21800 \text{ кгс} = 21,8 \text{ тс.}$$

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ, ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Экспериментальные кривые упрочнения технического железа, конструкционных углеродистых и легированных, инструментальных углеродистых и легированных сталей, высоколегированных сталей с особыми физическими свойствами, чугунов, различных цветных металлов и сплавов, в том числе труднодеформируемых и сверхпластичных, построенные по результатам испытания пруткового материала при нормальных, повышенных и пониженных температурах, представлены на рис. 5.1—5.145. На рис. 5.146—5.163 приведены экспериментальные кривые упрочнения технического железа, углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов, полученные по результатам испытаний листового материала. Для композиционных материалов экспериментальные кривые упрочнения изображены на рис. 5.164—5.166.

Характеристика материала [химический состав, виды и режимы предварительной термической обработки, виды предварительной обработки в особых условиях (выдержка в условиях постоянного гидростатического давления, осадка с наложением ультразвуковых колебаний), величина зерна и механические свойства], скорость деформации, температура и метод испытания образцов, а также особые условия испытания (в вакууме, с наложением ультразвуковых колебаний, в условиях гидростатического давления) приведены в табл. 5.1—5.20*.

5.1. Данные для кривых упрочнения технического железа

| Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|-------------------------|------|------|-------|-------|---|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| C | Mn | Si | P | S | | | | | |
| 0,025 | 0,14 | 0,15 | 0,01 | 0,016 | Отжиг ($t=890$ °С, 1 ч) | А ₁ | ЛГ | 20 | 5.1 |
| 0,04 | 0,13 | 0,13 | 0,01 | 0,02 | | | | | |
| — | — | — | — | — | Отжиг на крупное зерно: $d_z=0,75$ мм | В | — | -196÷20 | 5.2 |
| — | — | — | — | — | — | Д | — | 20 | 5.20 |
| 0,08 | 0,08 | — | 0,022 | 0,025 | Отжиг ($t=830$ °С, 1 ч, вакуум 10^{-4} мм рт. ст.) | В | — | -196÷700 | 5.3 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

* Табл. 5.1—5.17 относятся к результатам испытаний пруткового материала.

5.2. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных и горячекатаных конструкционных углеродистых сталей и чугуна

| Стали и чугуны | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Механические свойства | | | | Твердость, кгс/мм ² | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|-------------------------|-------------------------|------|-------|-------|-------|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| | С | Mn | Si | P | S | | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | HV | HV | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Низкоуглеродистая сталь | 0,06 | 0,32 | Следы | 0,011 | 0,023 | Отжиг ($t=950$ °С, 1,5 ч, $d_3=50$ мкм) | — | — | — | — | — | — | Е | $a=2,4 \times 10^{-3} \div 0,12$ | -18 ÷ 809 | 5.4 |
| Мвк6 | 0,07 | 0,37 | 0,10 | 0,015 | 0,30 | Отжиг ($t=690$ °С, 5 ч) | 31 | 36 | 45 | 77 | 95 | — | В | $a=1,6$ | 300 | 5.6 |
| | | | | | | Нормализация ($t=930$ °С, 30 мин) | 34 | 37 | 44 | 77 | 104 | $a=0,25 \div \div 40$ | | 20 | | |
| Ма8 | 0,08 | 0,30 | 0,03 | 0,012 | 0,014 | Отжиг ($t=680$ °С, 6 ч) | — | — | — | — | — | 107,2 | | В | — | |
| | | | | | | Горячая прокатка | 24,5 | 36,8 | 40 | 74 | — | 115,3 | | | | |
| Мик7 | 0,08 | 0,39 | 0,08 | 0,009 | 0,013 | Отжиг ($t=680$ °С, 6 ч) | — | — | — | — | — | 91 | В | | | — |
| | | | | | | Горячая прокатка | 26,5 | 43,5 | 40,5 | 73 | — | 127,2 | | | | |
| Ст37 | 0,08 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В | | — | — | |
| | — | — | — | — | — | | | | | | | | — | | | — |
| Ск10 | 0,10 | 0,35 | 0,25 | 0,014 | 0,028 | Отжиг | — | — | — | — | — | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|---|---|------|------|------|------|-----|----------------|----------|---------|---------------------|----------------|-------------------------------|--------|
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0,11 | 0,46 | 0,21 | — | — | Отжиг | 25 | | | | | | | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 20 | 5.11 | |
| | | | | | | — | — | 37,5 | 35,5 | 67 | 111 | $a=10^{-1}$ | 5.12 | | | | | |
| | | | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В ₂ | $\sigma = 300 \div \div 1240$ | 5.21 |
| Ск15 | 0,12 | 0,44 | 0,24 | 0,017 | 0,026 | Отжиг | — | — | — | — | — | — | В | — | 20—200 | 5.5 | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | — | — | — | — | — | — | | | | | 5.10 | |
| | 0,13 | 0,41 | 0,27 | 0,003 | 0,017 | Отжиг ($t=680^\circ\text{C}$, 6 ч) | — | — | — | — | — | 110 | | | | | 5.7 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | 26,5 | 43,5 | 40,5 | 73 | — | 127,2 | | | | | | |
| | 0,15 | 0,42 | 0,29 | 0,014 | 0,014 | Горячая прокатка | — | — | — | — | — | — | | | | | $a=0,003$ | 20—200 |
| С15 | 0,15 | 0,45 | 0,24 | 0,027 | 0,030 | Нормализация ($t=700^\circ\text{C}$, 3 ч) | 30 | 43,5 | 36,5 | 68,6 | — | 125 | В | $a=1,6$ | 20 | 5.6 | | |
| | | | | | | 300 | 5.6 | | | | | | | | | | | |
| 0,15 | 0,47 | 0,30 | 0,018 | 0,028 | Нормализация ($t=900^\circ\text{C}$, 0,5 ч) | 31 | 46 | 37 | 68 | 134 | — | В ₂ | $a=0,25$ | 20—600 | 5.15 | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|-------|-------|--|------|------|------|-----|----------------|---------------------------------------|-------|------|------|--|--|--|---------------------|----------------------------|--|
| 25 | — | — | — | — | — | прокатка | 54,5 | 30,9 | 61,3 | 131 | В | $a=10$ $s=300 \div$ $\div 1240$ | 5.12 | | | | | | | | |
| 30 | — | — | — | — | — | Без термической обработки; отжиг в вакуумной печи ($t=820$ °С, 0,5 ч + $t=660$ °С, 0,5 ч) | — | — | — | — | Д | $b=1$ | 20 | 5.21 | | | | | | | |
| | | | | | | | 30,4 | 57,6 | | | | $e=0,16$ | | 5.23 | | | | | | | |
| 35 | — | — | — | — | — | — | — | 54,8 | — | — | — | Д | $b=4$ | | 5.18 | | | | | | |
| | | | | | | Отжиг в соляной ванне ($t=840$ °С, 15 мин) | — | | | | | В | $b=1$ | | 5.21 | | | | | | |
| | | | | | | Отжиг | — | | | | | Д | ЛМ | | 5.20 | | | | | | |
| St35 | 0,36 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | А ₁ | ЛГ | | 5.22 | | | | | | | |
| Ск35 | 0,37 | 0,64 | 0,27 | 0,017 | 0,019 | Отжиг | — | — | — | — | В | | | | 5.8 | | | | | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | | | | | | | | 5.10 | | |
| С35 | — | — | — | — | — | Отжиг | 33 | — | — | — | — | | | | В | | | | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 5.11 | |
| | | | | | | — | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Нормализация ($t=840$ °С, 0,5 ч) | 44 | | | | | 66 | 28 | 53 | | | | | 180 | $a=0,25 \div$ $\div 40$ | |

| Стали и чугуны | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Механические свойства | | | | Твердость, кгс/мм ² | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|------|------|--------|-------|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|--------------------------------|----------------|---|---|---------------------------|----------------|-------|------|------|--------|-------|------------------|-----|---|-------|--------|------|
| | С | Mn | Si | P | S | | σ_t , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | HV | HV | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | — | — | — | — | — | Улучшение ($t=180^\circ\text{C}$) | — | — | — | — | — | — | В | $a=10^{-1}$ $\epsilon=300 \div 1240$ | 20 | 5.12 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Улучшение ($t=320^\circ\text{C}$) | | | | | | | | | | | 556,5 | 461 | | | | | | | | | |
| | | | | | | Улучшение ($t=475^\circ\text{C}$) | | | | | | | | | | | 311 | 311 | | | | | | | | | |
| | | | | | | Отжиг в вакууме ($t=800^\circ\text{C}$) | | | | | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В | $b=1$ | 20—700 | 5.24 |
| | | | | | | Отжиг в вакуумной печи ($t=820^\circ\text{C}$, 0,5 ч, $+650^\circ\text{C}$, 0,5 ч) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Без термической обработки | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | 0,45 | 0,47 | 0,17 | 0,0027 | 0,019 | Отжиг ($t=820^\circ\text{C}$, 1 ч) | — | — | — | — | — | — | А ₁ | ЛГ | 20 | 5.22 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,44 | 0,55 | 0,23 | 0,0023 | 0,010 | Горячая прокатка | 192 | Е | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | — | — | — | — | — | 74,9 | — | Д | $b=4$ | | |
| 45 | — | — | — | — | — | Горячая прокатка | 68,5 | 28,5 | 59 | — | — | В ₁ | $a=10^{-1}$ $\epsilon=300 \div 1240$ | 20 | 5.25 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Улучшение ($t=450^\circ\text{C}$) | 118 | 11,7 | 50 | 311 | — | — | | | | В ₂ | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Без термической обработки | — | — | — | — | — | — | | | | Д | $b=1$ | | | | | | | | | | |

| Стали и чугуны | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Механические свойства | | | | Твердость, кгс/мм ² | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|----------------|-------------------------|------|------|--------|-------|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|--------------------------------|-----|----------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| | С | Mn | Si | P | S | | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | HV | HV | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ст60 | 0,57 | 0,76 | 0,24 | 0,0018 | 0,024 | Отжиг | — | — | — | — | — | — | В | a=8 | 20 | 5.10 |
| | | | | | | Горячая прокатка | — | — | — | — | — | — | | | | |
| Чугун | — | — | — | — | — | — | 43,5 | — | 10 | — | 187 | В | a=10 ⁻¹ v=300÷1240 | 20 | 5.25 | |
| | — | — | — | — | — | | 53,0 | — | 1,5 | 207 | | | | | | |
| 7S10* | 0,10 | 0,57 | 0,08 | 0,052 | 0,122 | Отжиг (t=680 °С, 6 ч) | 32,4 | 43,8 | 31,8 | 63,9 | — | 117 | В | 20 | 5.14 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | 33,2 | 46,0 | 31 | 59,1 | | 126 | | | | |
| | | | | | | Нормализация (t=900 °С, 0,5 ч) и старение (деформирование до $\epsilon=0,1$ + отпуск, t=200 °С, 2 ч) | — | — | — | — | | — | | | | |
| 10S10* | 0,12 | 0,56 | 0,08 | 0,009 | 0,129 | Отжиг (t=680 °С, 6 ч) | 22,8 | 36,6 | 39,6 | 69,8 | 104 | — | В | 20 | 5.14 | |
| | | | | | | Горячая прокатка | 22,4 | 41,3 | 33,8 | 61,8 | 124 | | | | | |
| | | | | | | Нормализация (t=900 °С, 0,5 ч) и старение (деформирование до $\epsilon=0,1$ + отпуск, t=200 °С, 2 ч) | — | — | — | — | — | | | | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.3. Данные для кривых упрочнения термически обработанных и горячекатаных углеродистых инструментальных сталей

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | Предварительная обработка | Метод испытания | Скорость деформации | Температура, °С | № рисунка | | |
|--------|-------------------------|------|------|-------|-------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------|--------|------|
| | С | Mn | Si | P | S | | | | | | | |
| У7 | 0,70 | 0,17 | 0,22 | 0,007 | 0,023 | Отжиг | В | — | 20 | 5.10 | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | |
| | — | — | — | — | — | Отжиг | А | ЛМ | | 5.26 | | |
| У8А | — | — | — | — | — | Отжиг ($t=780$ °С, 1 ч) | А ₁ | ЛГ | 5.22 | | | |
| | 0,81 | 0,26 | 0,24 | 0,006 | 0,025 | Отжиг | В | — | 5.10 | | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | |
| У10А | — | — | — | — | — | Отжиг ($t=770$ °С, 1 ч) | А ₁ | ЛГ | 5.22 | | | |
| | 1,01 | 0,22 | 0,24 | 0,020 | 0,014 | Отжиг | — | $a=3,4 \cdot 10^{-3}$ | 5.27 | | | |
| С100W1 | 0,97 | 0,19 | 0,20 | 0,010 | 0,011 | Отжиг | В | $z=0,16$ | 20 | 5.10 | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | |
| | 0,98 | 0,17 | 0,15 | 0,046 | 0,026 | Отжиг на зернистый цементит | | | | — | — | 5.28 |
| — | 1,0 | 0,26 | 0,20 | — | — | — | В | — | 20 | 5.29 | | |
| | 1,00 | 0,16 | 0,18 | 0,005 | 0,008 | Отжиг | | | | $a=0,008$ | 20—200 | 5.50 |
| | 1,10 | 0,22 | 0,25 | 0,010 | 0,006 | Горячая прокатка | | | | — | 20 | 5.10 |
| | | | | | | Отжиг | | | | | | |
| | | | | | | Горячая прокатка | | | | | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.4. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|----------|-------------------------|------|------|------|------|----|----|-------|-------|
| | C | Mn | Cr | Ni | Si | Mo | Ti | S | P |
| 20X | 0,17 | 0,53 | 0,89 | — | 0,23 | — | — | 0,015 | 0,035 |
| 15Cr3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 40X | 0,42 | 0,47 | 1,14 | — | 0,24 | — | — | 0,016 | 0,01 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 0,38 | 0,50 | 1,0 | 0,11 | 0,25 | — | — | — | — |
| | 0,42 | 0,55 | 1,0 | 0,30 | 0,20 | — | — | 0,024 | 0,018 |
| 45X | 0,47 | 0,69 | 0,91 | — | 0,20 | — | — | 0,014 | 0,019 |
| 41Cr4 | — | — | 1,0 | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10Г2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 40XH | 0,41 | 0,79 | 1,13 | 1,02 | 0,17 | — | — | — | — |
| 16MnCr5 | 0,15 | 1,11 | 0,94 | — | 0,18 | — | — | 0,022 | 0,023 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 18CrNi18 | 0,15 | 0,45 | 1,98 | 0,96 | 0,26 | — | — | 0,09 | 0,015 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

и горячекатаных конструкционных легированных сталей

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-----------------------------------|-------------------|---|---------------------------|-----------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ , % | ψ , % | Твердость НВ, кгс/мм ² | | | | |
| Отжиг ($t=820$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.11 |
| Отжиг | 33 | — | — | — | — | B | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | | 5.33 |
| Отжиг ($t=820$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | A ₁ | ЛГ | | 5.25 |
| Улучшение ($t=450$ °С) | — | 106 | 17,3 | 61 | — | B, B ₂ | $a=10^{-1}$ $\epsilon=300 \div 1240$ | | 5.13 |
| Горячая прокатка | — | — | — | — | 228 | E | — | | 5.1 |
| Нормализация | — | — | — | — | 225 | | | | |
| Улучшение ($t=700, 600, 500$ °С) | — | — | — | — | 255, 321, 387 | | | | |
| Отжиг ($t=820$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | A ₁ | ЛГ | | 5.6 |
| — | — | — | — | — | — | — | $a=1,6$ | 300 | 5.22 |
| Сферондирующий отжиг | — | 38,3 | — | — | — | — | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | — | 5.33 |
| Отжиг ($t=860$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.33 |
| Отжиг ($t=860$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | | | | 5.33 |
| Отжиг на зернистый цементит | 42,3 | 54,2 | 32,7 | 76,2 | — | — | $\epsilon=0,16$ | 300, 20 | 5.34 |
| Нормализация ($t=900$ °С, ч) | 32,8 | 66,9 | 23,4 | 55,3 | — | | | | 5.6 |
| — | — | — | — | — | — | | | | 5.34 |
| Отжиг на зернистый цементит | 43,5 | 57,6 | 28,8 | 78,7 | — | — | $\epsilon=0,16$ | 20 | 5.29 |
| Отжиг | — | — | — | — | — | | | | 5.34 |

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | C | Mn | Cr | NI | Si | Mo | Ti | S | P |
| 20MnCr5 | 0,20 | 1,17 | 1,16 | — | 0,29 | — | — | 0,025 | 0,035 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 20MoCr4 | 0,19 | 0,81 | 0,45 | — | 0,33 | 0,48 | — | 0,017 | 0,019 |
| 42MnV7 (0,10 % V) | 0,45 | 1,80 | — | — | 0,21 | — | — | 0,020 | 0,016 |
| 50Ni Cr13 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 58CrV4 (0,09 % V) | 0,61 | 0,86 | 0,98 | — | 0,26 | — | — | 0,028 | 0,029 |
| 18ХГТ | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 0,25 | 1,0 | 0,80 | 0,13 | 0,20 | — | 0,11 | 0,025 | 0,023 |
| 30ХГТ | 0,28 | 0,95 | 1,20 | 0,10 | 0,23 | — | 0,12 | 0,028 | 0,015 |
| 30ХГСА | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12Х1МФ (0,29 % V) | 0,11 | 0,59 | 1,03 | — | 0,24 | 0,26 | — | — | — |
| 18ХГСН2М | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 30ХСНВФА | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 56 Ni Cr MoV7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 165 Cr MoV46 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 40 Ni Cr Mo15 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X Cr Mo 5 | 0,03 | 0,05 | 4,0 | — | 0,05 | 0,52 | — | — | — |
| X41 Cr Mo V51 (0,45 % V) | 0,40 | 0,24 | 4,93 | — | 0,84 | 1,25 | — | 0,07 | 0,013 |

Примечание. Пояснения по маркам сталей см. на с. 3, 4.

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Твердость HB, кгс/мм ² | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °C | № рисунка | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------|-----|---|-----------------|----------------------|------------------------------|-------------------|------------|------------------------------------|---|----------------|----|------|------|--|---|-----------------------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ , % | ψ , % | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Отжиг на зернистый цементит | 42,3 | 54,2 | 32,7 | 76,2 | — | — | В | $\varepsilon = 0,16$ | 20 | 5.34 | | | | | | | | | | |
| Нормализация ($t = 900^\circ\text{C}$, 1 ч) | 32,8 | 66,9 | 23,4 | 55,3 | | | | | | 5.29 | | | | | | | | | | |
| Отжиг сфероидизирующий | — | — | — | — | | | | | | 5.34 | | | | | | | | | | |
| Отжиг на зернистый цементит | 42,3 | 58,5 | 27,9 | 73,8 | | | | — | В | $a = 0,1 \div 90$ | 20— 700 | 5.35 | | | | | | | | |
| Нормализация ($t = 860^\circ\text{C}$, 1 ч) | 46,8 | 77,4 | 23,8 | 51,9 | | | | | | | | 5.29 | | | | | | | | |
| Отжиг сфероидизирующий | 42,5 | 67,2 | 26,3 | 54,5 | | | | | | | | 5.28 | | | | | | | | |
| Отжиг сфероидизирующий | — | — | — | — | | | | | | 5.33 | | | | | | | | | | |
| Отжиг на зернистый цементит | 41,2 | 65,5 | 28,5 | 63,2 | | | | | | — | — | $\varepsilon = 0,16$ | — | 5.13 | | | | | | |
| Отжиг ($t = 860^\circ\text{C}$, 1 ч) | — | — | — | — | | | | | | | | | | A ₁ | ЛГ | 5.25 | | | | |
| Нормализация | | | | | | | | | | | | | | 170 | Е | 5.36 | | | | |
| Нормализация | | | | | 196 | — | 5.37 | | | | | | | | | | | | | |
| Улучшение $t_{\text{отп}} = 540^\circ\text{C}$ | | | | | 125 | 13,5 | 51 | | | | | B ₁ , B ₈ | $a = 10^{-1}$; $\sigma = 300 \div 1240$ | 5.36 | | | | | | |
| — | | | | | — | — | — | | | | | — | — | — | 20 | 5.37 | | | | |
| Нормализация ($t = 960^\circ\text{C}$), отпуск ($t = 740^\circ\text{C}$) | | | | | | | | — | — | | | | | | | — | В | ЛМ $\sigma = 10 \div 200$; $\sigma = 100$ | 5.19 | |
| — | | | | | | | | — | — | | | | | | | — | Д | — | 5.25 | |
| Улучшение ($t_{\text{отп}} = 300^\circ\text{C}$) | | | | | | | | — | — | | | | | | | — | 477 | B ₁ , B ₈ | $a = 10^{-1}$; $\sigma = 300 \div 1240$ | 5.11 |
| Отжиг сфероидизирующий | | | | | | | | — | 52 46 | | | | | | | — | — | — | В | $a = 5 \cdot 10^{-4}$ |
| Отжиг | | | | | | | | — | — | — | — | | | | | — | 5.28 | | | |
| Отжиг на зернистый цементит | 27,2 | 63,5 | 29,0 | 72,5 | | | | $\varepsilon = 0,16$ | 5.28 | | | | | | | | | | | |

5.5. Данные для экспериментальных кривых упрочнения горячекатаных и термически

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------------|------|------|----------------|--------------|------|----|--------|--------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Ti | Mo | P | S |
| 07X16H6 | 0,07 | 0,34 | 0,40 | 16,0 | 7,40 | — | — | 0,017 | 0,06 |
| X12CrNi17.7 (сорт А) | 0,09 | 0,53 | 0,29 | 17,23 | 7,85 | — | — | 0,020 | 0,04 |
| X12CrNi 17.7 (сорт В) | 0,10 | 0,54 | 0,33 | 17,19 | 7,84 | — | — | 0,016 | 0,008 |
| X5CrNi18.9 | 0,06 | 0,8 | 0,65 | 18,5 | 10 | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12X18H9 | 0,09 | 1,47 | 0,37 | 16,7 | 7,80 | — | — | — | — |
| | ≤0,12 | ≤2,0 | ≤0,8 | 17,0— 19,00 | 8,0— 10,0 | — | — | ≤0,035 | ≤0,020 |
| X12CrNi18.8 | 0,094 | 1,20 | 0,46 | 18,86 | 9,71 | — | — | 0,024 | 0,022 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X10CrNiTi18,9 | 0,046 | 1,49 | 0,51 | 17,81 | 11,15 | 0,65 | — | 0,024 | 0,06 |
| | 0,072 | 1,42 | 0,50 | 18,0 | 10,30 | 0,59 | — | 0,025 | 0,026 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

обработанных аустенитных и других высоколегированных сталей

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | НВ, кгс/мм ² | | | | |
| Нормализация от $t=1000^\circ\text{C}$ | | | | | | В | — | 20 | 5.43 |
| | | | | | | Д | $a=0,1$ | 20—140 | 5.48 |
| | | | | | | | | 20—50 | 5.49 |
| | | | | | | В | | 20 | 5.50 |
| | | | | | | Д | | 20—140 | 5.48 |
| Закалка | 30,5 | — | — | — | | | | 20 | 5.46 |
| | | | | | | | | | 5.8 |
| | | | | | | | | | $a=5 \cdot 10^{-4}$ |
| Нормализация | | | | | | | | 5.42 | |
| | | | | | | | | 5.43 | |
| Закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | | | | | | В | — | 20—150 | 5.41 |
| Закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$, осадка в холодном состоянии до $\delta=6,5\%$, старение ($t=300^\circ\text{C}$, 10 ч) | | | | | | | | | |
| Гомогенизирующий отжиг, закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 22,9 | 57,0 | 65,0 | 79,8 | | | $a=0,16$ | | 5.45 |
| — | | | | | | | — | 20 | 5.42 |
| Закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | | | | | | | $a=0,003$ | 20—200 | 5.50 |
| Гомогенизирующий отжиг, закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 25 | 58,9 | 51,0 | 73,1 | | В | $a=0,16$ | | 5.45 |
| Закалка | — | — | — | — | | | — | 20 | 5.8 |

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------------|------|------|-------|-------|------|------|--------|-------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Ti | Mo | P | S |
| 12X18H9T | 0,09 | 1,32 | 0,68 | 17,97 | 9,45 | 0,46 | — | — | — |
| | 0,1 | 1,6 | 0,6 | 17,8 | 8,8 | 0,52 | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12X18H10T | 0,10 | 1,6 | 0,6 | 18,0 | 10,0 | — | — | — | — |
| X8CrNiTi18.10 | 0,12 | 1,50 | 0,20 | 17,50 | 9,90 | 0,72 | — | 0,011 | 0,023 |
| X8CrNiTi18.12 | 0,08 | 1,60 | 0,49 | 17,43 | 12,95 | — | — | 0,16 | 0,008 |
| X12CrNi18.16 | 0,040 | 0,76 | 0,46 | — | — | — | — | 0,070 | 0,014 |
| 304 ² | 0,026 | 1,72 | 0,54 | 19,02 | 10,80 | — | — | 0,026 | 0,05 |
| X5CrNiMo18.10 | 0,052 | 1,53 | 0,57 | 17,90 | 11,72 | — | 2,25 | 0,033 | 0,021 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10X17H13M2T | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X10CrNiNb18.9 | 0,08 | 1,40 | 0,57 | 18,21 | 10,90 | — | — | 0,024 | 0,028 |
| X10CrNiMoTi 18.10 | 0,071 | 1,90 | 0,62 | 17,64 | 11,92 | 0,45 | 2,25 | 0,0024 | 0,018 |

Продолжение табл. 5.5

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|-----------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | НВ, кгс/мм ² | | | | |
| Закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$, 0,5 ч | — | — | — | — | | A ₁ | ЛГ | | 5.42 |
| Закалка в масле от $t=1100^\circ\text{C}$ | — | — | — | — | | B | — | 20—700 | 5.44 |
| — | — | — | — | — | 197 | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.1 |
| — | 24,5 | 54,7 | 67 | 34,5 | — | A | ЛМ | | 5.26 |
| Нормализация | — | — | — | — | — | — | — | | 5.43 |
| Закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 21,3 | 53 | 61,5 | 70 | | B | $a=0,1$; 1,5, 90 | 20—800 | 5.51 |
| — | — | — | — | — | | B | $a=0,1$ | 20 | 5.46 |
| — | — | — | — | — | | D | — | | 5.47 |
| Гомогенизирующий отжиг, закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 19,6 | 50,5 | 52,5 | 77,4 | — | B | $a=0,16$ | | 5.45 |
| Отжиг при $t=1200^\circ\text{C}$ в аргоновой среде, охлаждение с печью до 700°C (всего 2 ч), охлаждение в воде | — | — | — | — | | E | $a=4,5 \div \div 10^{-3}; 44$ | 64—1230 | 5.52 |
| Гомогенизирующий отжиг, закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 24,3 | 57,1 | 58,5 | 78,7 | | B | $\varepsilon=0,16$ | 20 | 5.45 |
| Закалка в воде от $t=1080^\circ\text{C}$ | — | — | — | — | | | — | | — |
| — | — | — | — | — | | 141 | A ₁ | ЛГ | 5.42 |
| Закалка в воде от $t=1100^\circ\text{C}$ | — | — | — | — | | | | | |
| — | 26,9 | 63,8 | 50,0 | 69,8 | | | $a=0,16$ | | 5.45 |
| — | 25,2 | 59,5 | 50,0 | 72,5 | | | | | |

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|------|------|---------------|-------------|-------|------|-------|-------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Ti | Mo | P | S |
| X2NiCoMoTi 18.85 (7,41%Co) | 0,020 | 0,05 | 0,11 | 0,06 | 18,56 | 0,045 | 4,75 | 0,006 | 0,006 |
| 20X23H18 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X5CrNiSi25.20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 40X13 | 0,36— 0,45 | ≤0,8 | ≤0,8 | 12,0— 14,0 | — | — | — | 0,030 | 0,025 |
| 37H25 | 0,37 | — | — | — | 25,2 | — | — | — | — |
| 80H25 | 0,60 | — | — | — | 25,1 | — | — | — | — |
| 60Г13 | 0,60 | 13,6 | — | — | — | — | — | — | — |
| 75Г13 | 0,75 | 13,6 | — | — | — | — | — | — | — |
| 110Г13 | 1,10 | 13,6 | — | — | — | — | — | — | — |
| С высоким содержанием марганца | — | 15 | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | 24 | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | 30 | — | — | — | — | — | — | — |
| 20X13 | 0,17 | 0,58 | — | 12,58 | — | — | — | — | — |
| X10Cr13 | 0,20 | 0,64 | 0,40 | 14,04 | — | — | — | 0,012 | 0,017 |
| | 0,08 | 0,40 | 0,40 | 13,5 | 0,3 | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X10CrAl13 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14X17H2-III | 0,11— 0,17 | ≤0,8 | ≤0,8 | 16,0— 18,0 | 1,5— 2,5 | — | — | — | — |
| X8Cr17 | 0,017 | 0,31 | 0,43 | — | — | — | — | 0,033 | 0,008 |
| X8CrTi17 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X8CrMoTi17 | 0,055 | 0,34 | 0,27 | 17,20 | — | 0,71 | 1,86 | — | — |
| X22CrNi17 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X10CrAl24 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3. 4.

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------|------------|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | НВ, кгс/мм ² | | | | |
| Гомогенизирующий отжиг, закалка в воде от $t=1050^\circ\text{C}$ | 78,8 | 102,7 | 13,1 | 72,5 | | В | | 5.28 | |
| Закалка в масле от $t=1100^\circ\text{C}$ | | | | | | | 20-700 | 5.44 | |
| Закалка | | | | | | | | 5.8 | |
| Отжиг | 30,0 | 64,0 | 13,0 | 57,0 | | А | ЛМ | 5.26 | |
| Закалка в воде от $t=1150^\circ\text{C}$ | | | | | | | 20 | 5.53 | |
| Нагрев в вакууме, 15 мин; диаметр зерна $d_3=26$ мкм | | | | | | | | | |
| Закалка в воде от $t=950^\circ\text{C}$ (нагрев в вакууме), диаметр зерна $d_3=15$ мкм | | | | | | | | 5.54 | |
| Закалка в воде от $t=950^\circ\text{C}$ (нагрев в вакууме, выдержка 15 мин), диаметр зерна $d_3=3$ мкм | - | - | - | - | | Д | -196÷400 | 5.55 | |
| Закалка в воде от $t=950^\circ\text{C}$ (нагрев в вакууме, выдержка 1,5 ч), диаметр зерна $d_3=180$ мкм | | | | | | | | | |
| - | | | | | | | 20 | 5.66 | |
| Отжиг ($t=870^\circ\text{C}$, 1 ч) | | | | | | А ₁ | ЛГ | 5.33 | |
| Отжиг | 41,5 | 59,5 | 28,7 | 66,5 | | | $a=0,1\div 90$ | 20-700 | 5.32 |
| Отжиг | | | | | | | | | 5.29 |
| - | | | | | | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 20 | 5.11 |
| - | | | | | | | | | 5.42 |
| - | | | | | | | | | 5.8 |
| Закалка в масле от $t=1020^\circ\text{C}$, отпуск, $t=350^\circ\text{C}$, 1 ч | | | | | | Д | | 20-600 | 5.56 |
| Отжиг | | | | | | | | 20-200 | 5.50 |
| - | | | | | | | | | 5.8 |
| Отжиг | | | | | | В | | 20 | 5.9 |
| - | | | | | | | | | 5.42 |
| - | | | | | | | | | 5.8 |

5.6. Данные для экспериментальных кривых упрочнения горячекатаных и термически обработанных легированных инструментальных и шарикоподшипниковой сталей

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | | | | | Предварительная обработка | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|--------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|------|------|--------|--------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|------------|--------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| | C | Mn | Si | Cr | W | V | Ni | Cu | S | P | | σ_{T1} , кгс/мм ² | σ_{B1} , кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X12Ф1 | 1,58 | 0,23 | 0,17 | 11,9 | — | 0,33 | 0,25 | — | 0,020 | 0,026 | Отжиг | — | — | — | — | В | $a=34 \cdot 10^{-3}$ | 20—800 | 5.38 | |
| 7Х3 | 0,68 | 0,31 | 0,25 | 3,7 | — | — | — | 0,20 | 0,025 | 0,020 | | — | — | — | — | | | | | |
| 5ХНВ | 0,56 | 0,63 | 0,16 | 0,71 | 0,64 | — | 1,56 | — | 0,032 | 0,030 | | — | — | — | — | | | | | |
| 9ХС | 0,92 | 0,36 | 1,27 | 0,98 | — | — | 0,22 | — | 0,023 | 0,025 | | — | — | — | — | | | | | |
| 3Х2В8Ф | 0,38 | 0,34 | 0,18 | 2,46 | 7,93 | 0,45 | 0,21 | 0,18 | 0,024 | 0,025 | — | 42 | 75,9 | 25 | 57 | А | ЛМ | 20 | 5.26 | |
| ХВГ | 0,95 | 1,05 | 0,28 | 0,98 | 1,32 | — | 0,19 | — | 0,025 | 0,030 | | — | — | — | — | | | | | |
| ШХ15 | 0,95—1,05 | 0,80—1,10 | 0,15—0,35 | 0,90—1,20 | 1,20—1,60 | — | — | — | — | — | Горячая прокатка | — | 72,1 | — | — | В Д | $a=3,4 \cdot 10^{-3}$ $b=4$ | 20—800 | 5.38 5.18 | |
| | 0,95—1,05 | 0,20—0,40 | 0,17—0,37 | 1,30—1,65 | — | — | — | — | — | — | | 35,8 | 71 | 30 | 58,9 | | | | | А |
| Р6М3 (3,0—3,6% Mo) | 0,85—0,95 | ≤0,4 | ≤0,5 | 3,0—3,5 | 5,5—6,5 | 2,0—2,5 | ≤0,4 | — | ≤0,030 | ≤0,030 | — | — | — | — | — | Е | $b=1,7$ | 20 | 5.17 | |
| Р12 | 0,8—0,9 | ≤0,4 | ≤0,5 | 3,1—3,6 | 12,0—13,0 | 1,5—1,9 | 0,4 | — | ≤0,030 | ≤0,030 | | — | — | — | — | | | | | |
| Р18 | 0,7—0,8 | ≤0,4 | ≤0,5 | 3,8—4,4 | 17,0—18,5 | 1,0—1,4 | 0,4 | — | ≤0,030 | ≤0,030 | Отжиг | 42 | 75,9 | 25 | 57 | А | ЛМ | — | 5.26 | |
| 105Cr4 | 1,05 | 1,0 | 0,2 | 0,55 | — | — | — | — | — | — | | — | — | — | — | | | | | |
| X210Cr2 | 1,98 | 0,35 | 0,34 | 11,69 | — | — | — | — | 0,021 | 0,021 | Отжиг на зернистый цементит ($t=860$ °С, 12 ч, охлаждение с печью) | 27,8 | 77,0 | 13,4 | 21,2 | В | $z=0,16$ | — | 5.28 | |
| 100Cr6 | 1,10 | 0,30 | 0,23 | 1,40 | — | — | — | — | 0,019 | 0,013 | | Отжиг сфероидизирующий | 43 | 79 | 23 | | | | | 43 |
| 80CrV3 | Соответствует марке стали 8ХФ | | | | | | | | | | — | — | — | — | — | 20 | 5.40 | | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.7. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных и горячекатаных меди и медных сплавов

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | | | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Метод испытаний | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка | | | |
|-------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|--|---|---|
| | Cu | Zn | Sn | Pb | Ni | Fe | Si | Mn | Al | Sb | | | | | | | | |
| Медь | 99,99 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $d_3 = 0,021 \div 0,909$ мкм | Д | — | 20 | 5.90 | | | |
| | | | | | | | | | | | Отжиг в вакууме ($t = 410^\circ\text{C}$, 24 ч, $d_3 = 0,029$ мкм) | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | Отжиг в вакууме ($t = 700^\circ\text{C}$, 24 ч, $d_3 = 0,041$ мкм) | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | Отжиг в вакууме ($t = 1000^\circ\text{C}$, 5 ч, $d_3 = 0,30$ мкм) | | | | | | | |
| М2 | 99,99 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | V_0 | ЛГ | — | 5.92 | | | | |
| | | | | | | | | | | | Отжиг ($t = 540^\circ\text{C}$, 1ч) | | | | | | | |
| Медь | 99,9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $d_3 = 20, 30, 80$ мкм | В | — | — | 5.93 | | | |
| | | | | | | | | | | | $a = 8 \cdot 10^{-4} \div 6 \cdot 10^2$ | | | | | | | |
| Электромедь | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Д | — | — | 5.75 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Отжиг | Б | — |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Прессование, $\sigma_T = 6,5$ кгс/мм ² | | |

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | | | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка | |
|------------------------|-------------------------|---------------------|------|------|-----|------|----|------|------|----|---|-----------------|---|---------------------------|-----------|-------------------------------------|
| | Cu | Zn | Sn | Pb | Ni | Fe | Si | Mn | Al | Sb | | | | | | |
| Электролитическая медь | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Д | — | —195÷ +220 | 5.95 | |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $d_3=50$ мкм | | | | | |
| Медь высокой чистоты | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В ₀ | $a=5 \cdot 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^2$ | 18— —800 | 5.96 | |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Горячее деформирование | | | | | Д |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг в вакууме | | | | | |
| Медь технически чистая | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. ($t=700^\circ\text{C}$, 5 ч) | В | $a=8 \cdot 10^{-4}$ | — | 5.69 | |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | Е |
| Латуни: CuZn15 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг в вакууме ($t=600^\circ\text{C}$) | Д | $b=2$ | 20 | 5.75 | |
| CuZn30 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | |
| Л63 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг в вакууме ($t=600^\circ\text{C}$) | В | — | 20— —700 | 5.24 | |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | Д |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | Отжиг ($t=600^\circ\text{C}$, 1ч) |
| Ms63 | 62—65 | Ос- таль- ное | <0,1 | <0,2 | 0,5 | <0,2 | — | <0,1 | <0,1 | — | — | — | — | 20 | — | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|-------------|------|--------------|-----|------|---|--------------|--------------|------|---|----------------|---------------------|---------------|
| Ms60 | 59,5—62 | Ос-таль-ное | <0,2 | <0,3 | 0,5 | <0,3 | — | <0,2 | <0,1 | — | — | В ₀ | — | 5.9 5.99 |
| SoMs59 | 57—62 | Ос-таль-ное | ≤0,5 | ≤0,8 | 2—3 | ≤0,5 | — | 1,5— —2,5 | 0,3— —1,5 | — | — | — | — | — |
| CuZn37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 5.77 |
| CuZn36 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $a=2,5$ | 18— —800 |
| ЛС59-1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг | А | $z=0,1 \div 1,0$ | 5.65 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $\sigma_T=11,4$ кгс/мм ² ; $\sigma_B=37$ кгс/мм ² ; $\delta_5=$ $=13,7\%$; $\psi=49\%$ | | ЛМ | 5.26 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Д, Е | — | 5.17; 5.20 |
| ЛС59-1В | 60,96 | — | — | 1,2 | — | — | — | — | — | — | Отжиг ($t=600^\circ\text{C}$, 1ч) | А ₁ | ЛГ | 5.93 |
| Ms60Pb | 59,5— —62,0 | — | <0,2 | 0,3÷ +3,0 | — | <0,3 | — | <0,2 | — | <0,1 | — | В | — | 5.9; 5.99 |
| CuZn31Si | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг | Д | — | 5.101 |
| G-SoMs57F45 | 57 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В ₀ | — | 5.99 |
| G-SoMs57F60 | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | — | |
| CuNi18Zn20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 5.77 |
| Br 52 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $\sigma_T=39,6$ кгс/мм ² ; $\sigma_B=54,4$ кгс/мм ² ; $\delta_5=33,8\%$; $\psi=56,4\%$ | А | ЛМ | 5.26 |
| BrАЖ9-4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | $\sigma_T^0=20,8$ кгс/мм ² ; $\sigma_B=59$ кгс/мм ² ; $\delta_5=$ $=35\%$; $\psi=46\%$ | | | |

20

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | | | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|------------------|-------------------------|----|---------------|------|-------------|-----|----|------|-------------|------|---|-----------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| | Cu | Zn | Sn | Pb | Ni | Fe | Si | Mn | Al | Sb | | | | | |
| Бронза | 98,73 | — | 1,27 | — | — | — | — | — | — | — | $d_3 = 50$ мкм | Д | $a = 1,6 \cdot 10^{-4}$ | -195 ÷ 450,22 | 5.98 |
| | 99,83— 95,1 | | 0,17— 4,90 | — | — | — | — | — | — | — | | | | | |
| Бронзы: CuSn8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | В | $a = 5,0 \cdot 10^{-4}$ | | 5.77 |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Отжиг | Д | | | 5.101 |
| G-SnBz10 | 89—91 | — | 9—11 | <1 | <1 | — | — | — | — | 0,25 | — | В | — | 20 | 5.102 |
| G-SnBz12 | Остальное | — | 12 | | 1,5 | — | — | — | — | — | | | | | |
| G-SnBz14 | 85—87 | — | 13—15 | 1 | 1 | — | — | — | — | 0,25 | | | | | |
| G-SnBz16 | Остальное | — | 16 | | 1,5 | — | — | — | — | — | | | | | |
| G-SnPbBz5 | | — | 10 | 5 | 4,0 | — | — | — | — | — | | | | | |
| G-SnPbBz15 | | — | 10 | 15 | 1,5 | — | — | — | — | — | | | | | |
| G-SnPbBz20 | | — | 5 | 22 | 1 | — | — | 1 | — | 1 | | | | | |
| G-SnPbBz25 | | — | 1 | 29 | — | — | — | — | — | — | | | | | |
| G-NiAlBzF50 | 78—82 | — | <0,2 | <0,1 | 4,0— 6,5 | 4—6 | — | <1,5 | 7,8— 9,8 | — | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---------------------|------|------|-------------|------|-------------|------|--------------|------|------------------------|----|-----|----|-------|------|---|---|---|------|
| G-NiAlBzF60 | 77—81 | — | <0,2 | <0,1 | 4,0— 6,5 | 4—6 | — | <1,5 | 8,8— 10,8 | — | Отжиг | Д | б=2 | 20 | 5.75 | | | | | |
| Rg5 | 84—86 | 4—6 | 4—6 | 4—6 | <2 | <0,3 | — | — | — | 0,35 | | | | | 5.101 | | | | | |
| CuAl4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | 5.94 | | | | | |
| CuAl7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | 5.97 | | | | | |
| CuAl10Fe | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | 5.103 | | | | | |
| CuCr (Cr=0,5%) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | 5.95 | | | | | |
| Сплавы меди с никелем и цинком: Cu—Ni | 75,53 | — | — | — | 24,28 | — | — | — | — | — | Горячее деформирование | Д | — | — | 5.94 | | | | | |
| Ns65.12 | 65 | — | — | — | 12 | — | — | — | — | — | — | В, | 20 | — | 5.94 | | | | | |
| Ns62.18 | 62 | Ос- таль- ное | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | | | Б | — | — | — | 5.95 |
| Ns62.18Pb | | | — | 2 | 18 | — | — | — | — | — | | | | | | | | | | |
| Ns57.12 | 57 | — | — | — | 12 | — | — | — | — | — | | | | | | Б | — | — | — | 5.94 |
| Сплавы меди с никелем и кремнием: CuNi1Si | — | — | — | — | 0,8— 1,3 | — | 0,4— 0,6 | — | — | — | — | Б | — | — | — | 5.94 | | | | |
| CuNi2Si | — | — | — | — | 1,7— 2,1 | — | 0,5— 0,7 | — | — | — | | | | | | 5.95 | | | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.8. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных и

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|----|
| | Al | Cu | Mn | Mg | Si | Fe | Zn | Cr | Ti |
| Al 99,995 | 99,995 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Al 99,99 | 99,99 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 99,99 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Al 99,5 | 99,50 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 99,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 99,5 | 0,01 | 0,026 | 0,033 | 0,092 | 0,23 | 0,01 | — | — |
| | 99,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 99,5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 99,5 | — | — | — | 0,15 | 0,28 | — | — | — |
| Al 99,4 | 99,4 | 0,01 | 0,017 | 0,048 | 0,49 | — | — | — | — |
| Алюминий технически чистый | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AD1 | Остальное | 0,009 | — | — | 0,16 | 0,25 | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AD31 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AMg2M | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AMg6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

горячекатаных алюминия и алюминиевых сплавов

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|---|----------------------------------|----------------------------------|--------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|-----------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ , % | | | | |
| Отжиг ($t=550$ °С, 3 ч) | | | | Е | $a=2,4 \cdot 10^{-3}$; 0,12 | -196÷564 | 5.72 |
| Отжиг, $d_3=150$ мкм | | 19,15 | | Д | $a=1,67 \cdot 10^{-1}$ | -175÷80 | 5.72 |
| Отжиг, $d_3=440$ мкм | | 20 | | | | | |
| Отжиг, $d_3 = 30 \div 120$ мкм | | | | В | — | -180÷20 | 5.74 |
| Рекристаллизационный отжиг | | | | Д | $b=2$ | 20 | 5.75 |
| Рекристаллизационный отжиг ($t=400$ °С, 3 ч) | | | | В | $a=0,25$; 40; 63 | 20—480 | 5.76 |
| Прессование | 4,0 | | | | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | | 5.11 |
| | — | | | | — | | 5.77 |
| Отжиг | 2,7 | 7,9 | 34 | | — | | 5.82 |
| — | | | | | $\sigma=0,09 \div 20,6$ | | 5.78 |
| — | | | | Е | $a=0,02$ | 20—650 | 5.79 |
| Отжиг ($t=340$ °С, 1 ч) | | | | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.73 |
| — | | | | Д | — | | 5.21 |
| — | | | | B ₇ | $a=80$ | 350; 450 | 5.80 |
| Отжиг | | | | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.73 |
| — | | | | B ₇ | $a=80$ | 350; 450 | 5.80 |

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| | Al | Cu | Mn | Mg | Si | Fe | Zn | Cr | Ti |
| Сплавы: AlMn | 0,014 | 0,094 | 0,09 | 0,11 | 0,27 | 0,01 | 0,14 | — | — |
| AlMg 1 | — | — | 0,1 | 0,9 | — | — | — | — | — |
| AlMg 3 | — | — | 0,30 | 2,7 | — | — | 0,05 | — | — |
| AlMg 4 | — | — | 0,3 | 4,1 | — | — | 0,05 | — | — |
| AlMg 4,5 | — | 0,036 | 0,04 | 4,83 | 0,15 | 0,22 | 0,01 | 0,14 | — |
| AlMgMn | — | 0,065 | 0,81 | 2,45 | 0,12 | 0,18 | <0,01 | — | 0,002 |
| AlMg 4,5 Mn | — | 0,01 | 0,77 | 4,41 | 0,10 | 0,16 | 0,01 | 0,13 | 0,002 |
| AK6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AK8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Д16 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AlMgSi1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| АВМц | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AlCuMg | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AlCuMg 2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| AlZnMgCu 1,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Д1 | 94,2 | 3,8 | — | — | 0,60 | 0,61 | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

| Предварительная обработка | Механические свойства | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °C | № рисунка | | | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ , % | | | | | | | |
| Рекристаллизационный отжиг ($t=420^\circ\text{C}$, 3 ч) | — | — | — | В | $a=0,25; 4,0; 63$ | 20—480 | 5.81 | | | |
| Отжиг | 5,1 | 12,0 | 27 | | — | 20 | 5.82 | | | |
| | 9,5 | 19,5 | 20 | | | | | | | |
| | 12,5 | 23,4 | 20 | | | | | | | |
| Рекристаллизационный отжиг ($t=420^\circ\text{C}$, 3 ч) | — | — | — | | — | 20—480 | 5.83 | | | |
| — | | | | | | | $a=0,25; 4,0; 63$ | 5.84 | | |
| | | | | | | | | 5.85 | | |
| | | | | | | | | $a=80$ | 5.80 | |
| — | | | | | $\sigma=10\div 20; >100$ | 20 | 5.36 | | | |
| — | | | | | В | $a=80$ | 350; 450 | 5.80 | | |
| Отжиг | | | | — | — | — | А | $b=2; \sigma=6,25\div 50$ | 5.86 | |
| — | | | | — | — | — | Д | — | 5.20 | |
| Волочение + улучшение | | | | — | — | — | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 20 | 5.77 |
| — | | | | — | — | — | | | $\varepsilon=5; \sigma=25\div 30$ | 20—400 |
| Закалка в воде от $t=490^\circ\text{C}$ (выдержка при нагреве 2 ч) | — | — | — | — | — | 20 | 5.88 | | | |
| Закалка в воде от $t=490^\circ\text{C}$, отпуск ($t=140^\circ\text{C}$, 2 ч) | | | | | | | Д | — | 5.88 | |
| Отжиг | | | | | | | В | $a=5 \cdot 10^{-4}$ | 5.77 | |
| — | | | | | | | Д | — | 5.80 | |
| Отжиг ($t=400^\circ\text{C}$, 1 ч) | | | | | | | А ₁ | ЛГ | 5.73 | |
| Отжиг | | | | | | | В | $\varepsilon=0,1\div 1,0$ | 5.65 | |
| — | | | | | | | 34,6 | — | — | — |

5.9. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|------|------------------|------|-----|------|------|----------------|----------------|----------------|
| | Ti | Al | V | Cr | Sn | Fe | C | H ₂ | N ₂ | O ₂ |
| Титан высокой чистоты | 99,969 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Ti 99,8 | 99,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Титан технически чистый | 99,665 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Ti (сорт 1) | — | — | — | — | — | 0,04 | 0,02 | 0,005 | 0,01 | 0,04 |
| Ti (сорт 2) | — | — | — | — | — | 0,15 | 0,02 | 0,005 | 0,02 | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сплавы : OT4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT14 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| BT16 (5,0 % Mo) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 87,6 | — | 4,5 | — | — | — | 0,1 | — | — | — |
| TiAl5Sn2,5 | Остальное | 5,1 | — | — | 2,5 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,1 |
| 317 ¹⁾ | — | 5,0 | — | — | 2,5 | — | — | — | — | — |
| TiAl6V4 | — | 6,4 | 4,0 ₂ | — | — | 0,14 | 0,05 | 0,01 | 0,015 | 0,1 |
| TiV13Cr11Al13 | Остальное | 13,6 | 14,1 | 10,6 | — | 0,27 | 0,02 | 0,014 | 0,03 | 0,1 |
| TiAl8Mo1V1 (0,98 % Mo) | | 7,1 | 1,05 | — | — | 0,03 | 0,02 | 0,002 | 0,02 | 0,01 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

и горячекатаных титана и титановых сплавов

| Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Механические свойства а | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|---|----------------------------------|----------------------------------|------------|--------------|-------------------------|-----------------|--|---------------------------|-----------|
| | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | ψ , % | δ , % | HV, кгс/мм ² | | | | |
| $d_3 = 22$ мкм | | | | | | Д | $b = 0,51$ | -196 | 5.104 |
| Прессование | — | — | — | — | — | В | — | 20 | 5.122 |
| $d_3 = 16$ мкм | | | | | | Д | $b = 0,51$ | -196 | 5.104 |
| Отжиг ($t = 650$ °С, 15 мин, высокий вакуум) | 35 | 42 | 21 | 34 | 196 | В ₁ | $a = 4 \cdot 10^{-3} \div 10^3$ | 20 | 5.105 |
| — | 61 | 66 | 19 | 30* | 274 | | $a = 0,25 \div 16,0$ | 20—1000 | 5.106 |
| — | 61 | 66 | 19 | 30* | 274 | | $a = 4 \cdot 10^{-3} \div 10^3$ | 20 | 5.105 |
| Горячая прокатка | | | | | | В | $a = 16$ | | 5.107 |
| Отжиг ($t = 780$ °С, 2 ч, вакуум 10^{-4} мм рт. ст.) | | | | | | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.111 |
| Отжиг ($t = 750$ °С, 1 ч) | — | — | — | — | — | Д | $a = 2,7 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^2$ | 20—1000 | 5.108 |
| | | | | | | | $a = 2,7 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-2}$ | 20—1000 | 5.108 |
| | | | | | | | $a = 2,7 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-2}$ | 20—1000 | 5.108 |
| Отжиг ($t = 780$ °С, 2 ч, вакуум 10^{-4} мм рт. ст.) | | | | | | A ₁ | ЛГ | 20 | 5.111 |
| Отжиг | | | | | | В | $\varepsilon = 0,1 \div 10$ | 20 | 5.65 |
| Отжиг ($t = 800$ °С, 1 ч, вакуум 10^{-4} мм рт. ст.) | — | — | — | — | — | | $a = 3,3 \cdot 10^{-3} \div 3,3 \cdot 10^{-2}$ | -196÷900 | 5.109 |
| Отжиг ($t = 800$ °С, 30 мин, высокий вакуум) | 73 | 83 | 19 | 34 | 352 | | $a = 0,25 \div 16$ | 20—1000 | 5.110 |
| — | — | — | — | — | — | Д, В | $a = 7 \cdot 10^{-5}$ | 20 | 5.114 |
| Отжиг ($t = 650$ °С, 2 ч, высокий вакуум) | 87 | 104 | 11 | 28 | 361 | В | $a = 0,25 \div 16$ | 20—1000 | 5.110 |
| Отжиг ($t = 700$ °С, 30 мин, высокий вакуум) | 82 | 102 | 14 | 33 | 365 | | | | 5.112 |
| Отжиг ($t = 800$ °С, 2 ч) | 84 | 101 | 16 | 42 | 373 | | | 20—1200 | 5.113 |

5.10. Данные для кривых упрочнения сталей, предварительно деформированных в холодном состоянии

| Стали | Содержание элементов, % | | | | | | Предварительная обработка | Степень предварительной деформации, % | Метод испытания | № рисунка |
|-----------|-------------------------|------|------|------|-------|-------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------|
| | C | Mn | Si | Cr | S | P | | | | |
| 10 | 0,13 | 0,40 | 0,20 | 0,05 | 0,032 | 0,019 | Волочение | 13 | E | 5.13 |
| C15 | — | — | — | — | — | — | Растяжение | 14,1 | | 5.62 |
| 20 | 0,21 | 0,60 | 0,23 | 0,10 | — | — | Волочение | 13 | | 5.13 |
| 40X | 0,40 | 0,60 | 0,21 | 0,90 | 0,022 | 0,019 | | A ₁ (M) | — | 5.59 |
| A12 | 0,14 | 0,75 | 0,25 | 0,1 | — | — | | | | |
| 55C2 | 0,56 | 0,74 | 1,64 | 0,1 | — | — | | B (M) | 1,5; 2,5; 5,2; 12,4;18 | 5.60 |
| St42 | — | — | — | — | — | — | | Осадка | 1,3; 2,6; 5,4; 10,1; 20 | D (M) |
| | — | — | — | — | — | — | | | | |
| St70 | — | — | — | — | — | — | Волочение | 1,2; 2,5; 5,0; 10, 15 | B (M) | 5.62 |
| | | | | | | | Осадка | 1,1; 2,5; 5,4; 10,5; 20,8 | | 5.61 |
| St42 | — | — | — | — | — | — | Волочение | 1,5; 5,2; 12,4; 17,9 | D (H) | 5.57 |
| St70 | — | — | — | — | — | — | | 1,2; 2,5; 5,0; 10 | | |
| Y1 (334)* | 0,006 | 0,01 | 2,90 | — | — | — | | 55 | | |

Примечания. 1. Условные обозначения см. на с. 3, 4

5.11. Данные для экспериментальных кривых упрочнения термически обработанных и горячекатаных никеля и его сплавов для пруткового материала при нормальной температуре

| Материал | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Метод испытания | Скорость деформации | № рисунка |
|------------------------------------|---|-----------------|-----------------------|-----------|
| Ni99,9% | $d_0 = 0,058 \div 0,685$ | Д | — | 5.90 |
| Ni99,8% | Отжиг | В _с | $a = 5 \cdot 10^{-4}$ | 5.77 |
| Никель электролитический | Горячее деформирование | Д | — | 5.97 |
| ЭИ437А, ХН77ТЮР, ХН70ВМТЮ | Горячая прокатка | В | $b = 10$ | 5.115 |
| Сплав Ni-Cu (77,52% Ni; 22,30% Cu) | Горячее деформирование | Д | | 5.97 |
| Сплав Ni-Cu (52,40% Ni; 47,50% Cu) | | | | |
| Сплав Ni Cu 30 Fe | Отжиг | В _с | $a = 5 \cdot 10^{-4}$ | 5.103 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.12. Данные для экспериментальных кривых упрочнения пластичных и сплавов, полученных по результатам испытаний в особых условиях

| Материал | Предварительная обработка | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка | |
|--|---|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|-------|
| Свинец технически чистый С2 | Деформация, $\varepsilon = 60\%$ | Д | $b = 4$ | 150 | 5.135 | |
| | Литье | | | 300, 315 | 5.131 | |
| $b = 1; 4$ | | 20, 200 | 5.132 | | | |
| $b = 1$ | | 315 | | | | |
| Деформация, $\varepsilon = 30\%$ | | $b = 4$ | 150; 315 | | | |
| Свинец | Деформация, $\varepsilon = 60\%$ | В _с | — | 20; 100 | 5.33 | |
| | Прессование | | | 20 | | |
| | Прессование, отжиг ($t = 100^\circ\text{C}$ 12 ч) | | | 0-40 | | 5.34 |
| Олово | Деформация в холодном состоянии $\varepsilon = 60\%$ | Д | $b = 4$ | 125 | 5.135 | |
| Алюминий А-85 | Литье | Д | $b = 4$ | 550 | 5.131 | |
| | | | | 625 | 5.135 | |
| — | Деформация в холодном состоянии, $\varepsilon = 60\%$ | Д | $b = 1$ | 275-300 | 5.131 | |
| — | Закалка в воде от 350°C | | | | | |
| Сплав эвтектидный Zn-Al (20% Al, 80% Zn) | Отжиг, $t = 380^\circ\text{C}$ | Е | | $a = 6,3 \cdot 10^{-4}$ | 275 | 5.136 |
| | Закалка в соленой воде + старение при 20°C в течение 40 ч | | | $a = 5 \cdot 10^{-3}$ | 225 | |
| | | | | $a = 1 \cdot 10^{-2}$ | 20 | |
| Сплав эвтектический Sn-Pb | Прессование при $t = 20^\circ\text{C}$ до $\varepsilon = 30, 60$ и 80% | Д | $b = 4$ | 40; 120; 160 | 5.137 | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.13. Данные для экспериментальных кривых упрочнения труднодеформированных и редкоземельных металлов и сплавов

| Материал | Содержание основного элемента, % | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Механические свойства | | | | | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|--|----------------------------------|---|---|---|----------------|------------|----------------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| | | | $\sigma_{\text{т}}$, кгс/мм ² | $\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | HV , кгс/мм ² | | | | |
| Магний | 99,8 | Прессование | | | | | | | | | |
| Молибден | 99,95 | Отжиг ($t=950^\circ\text{C}$, 1 ч вы- сокий вакуум) | | 45 | | | | B_0 | — | 20 | 5.124 |
| Сплав молибдена ВМ1 | — | Отжиг | | | | | | B_1 | $a=2,0$ | 20—1600 | 5.125 |
| Вольфрам | 99,96 | Отжиг ($t=1050^\circ\text{C}$, 1 ч вы- сокий вакуум) | | 69 | | | | B | $\varepsilon=0,1 \div 1,0$ | 20 | 5.65 |
| Сплав вольфрама ВА | — | Отжиг | | | | | | B_1 | $a=2,0$ | 400—1600 | 5.126 |
| Тантал | 99,8 | Отжиг ($t=1200^\circ\text{C}$, 1 ч вы- сокий вакуум) | 29,9 | 35,7 | 32 | 62 | 176 | B | $\varepsilon=0,1 \div 1,0$ | | 5.65 |
| Ниобий | 99,86 | Отжиг ($t=1200^\circ\text{C}$, 1 ч вы- сокий вакуум) | 23,6 | 32,5 | 34 | 75 | 172 | B_1 | $a=4 \cdot 10^{-3} \div 10^3$ | 20 | 5.127 |
| Уран | — | Прокатка | | | | | | | | | |
| Серебро | — | Отжиг | | | | | | | | | |
| | | Отжиг (вакуум 2 ч, диаметр зерна $d_z=0,025$ м) | | | | | | B | $a=0,25 \div 16,0$ | 20—1000 | 5.129 |
| Цинк: | | | | | | | | | $a=4 \cdot 10^{-3} \div 10^{-1}$ | —196 ÷ 25 | 5.130 |
| Ц1 | — | Отжиг в кипящей воде | | | | | | A_1 | ЛГ | | 5.120 |
| 99,995 | 99,995 | — | | | | | | B | | 20 | 5.123 |
| 99,9 | 99,9 | Прессование | | | | | | | | | 5.121 |
| | 99,974 | $d_z=18$ мкм | | | | | | | | | |
| Цирконий | 99,840 | $d_z=33$ мкм | | | | | | | | | |
| | 99,3 | Отжиг ($t=750^\circ\text{C}$, 15 мин, высокий вакуум) | 37 | 43 | 23 | 28 | 174 | D | | —196 | 5.104 |
| Сплав циркония циркалой-2 (1,4% Sn) | 98,35 | Отжиг ($t=750^\circ\text{C}$, 15 мин, высокий вакуум) | | | | | | B_1 | $a=0,25 \div 16; 40$ | | 5.117 |
| | | | | | | | | | $a=16$ | 20—1000 | 5.118 |
| | | | | | | | | | $a=0,25; 4,0; 16$ | | 5.119 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.14. Данные для кривых упрочнения предварительно деформированных медных сплавов, у которых предварительная деформация в холодном состоянии и последующая (при испытании) имеют противоположные знаки

| Сплав | Содержание основных легирующих элементов, % | Предварительная обработка | Степень деформации при предварительной обработке, % | Метод испытания | № рисунка |
|--------------------|---|---------------------------|---|-----------------|-----------|
| AlMg3 | — | Волочение | — | В | 5.77 |
| | | | 1—20 | Б | 5.138 |
| | | Осадка | 1—19,9 | Д | 5.139 |
| Медный сплав Cu—Cr | Cr = 0,5 | Отжиг, волочение | — | Б | 5,94 |
| Cu Ni 1Si | Si = 0,4 ÷ 0,8 Ni = 0,8 ÷ 1,3 | | | | |
| Cu Ni 2Si | Si = 0,5 ÷ 0,7 Ni = 1,7 ÷ 2,1 | | | | 5,95 |
| Латунь Ms63 | Zn = 37 | Волочение | 1—21 | | 5.140 |
| | | Осадка | 1—19,5 | Д | 5.141 |
| Бронзы: | | Волочение | — | В | 5.142 |
| SnBz1 | Sn = 1 | | | | |
| SnBz2 | Sn = 2 | | | | |
| SnBz6 | Sn = 6 | | | | |
| SnBz8 | Sn = 8, P = 0,2 | | | | |
| SnBz8 | Sn = 8 | | | | |
| SnBz5 | Sn = 5% | | | | |
| SnBz9 | Sn = 9% | | | | |
| SnBz3 | Sn = 3% | | | | |

Примечания: 1. Условные обозначения см. на с. 3, 4.
2. В сплаве AlMg3 скорость деформаций $a = 5 \cdot 10^{-4}$.

5.15. Данные для кривых упрочнения цветных металлов и сплавов, получивших предварительную деформацию того знака, что и последующая (при испытании) деформация

| Материал | Предварительная обработка | Степень деформации при предварительной обработке, % | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|----------------------------|--|---|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| Алюминий технически чистый | Отжиг по ступенчатому режиму, холодная прокатка | 30; 60; 80 | Д | b = 4 | 200—475 | 5.143 |
| | Закалка от температуры $t = 550$ °С, холодная прокатка | 13; 30; 60; 80 | | | 175—450 | 5.144 |
| Медь Cu 99,99 | Изотермический отжиг ($t = 600$ °С, 3 ч), холодная прокатка | 8; 25; 80 | | | 20—500 | 5.145 |
| Медь технически чистая | Отжиг в вакууме, осадка в холодном состоянии | 10; 40 | В | ЛМ | 20 | 5.70 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.16. Данные для экспериментальных кривых упрочнения металлов и сплавов, прошедших предварительную обработку в особых условиях, испытанных при нормальных температурах

| Материал | Предварительная обработка | Метод испытания | № рисунка |
|---|--|-----------------|-----------|
| Железо техническое | Осадка при нормальной температуре до $\varepsilon=5\%$ и $\varepsilon=40\%$ в условиях ультразвуковых колебаний | В | 5.67 |
| Медь технически чистая | Осадка при нормальной температуре до $\varepsilon=10\%$ и $\varepsilon=40\%$ и в условиях ультразвуковых колебаний | | 5.70 |
| Сплав Fe—Mn с содержанием Mn=15, 24 и 30% | Выдержка в условиях постоянного гидростатического давления $12\,000\text{ кгс/см}^2$ | Д | 5.66 |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.17. Данные для экспериментальных кривых упрочнения металлов и сплавов, полученных по результатам испытаний в особых условиях при нормальных температурах

| Материал | Предварительная обработка | Условия испытания | Метод испытания | Скорость деформации | № рисунка |
|---|--|--|-----------------|----------------------------|-----------|
| Алюминий | Отжиг в вакууме | С наложением ультразвуковых колебаний | V_4 | — | 5.68 |
| | Отжиг в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., $t=400\text{ }^\circ\text{C}$ | В вакууме 1×10^{-9} мм рт. ст. | V_5 | $a=8 \cdot 10^{-4}$ | 5.69 |
| Медь | Отжиг в вакууме | С наложением ультразвуковых колебаний | V_4 | — | 5.68 |
| | Отжиг в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., $t=700\text{ }^\circ\text{C}$ | В вакууме $1 \cdot 10^{-9}$ мм | V_5 | $a=8 \cdot 10^{-4}$ | 5.69 |
| 20 | Отжиг в вакууме 10^{-2} мм рт. ст., $t=900\text{ }^\circ\text{C}$, выдержка 3 ч | С наложением ультразвуковых колебаний интенсивностью 700 Вт/см^2 | Γ | — | 5.63 |
| 45 У8А | — | С наложением ультразвуковых колебаний, амплитуда $A=10\text{ мкм}$, частота $f=20\text{ кГц}$ | D_4 | $b=5$ | 5.63 |
| Сталь аустенитная типа 18-8 (18,09% Cr, 0,05%С; 8,40% Ni) | Закалка от $t=1000\text{ }^\circ\text{C}$ | Гидростатическое давление $12\,000\text{ кгс/см}^2$ | V_3 | — | 5.64 |
| P18 | Отжиг | Гидростатическое давление 4000 и 6000 кгс/см^2 | A_2 | $\varepsilon=0,1 \div 1,0$ | 5.65 |
| Сплав Fe—Mn с содержанием Mn 15; 24 и 30% | — | Гидростатическое давление $12\,000\text{ кгс/см}^2$ | D_5 | — | 5.66 |
| Серый чугун СЧ 21—40 | Отжиг | Гидростатическое давление 4000 и 6000 кгс/см^2 | V_3 | $\varepsilon=0,1 \div 1,0$ | 5.65 |
| Алюминиевый сплав Д1 | | | A_2 | | |
| Латунь ЛС59-1 | | | — | | |
| Сплав молибденовый ВМ1 | | | — | | |
| Сплав вольфрама ВА | | | V_5 | | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.18. Данные для экспериментальных кривых упрочнения технического железа и сталей, полученных при испытании листовых материалов

| Материал | Содержание углерода, % | Содержание других элементов, % | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | Механические свойства | | | | Толщина листа S, мм | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытаний, °С | № рисунка |
|-------------------------|------------------------|---|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| | | | | σ_T , кгс/мм ² | σ_B , кгс/мм ² | δ_5 , % | НВ, кгс/мм ² | | | | | |
| Железо техническое | 0,03 | — | Горячая прокатка | — | — | — | — | Д | — | 20 | 5.146 | |
| | 0,038 | Mn=0,33; Si=0,01; S=0,023; P=0,010 | Горячая обработка в водородде при 700 °С, термообработка, $d_3=30$ мкм | | | | | | | | | 1,0 |
| 08 кп | — | — | В состоянии поставки | — | — | — | — | — | — | 20 | 5.148 | |
| Низкоуглеродистые стали | 0,06—0,07 | — | — | | | | | | | | | 43,3 |
| St skin | | | | 0,10 | — | — | 38,8 | — | — | 0,595 | b=2,0 | 5.150 |
| St VI | 35,5 | — | — | | | | 0,995 | | | 5.151 | | |
| St VII | 36,6 | | | — | — | 0,489 | 5.152 | | | | | |
| St VIII | 14 | — | — | | | — | | 5.153 | | | | |
| RSt14 | — | | | — | — | 0,3 | 5.154 | | | | | |
| 36НХТЮ | — | — | — | | | 0,25 | | 5.155 | | | | |
| 12Х18Н9Т | — | | | — | — | — | 5.156 | | | | | |
| — | — | — | — | | | 0,25 | | 5.157 | | | | |
| Аустенитные стали: | 0,06 | | | Cr=18,0%; Ni=7,5% | — | 22 | 50 | | 130—180 | Тонкий лист | Д; Д _с | 20 |
| X5CrNi 18.7 | | 65—80 | — | | | 5.159 | | | | | | |
| X5CrNi 18.9 | 0,06 | Cr=18,0%; Ni=10,5% | — | 19 | 50—70 | | 50 | — | Д | 20 | 5.160 | |
| X12CrNi 18.8 | — | — | — | — | 69,5 | — | 0,505 | 5.161 | | | | |
| Ферритная сталь X8Cr17 | 0,10 | Cr=17,5% | — | 27 | 45—65 | 20 | 130—170 | | Тонкий лист | 20 | 5.162 | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.19. Данные для экспериментальных кривых упрочнения цветных металлов и сплавов, полученных при испытании листовых материалов при нормальной температуре

| Материал | Содержание элементов, % | | | | | | Предварительная обработка и другие данные, характеризующие материал | σ_B , кгс/мм ² | Толщина листа S, мм | Метод испытания | Скорость деформации | № рисунка | |
|-------------------------------------|-------------------------|----|-------|-------|-------|-------|---|----------------------------------|---------------------|-----------------|--|-----------|-------|
| | Al | Cu | Fe | Mg | Mn | Si | | | | | | | |
| Al 99,99 | 99,99 | — | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,006 | Холодная прокатка ($\varepsilon=22\%$) | — | 1,5 | Д | $a=7 \cdot 10^{-5} \div 9,1 \cdot 10$ | 5.156 | |
| Al 99,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | $a=1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^2$ | 5.157 | |
| Al 99,5 (A) | 99,5 | — | — | — | — | — | — | 7,8 | 1,01 | | — | 5.149 | |
| Al 99,5 (B) | | | | | | | | 7,6 | 0,491 | | — | 5.157 | |
| Al 99,4 | 99,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | | $a=1,5 \cdot 10^{-4} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$ | 5.157 | |
| Al 99,39 | 99,39 | — | — | — | — | — | — | — | — | | $a=1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10$ | 5.158 | |
| Al 99,3 | 99,39 | — | 0,35 | 0,007 | 0,02 | 0,26 | Отжиг, $t=320^\circ\text{C}$ Холодная прокатка | — | 1,2 | | $a=7 \cdot 10^{-5} \div 1,03 \cdot 10^2$ | 5.158 | |
| Al 99,0 | 99,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | | $a=3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^2$ | 5.157 | |
| Алюминий | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | $a=1 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10$ | 5.159 | |
| АМЦАМ | — | — | — | — | — | — | Состояние поставки | — | 1,63 | | К | ЛГ | 5.159 |
| Алюминиевые сплавы: AlMn | — | — | — | — | 1,0 | — | — | 11,1 | 0,529 | Д | — | 5.149 | |
| AlMgSi | 97,64 | — | 0,42 | 1,05 | 0,09 | 0,80 | Холодная прокатка | — | — | К | $a=7 \cdot 10^{-5} \div 9,6 \cdot 10$ | 5.161 | |
| Медь | — | — | — | — | — | — | — | — | $1,57 \div 1,63$ | | 5.159 | | |
| Л63 | — | — | — | — | — | — | Состояние поставки | — | — | Д | — | 5.160 | |
| Латунь | — | — | — | — | — | — | $d_3=51$ мкм | 33,5 | 0,511 | | ЛГ | — | 5.154 |
| Ms63 | — | — | — | — | — | — | $d_3=28$ мкм | 35 | 0,508 | | | — | 5.154 |
| Сплав Ns 6218 ₃ (Ni=18%) | — | 62 | — | — | — | — | $d_3=27$ мкм | 41,5 | 0,508 | | | — | 5.162 |
| H41XT | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,2 | | | — | 5.162 |
| Титан α -Ti | — | — | — | — | — | — | $d_3=12$ мкм $d_3=139$ мкм | — | — | — | | 5.150 | |

Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4.

5.20. Данные для экспериментальных кривых упрочнения композиционных материалов

| Материал | Состав материала | Предварительная обработка | Метод испытания | Скорость деформации | Температура испытания, °С | № рисунка |
|--|--|--|-----------------|-------------------------|---------------------------|------------|
| Сталь 12X18H10T + сталь Ст2кп | 50% 12X18H10T + 50% Ст2кп | Горячая прокатка при температуре 1200 °С | Д | — | 20 | 5.163 |
| Cu—Al ₂ O ₃ | 3% объемных Al ₂ O ₃ , остальное Cu; | Выдавливание при 950—980 °С (ε = 85%) + высоко-температурный отжиг | | $a = 3,3 \cdot 10^{-3}$ | | —196 ÷ 600 |
| | 5% объемных Al ₂ O ₃ , остальное Cu; | | | | 5.165 | |
| Магнитные носители: В PE-31 PE-41 PE-41У | — | — | | $b = 100$ | —80 ÷ 0 | 5.166 |
| Примечание. Условные обозначения см. на с. 3, 4. | | | | | | |

Представленные на рис. 5.1—5.145 экспериментальные кривые упрочнения построены по результатам испытания образцов на растяжение, сжатие и кручение с применением разных, наиболее достоверных методов.

Испытание на растяжение обеспечивает получение с высокой точностью экспериментальных данных до момента появления шейки, т. е. до степеней деформации 0,3—0,4 для пластичных материалов и до 0,15—0,25 для прочных и со средней прочностью материалов. С введением поправок, предложенных независимо друг от друга Давиденковым Н. Н. и Спиридоновой Н. И. и П. Бриджменом, учитывающих упрочнение формы образца при местном растяжении в шейке, повышается точность расчетных значений σ_s и при более высоких степенях деформации, чем достигаемые до момента появления шейки.

Приведенные в настоящей работе кривые упрочнения при кручении построены по результатам обработки экспериментальных данных по методам Людвика, Норицына—Кислого [23], средних значений Пахотина—Седокова и методу двух образцов [25]. Наиболее точным, но трудоемким и требующим высококвалифицированной обработки является метод Людвика. Предложенный Норицыным И. А. и Кислым П. Е. метод обработки экспериментальных данных является достаточно простым и обеспечивает высокую точность построения кривых упрочнения во всем диапазоне степеней деформации. Метод двух образцов обеспечивает наименьшую точность, особенно для меди (см. рис. 5.17). Обработка экспериментальных данных по формулам Норицына—Кислого и Пахотина—Седокова обеспечивает получение кривых упрочнения, близко расположенных к кривым упрочнения, полученным по формуле Людвика (см. рис. 5.13, 5.17). Следует учесть, что по кривым упрочнения, построенным по методу средних значений, нельзя определять предельную пластичность, так как эти кривые упрочнения являются короче по оси абсцисс γ на $\frac{1}{3}$.

Наибольшее разнообразие методов построения кривых упрочнения применяется при испытании на сжатие. Однако имеющиеся кривые упрочнения при сжатии построены главным образом методами осадки высоких цилиндри-

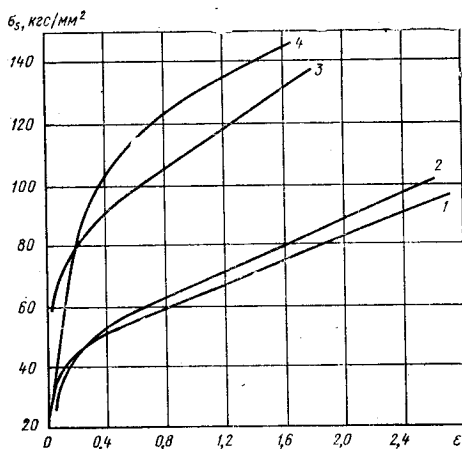


Рис. 5.1. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженных технического железа с содержанием углерода 0,025% (1) и 0,04% (2), стали 45X (3) и закаленной стали 12X18H9T (4) (по опытам автора)

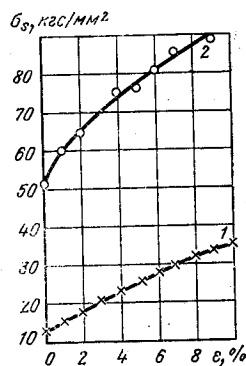


Рис. 5.2. Кривые упрочнения при сжатии технического железа:
1 — $t=20^\circ\text{C}$; 2 — $t=196^\circ\text{C}$
(Навроцкий И. В., Дрюкова И. Н.)

ческих образцов ($\frac{h_0}{d_0} = 2,0 \div 2,5$) с гладкими торцами, осадки коническими бойками цилиндрических образцов с торцовыми коническими выточками и осадки цилиндрических образцов с торцовыми цилиндрическими выточками, заполненными смазкой. Последний метод обеспечивает самую высокую точность получения величин σ_s при самых больших степенях деформации. При осадке образцов с гладкими торцами после достижения текущего отношения $\frac{h}{d} = 0,9 \div 1,0$ начинает более существенно проявляться внешнее трение, в связи с чем достоверные значения σ_s можно получить только до $\varepsilon = 0,465$. Однако с достаточной для практики точностью кривые упрочнения, построенные с помощью этого метода, могут быть использованы до более высоких степеней деформации, т.е. до 0,8—0,9; при этом величины σ_s , определенные этим способом, будут иметь завышенные значения по сравнению с истинными напряжениями течения. Метод осадки образцов коническими бойками обеспечивает получение надежных результатов до $\varepsilon = 0,7 \div 1,0$. Способ построения кривых упрочнения по результатам передавливания плоских образцов полированными плитами дает достаточно точные значения величин напряжения

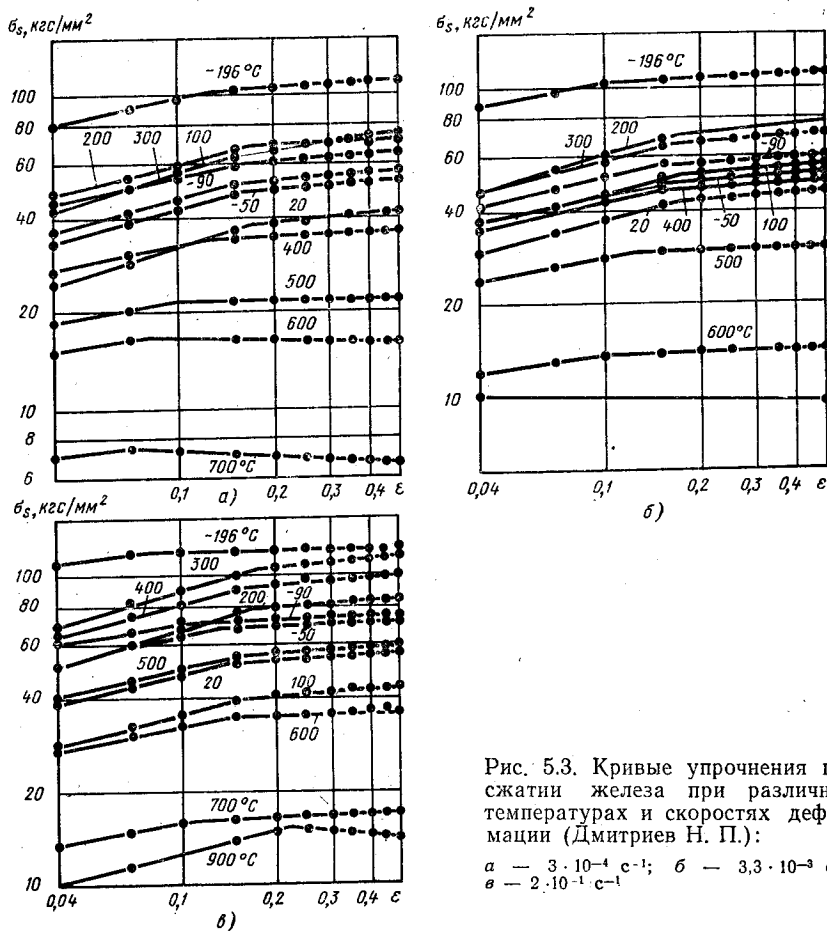


Рис. 5.3. Кривые упрочнения при сжатии железа при различных температурах и скоростях деформации (Дмитриев Н. П.):

а — $3 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; б — $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; в — $2 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}$

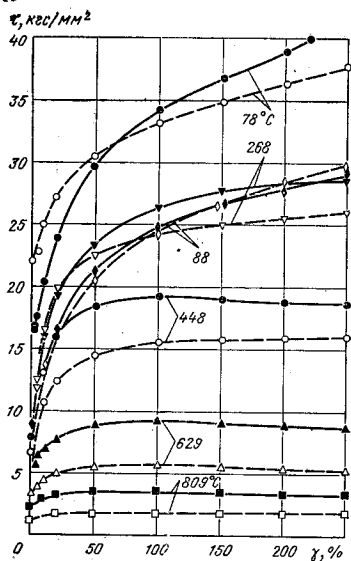


Рис. 5.4. Кривые упрочнения низкоуглеродистой стали ($C = 0,06\%$) при кручении со скоростью $2,4 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (штриховые линии) и $0,12 \text{ с}^{-1}$ (сплошные линии) (Schwandt S.)

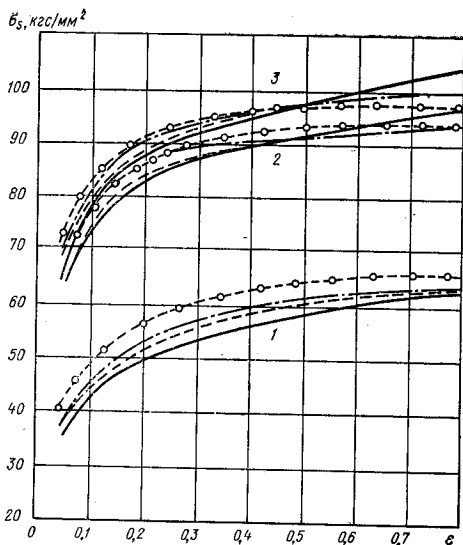


Рис. 5.5. Кривые упрочнения при сжатии ($t = 20^\circ\text{C}$) нормализованных сталей (Bühler H.; Meyer Nolkemper H.):

1 — Мвк6; 2 — С35; 3 — С45; — $\dot{\epsilon} = 0,25 \text{ с}^{-1}$; --- $\dot{\epsilon} = 1,6 \text{ с}^{-1}$; - · - · - $\dot{\epsilon} = 8,0 \text{ с}^{-1}$; ○—○— $\dot{\epsilon} = 40 \text{ с}^{-1}$

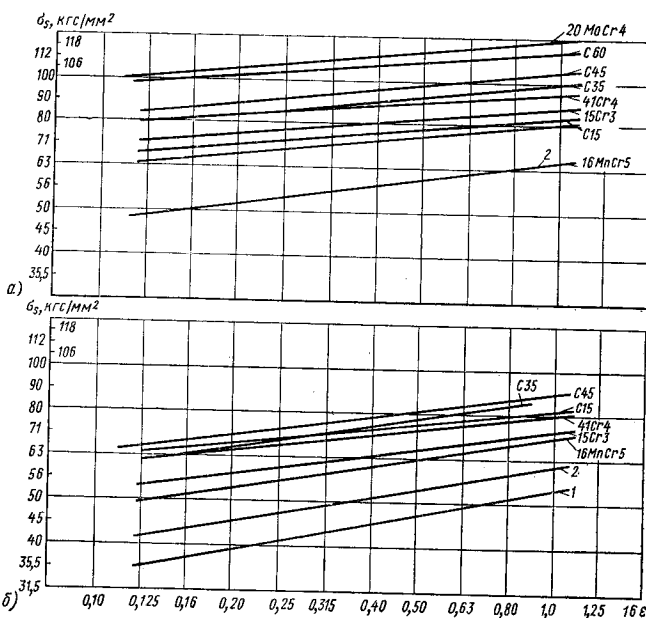


Рис. 5.6. Кривые упрочнения при сжатии отожженной (1) и нормализованной (2) стали Мвк6, отожженных сталей 16MnCr5; 41Cr4 и нормализованных сталей 15Cr3, C15, C35, C45 и 20MnCr4 при $\dot{\epsilon} = 1,6 \text{ с}^{-1}$ (Schwandt S.): а — $t = 20^\circ\text{C}$; б — $t = 300^\circ\text{C}$

течения до $\epsilon = 1,0$ для низкоуглеродистых и углеродистых сталей с содержанием углерода не более 0,8%, для других сталей наблюдается разница более 10%. Этот метод всегда показывает несколько завышенные значения σ_s . У кривых упрочнения, построенных по результатам осадки нескольких образцов с различными первоначальными отношениями $\frac{h_0}{d_0}$, σ_s совпадает с истинными значениями напряжений течения лишь до $\epsilon = 0,30$; при $\epsilon > 0,30$ такие кривые упрочнения располагаются ниже истинных кривых упрочнения, причем разница между ними увеличивается с ростом степени деформации.

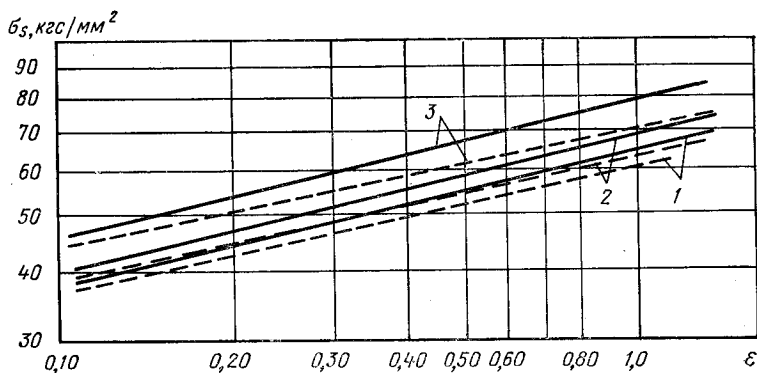


Рис. 5.7. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженных (штриховые линии) и горячекатаных (сплошные линии) сталей [45]: 1 — Мик7; 2 — Ма8; 3 — Ск15

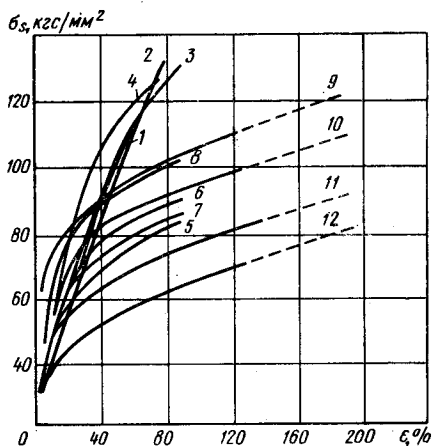


Рис. 5.8. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) углеродистых St37 (12) St42 (11), С35 (10), St70 (9) и легированных сталей X5CrNi18.9 (1), X5CrNiMo18.10 (2) X10CrNiTi18.9 (3), X5CrNiSi25.20 (4), X8CrTi17 (5), X8CrMoTi17 (6), X10CrAl13 (7), X10CrAl24 (8), (Домальски Г. Г., Шукерт Г.)

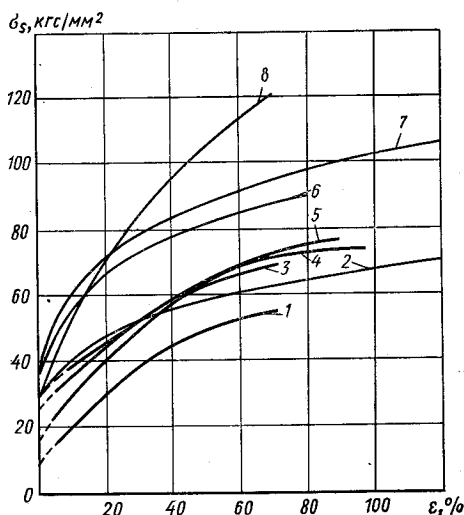


Рис. 5.9. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) сталей St37 (2), X8CrMoTi17 (6), X10CrAl13 (7), X10CrAl24 (8) и латуни Ms63 (1), Ms60Pb (3), Ms60 (4) и SoMs59 (Vater M.)

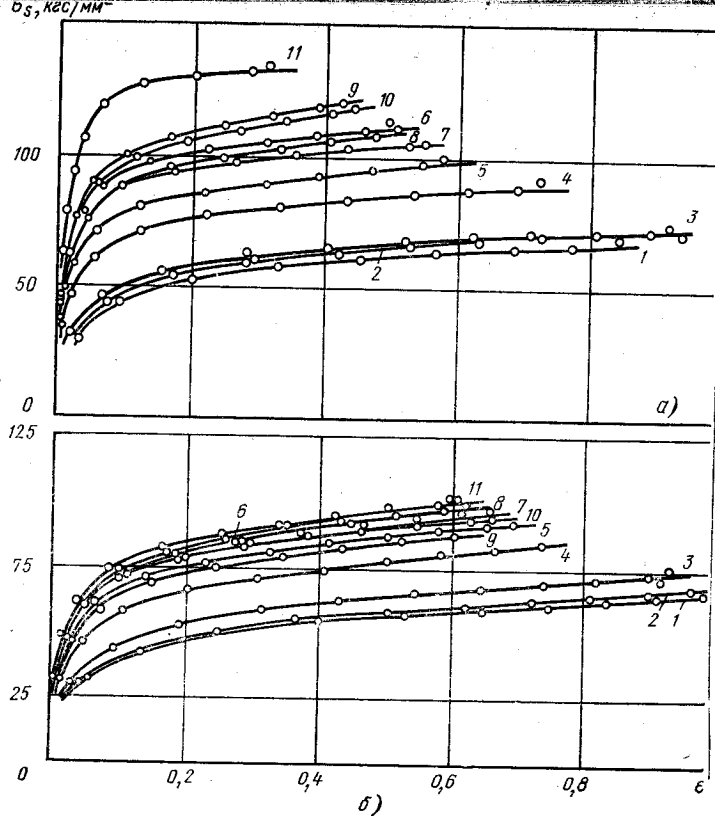


Рис. 5.10. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) горячекатаных (а) и отожженных (б) углеродистых сталей Ск10 (1), Ск15 (2), Ск22 (3), Ск35 (4), Ск45 (5), Ск60 (6), сталей с содержанием углерода 0,70% (7), 0,81% (8), С100W1 с содержанием углерода 0,97% (9), 1,10% (10) и 1,29% (11) при $\dot{\epsilon} \leq 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Müller H. G., Hüber W.)

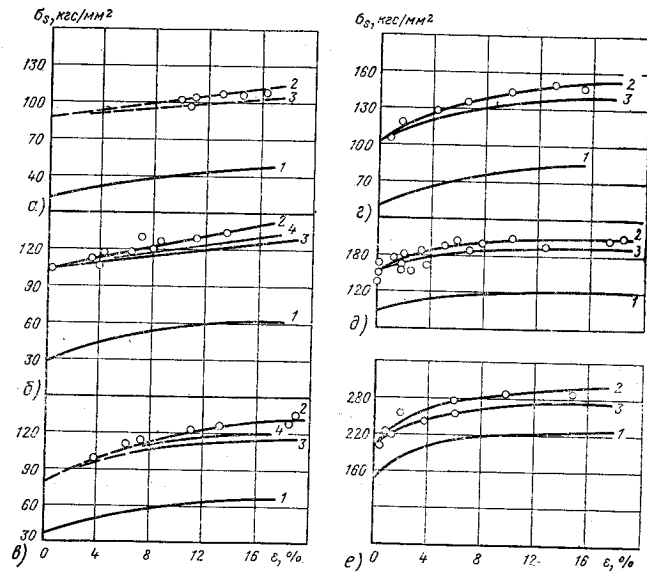


Рис. 5.11. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростью удара 300—1250 м/с различных сталей (Гронский В. Ф., Дробот И. Б., Степанов В. А., Хлызов И. П.): а — 10; б — 25; в — 40 ($t_{\text{отп}}=320^{\circ}\text{C}$); г — 40 ($t_{\text{отп}}=180^{\circ}\text{C}$); д — 40 ($t_{\text{отп}}=475^{\circ}\text{C}$); е — 30ХСНВФА; 1 — сжатие статическое; 2, 3, 4 — сжатие динамическое

Рис. 5.12. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных углеродистых Ст10 (3) и С35 (7) и легированных 15Cr3 (4), Х10Cr13 (5), 41Cr4 (6), 56NiCrMoV7 (8), 165CrMoV46 (9), закаленной стали Х5CrNi18.9 (10) и прессованных алюминия Al199,5 (1) и электромеди E=Cu (2) при $\dot{\epsilon}=5\cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ (Neil H. P., Lienhart A.)

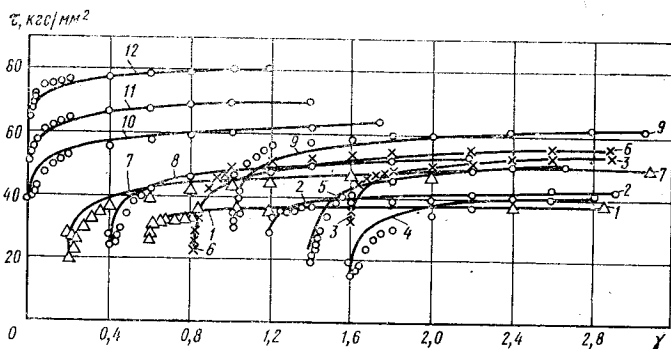
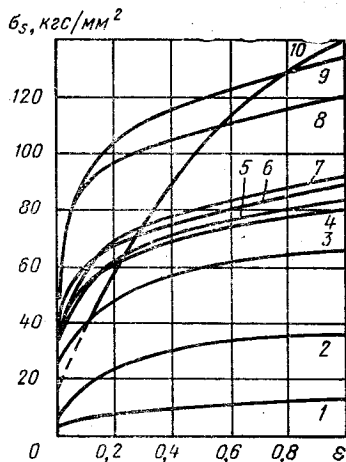


Рис. 5.13. Кривые упрочнения при кручении ($t=20^{\circ}\text{C}$) сталей 10 (1), 20 (2), 45 (5), 40Х (3, 6, 9, 10, 11, 12), 18ХГТ (7) и 30ХГТ (8) после волочения (1, 2, 3), горячей прокатки (4, 5, 6), нормализации (7, 8, 9) и закалки в масле от $t=860^{\circ}\text{C}$ с последующим отпуском при температурах 700 (10), 600 (11) и 500 $^{\circ}\text{C}$ (12) (кривые построены по формуле Норичына-Кислого): О, Δ , \times — значения, полученные по методике Людвика [23]

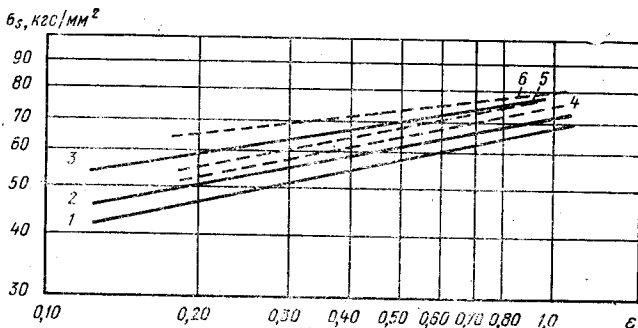


Рис. 5.14. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) сталей с повышенным содержанием серы 10S10 (кривые 1, 2, 3) и 7S10 (кривые 4, 5, 6): 1, 4 — отжиг; 2, 5 — горячая прокатка; 3, 6 — нормализация с последующим старением [45]

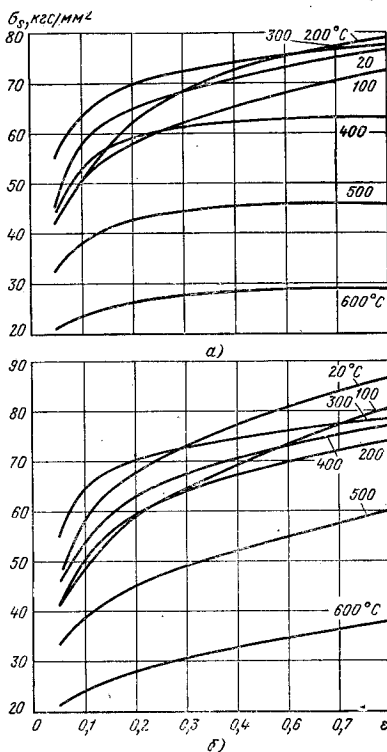


Рис. 5.15. Кривые упрочнения стали С15 при различных температурах и $\dot{\epsilon}=0,25 \text{ с}^{-1}$ при сжатии (Bühler Н.):
 а — адиабатическом (непрерывном); б — изотермическом

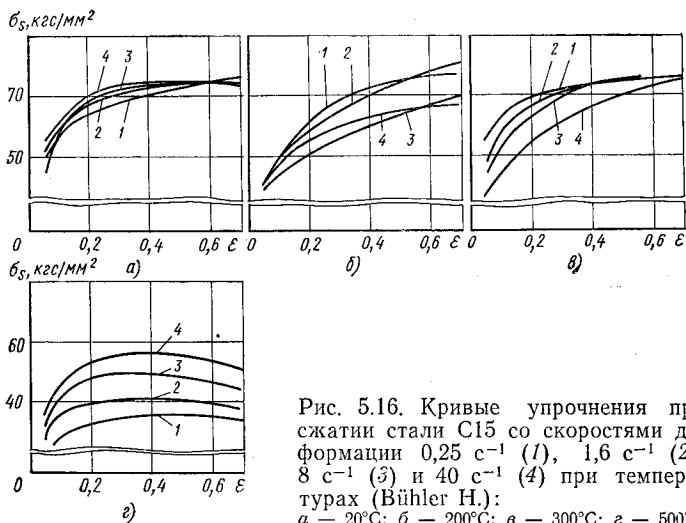


Рис. 5.16. Кривые упрочнения при сжатии стали С15 со скоростями деформации $0,25 \text{ с}^{-1}$ (1), $1,6 \text{ с}^{-1}$ (2), 8 с^{-1} (3) и 40 с^{-1} (4) при температурах (Bühler Н.):
 а — 20°C ; б — 200°C ; в — 300°C ; г — 500°C

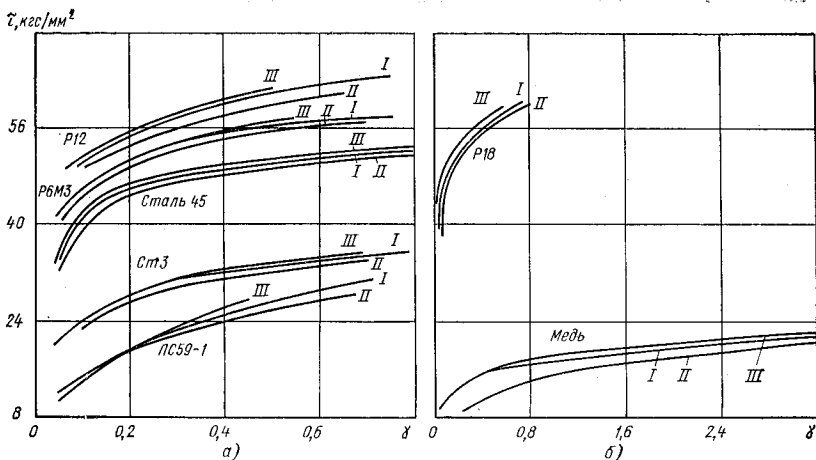


Рис. 5.17. Кривые упрочнения при кручении ($t=20^{\circ}\text{C}$) сталей Ст3, 45, Р6М3, Р12, Р18, меди и латуни ЛС59-1:

I — по методу Людвика; II — по методу двух образцов; III — по методу средних значений [25]

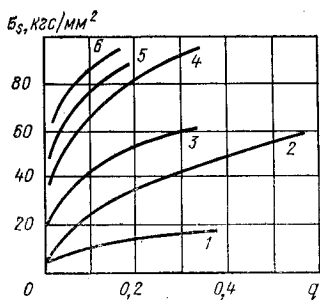


Рис. 5.18. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных алюминия (1), меди (2), горячекатаных сталей Ст3 (3), 35 (4), Ст5 (5) и ХВГ (6) (Дейч А. Ш., Копельман Л. А., Короткин В. В.)

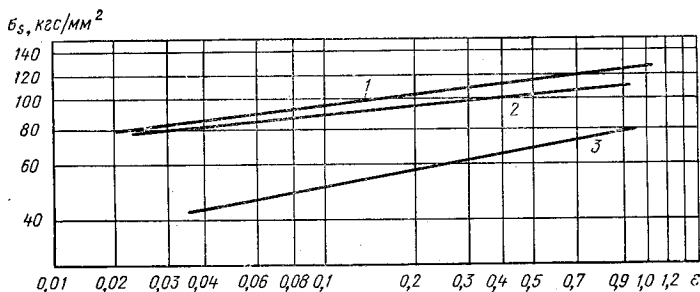


Рис. 5.19. Кривые упрочнения при холодной пластической деформации сталей (Секундо Л. Н., Скуднов В. А., Соколов Л. Д.):

1, 2 — 18ХГСНТМ; 3 — Ст3

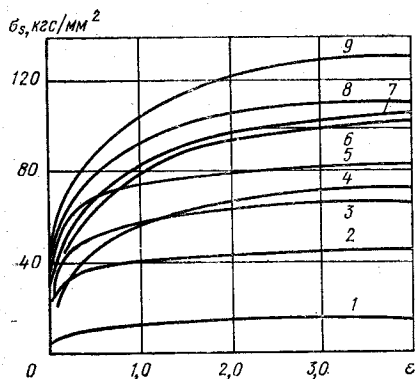


Рис. 5.20. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминия АД1 (1), дюралюминия Д16 (2), технического железа (4), сталей Ст3 (3), 20 (7), 35 (8), 12ХНЗА (9) и латуни ЛС59-1 (5) и Л63 (6) (Смирнов-Аляев Г. А.)

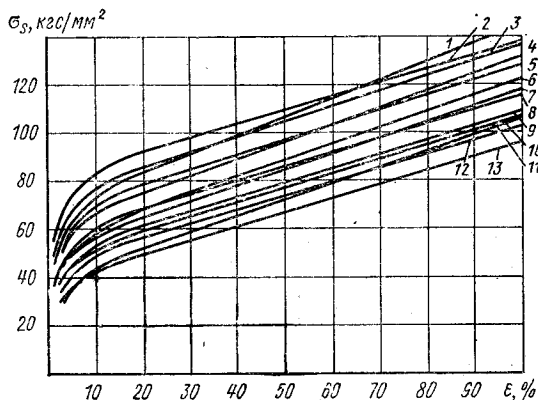


Рис. 5.21. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) углеродистых сталей 50* (1), 50 (2), 45 (3), 45* (5), 40 (4), 40* (8), 35** (6), 30 (7), 30* (9), 20 (10), 20* (12), 20** (11), 10 (13) (Томингас Х. А.):

* — отжиг в вакуумной печи;

** — отжиг в соляной ванне, режим термической обработки указан в табл. 5.2

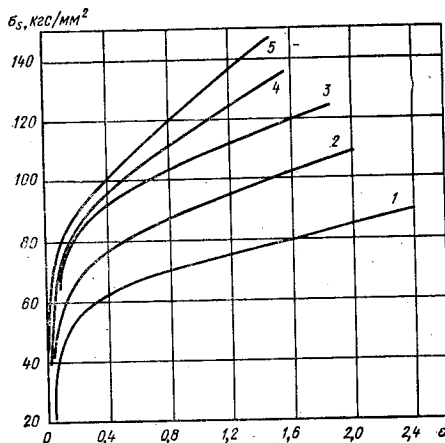


Рис. 5.22. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных сталей 15кп (1), 35 (2), 45 (3), У8А (4), У10А (5) (по данным автора)

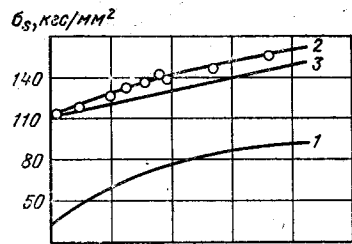
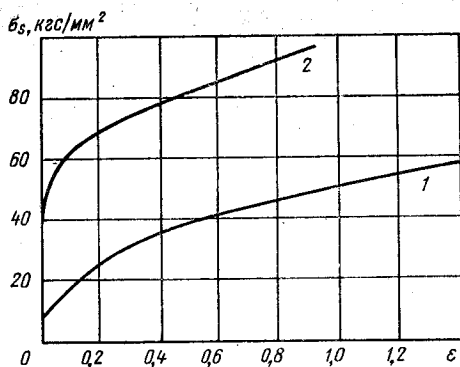


Рис. 5.23. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) стали 30 (2) и слоистого металла Cu-L90 (1) (Свердлов М. И.)

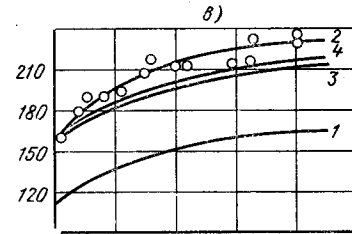
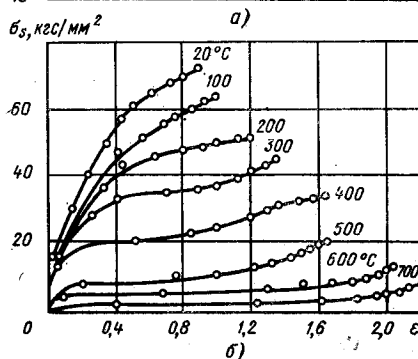
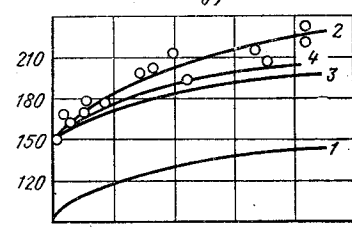
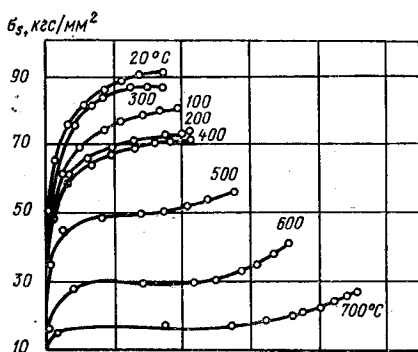
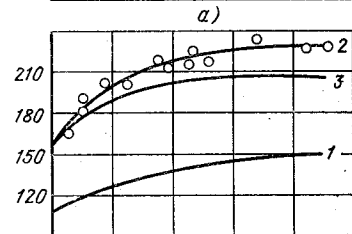


Рис. 5.24. Кривые упрочнения при сжатии при разных температурах отожженных в вакууме материалов [26]:
 а — стали 40; б — латуни Л63

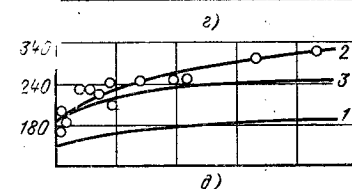


Рис. 5.25. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростями удара 300—1240 м/с (Гронский В. Ф., Дробот И. Б., Степанов В. А., Хлызов И. П.):
 а — горячекатаная сталь 45; б — улучшенная сталь 45 ($t_{отп}=450^{\circ}\text{C}$); в — 40Х;
 г — 30ХГСА; д — чугун с $\sigma_B=43,5$ кгс/мм² и $\delta=10\%$; е — чугун с $\sigma_B=53$ кгс/мм² и $\delta=1,5\%$;
 1 — сжатие статическое; 2, 3, 4 — сжатие динамическое

Рис. 5.25. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростями удара 300—1240 м/с (Гронский В. Ф., Дробот И. Б., Степанов В. А., Хлызов И. П.):
 а — горячекатаная сталь 45; б — улучшенная сталь 45 ($t_{отп}=450^{\circ}\text{C}$); в — 40Х;
 г — 30ХГСА; д — чугун с $\sigma_B=43,5$ кгс/мм² и $\delta=10\%$; е — чугун с $\sigma_B=53$ кгс/мм² и $\delta=1,5\%$;
 1 — сжатие статическое; 2, 3, 4 — сжатие динамическое

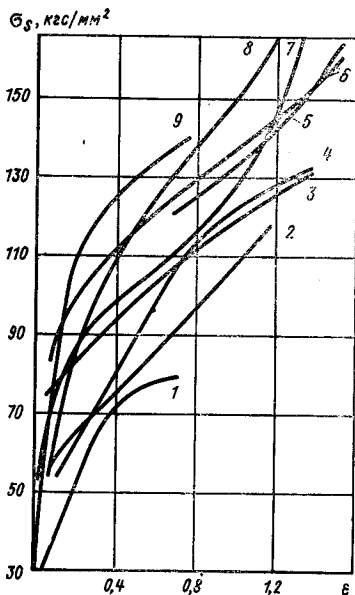


Рис. 5.26. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) сталей У7 (3), 9ХС (6), 4Х13 (7), ШХ15 (5), Р18 (9), 12Х18Н9Т (8), латуни ЛС59-1 (1) и бронз БрБ2 (2) и БраЖ9-4 (4) (Филимонов Ю. Ф.)

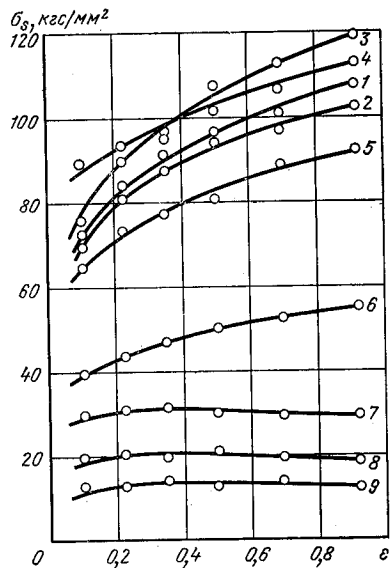


Рис. 5.27. Кривые упрочнения при сжатии отожженной стали У10А со скоростью $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ при температурах 20 (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4), 400 (5), 500 (6), 600 (7), 700 (8) и 800°C (9) [29]

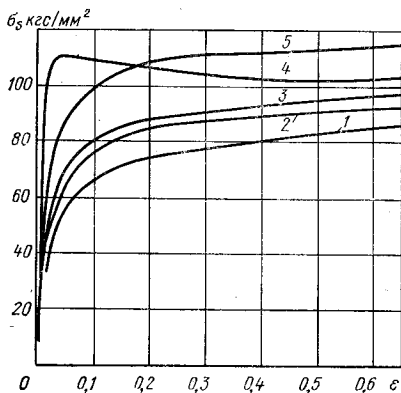


Рис. 5.28. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) сталей после отжига на зернистый цементит (1, 2, 3, 5) и гомогенизирующего отжига с последующей закалкой (4): 1 — С100W1, 2 — Х41СrМоV51; 3 — 58CrV4; 4 — Х12NiМоТi18.85; 5 — Х210Cr12 [9]

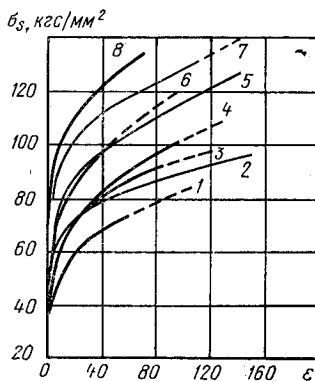


Рис. 5.29. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных сталей Х10Cr13 (1), 20MnCr5 (2), Х6CrМо5 (3), С100W1 (4), 50NiCr13 (5), 105MnCr4 (6), 40NiCrМо15 (7), 18CrNi8 (8) (Vater M.)

$\sigma_s, \text{ кгс/мм}^2$

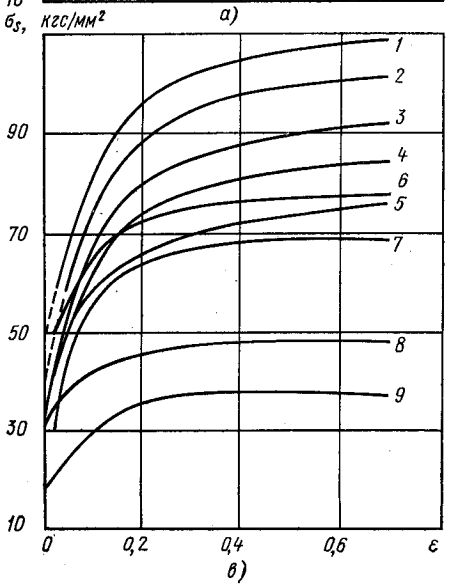
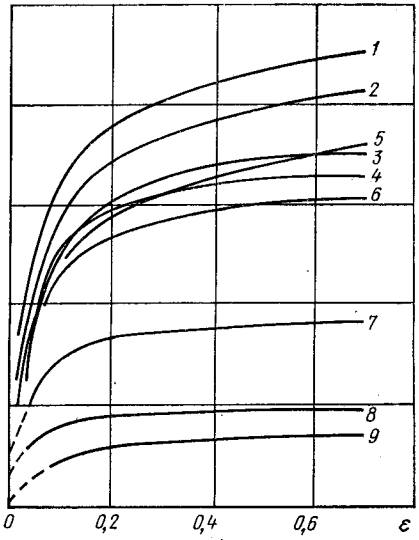
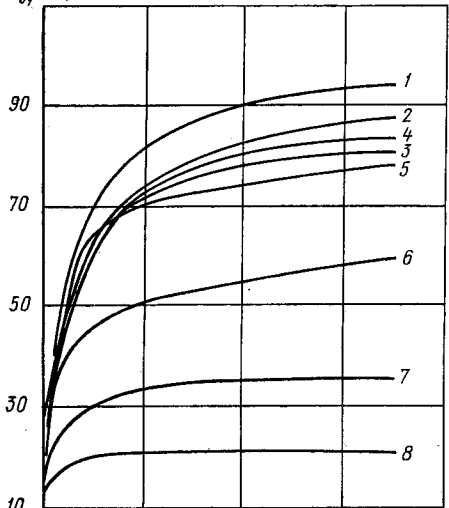


Рис. 5.30. Кривые упрочнения при сжатии отожженной стали С45 со скоростями деформации 0,1 с (а), 1,5 с (б) и 90 с⁻¹ (в) при температурах (Fritzsch G., Siegel R.):

- 1 — 20°C; 2 — 100°C; 3 — 200°C; 4 — 300°C;
- 5 — 400°C; 6 — 500°C; 7 — 600°C; 8 — 700°C;
- 9 — 800°C

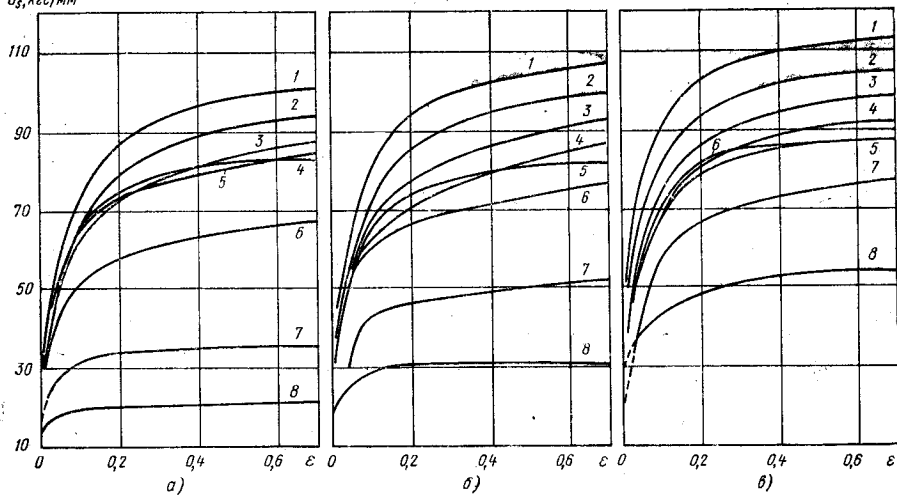
$\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$ 

Рис. 5.31. Кривые упрочнения при сжатии отожженной стали С60 со скоростями деформации 0,1 (а), 1,5 (б) и 90 с⁻¹ (в) при температурах (Fritsch G., Siegel R.):
 1 — 20° С; 2 — 100° С; 3 — 200° С; 4 — 300° С; 5 — 400° С; 6 — 500° С; 7 — 600° С; 8 — 700° С; 9 — 800° С

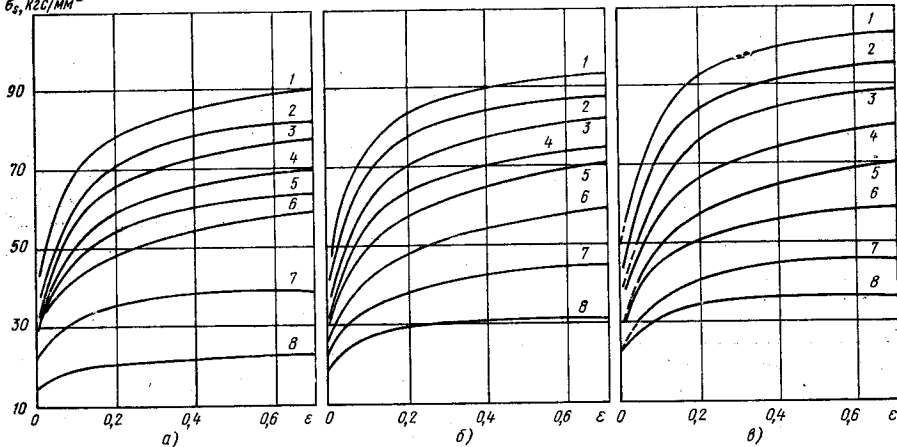
 $\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$ 

Рис. 5.32. Кривые упрочнения при сжатии отожженной стали X10Cr13 со скоростями деформации 0,1 (а), 1,5 (б) и 90 с⁻¹ (в) при температурах (Fritsch G., Siegel R.):
 1 — 20° С; 2 — 100° С; 3 — 200° С; 4 — 300° С; 5 — 400° С; 6 — 500° С; 7 — 600° С; 8 — 700° С

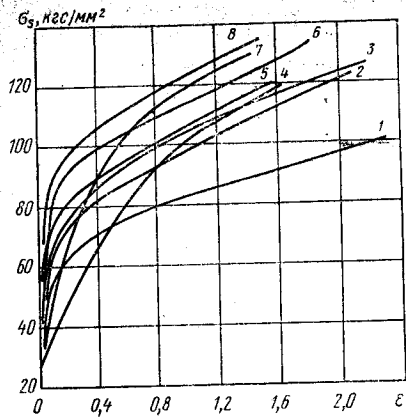


Рис. 5.33. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженных сталей 20Х (1), 10Г2 (2), 20Х13 (3), 40Х (5), 18ХГТ (6), 40ХН (8) и закаленных 10Х17Н13М2Т (4) и 12Х18Н9Т (7) (по данным автора)

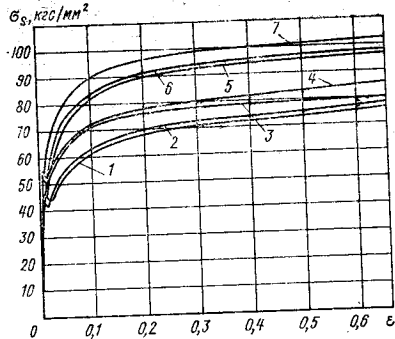


Рис. 5.34. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) легированных конструкционных сталей после отжига на зернистый цементит (1, 2, 3, 4) и нормализации (5, 6, 7) со скоростью деформации 0,16 мм/с:
1, 5 — 15MnCr5; 2, 6 — 20MnCr5; 3 — 18CrNi8; 4, 7 — 20MnCr4 [9]

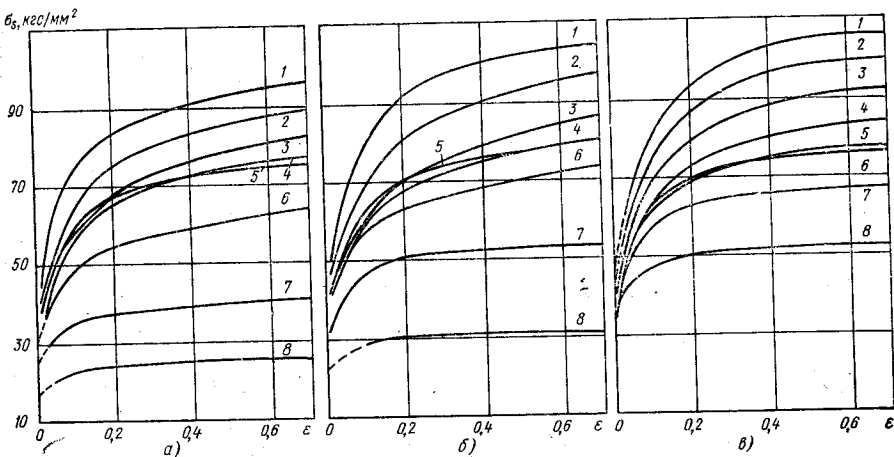


Рис. 5.35. Кривые упрочнения при сжатии отожженной легированной стали 42MnV7 со скоростями деформации 0,1 (а), 1,5 (б) и 90 с⁻¹ (в) при температурах (Fritzsch G., Siegel R.):
1 — 20°C; 2 — 100°C; 3 — 200°C; 4 — 300°C; 5 — 400°C; 6 — 500°C; 7 — 600°C; 8 — 700°C

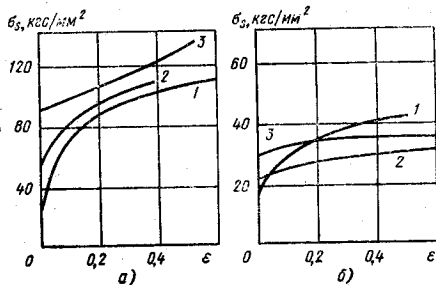


Рис. 5.36. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) стали 30ХГСА (а) и алюминиевого сплава АК6 (б) (Согришин Ю. П., Тишаков В. А., Мороз В. Я.):
1 — статические испытания; 2 — $\dot{\epsilon}=10 \pm 20$ м/с; 3 — $\dot{\epsilon}>100$ м/с

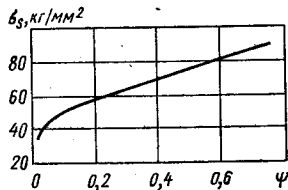


Рис. 5.37. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) стали 12Х1МФ после нормализации и отжига ($t=740^\circ\text{C}$) (Катор Л., Нюлас П.)

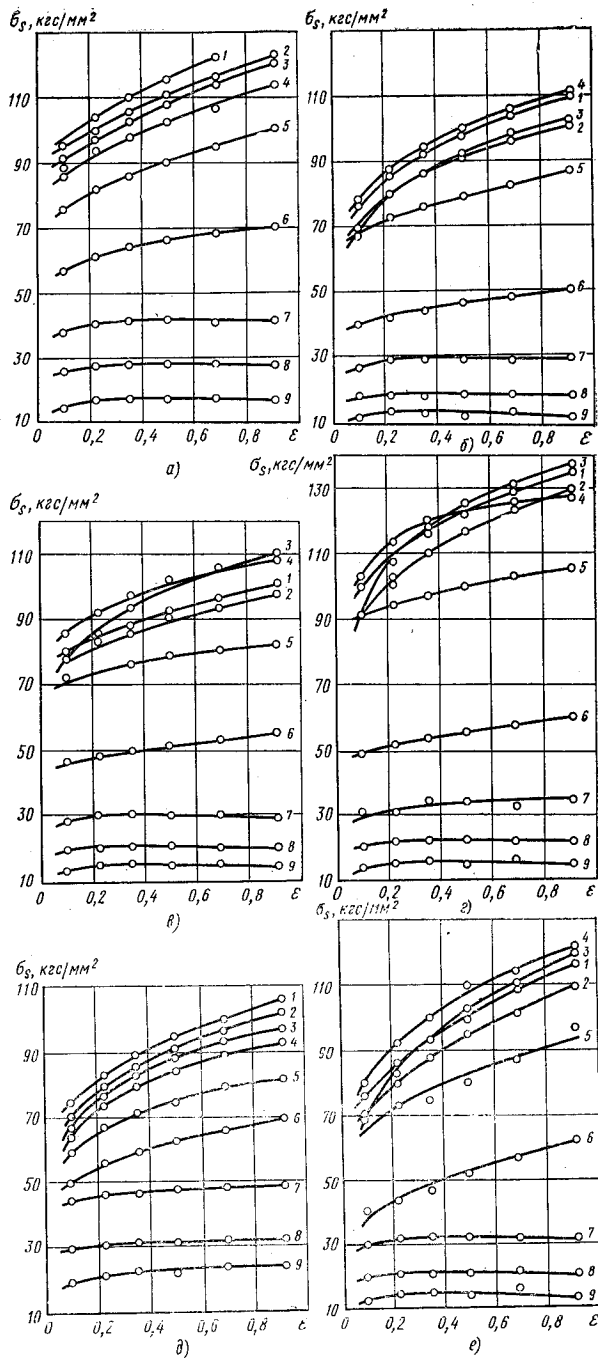
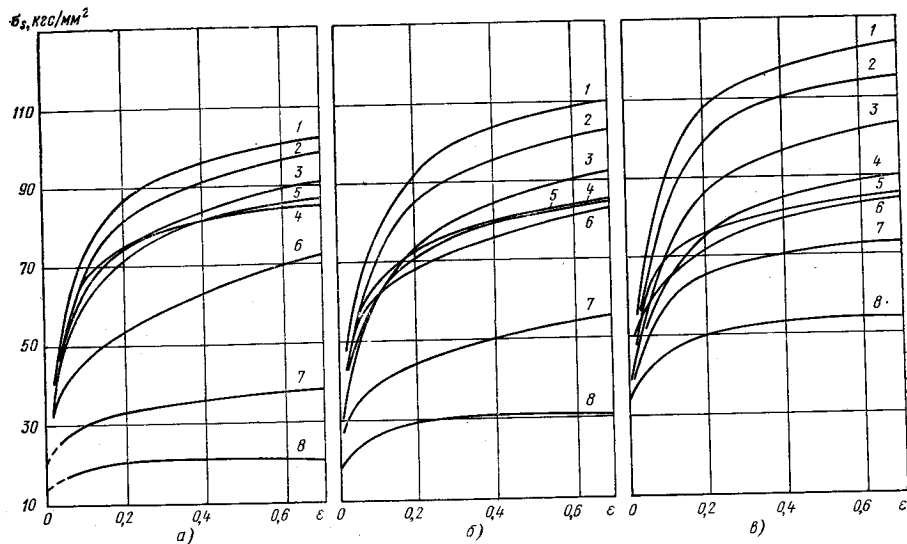


Рис. 5.38. Кривые упрочнения при сжатии отожженных инструментальных сталей X12Ф1 (а), 7ХЗ (б), 5ХНВ (в), 9ХС (г), 3Х2В8Ф (д), ХВГ (е) со скоростью деформации $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ при температурах: 1 — 20°C; 2 — 100°C; 3 — 200°C; 4 — 300°C; 5 — 400°C; 6 — 500°C; 7 — 600°C; 8 — 700°C; 9 — 800°C [29]



5.39. Кривые упрочнения при сжатии отожженной инструментальной стали 100Cr6 со скоростями деформации 0,1 (а), 1,5 (б) и 90 с⁻¹ (в) при температурах (Fritzsch G., Siegel R.):

1 — 20°C; 2 — 100°C; 3 — 200°C; 4 — 300°C; 5 — 400°C; 6 — 500°C; 7 — 600°C; 8 — 700°C

Рис. 5.41. Кривые упрочнения при сжатии стали 12Х18Н9 при 20 (1, 2) и 150°С (3, 4) (Черняк Н. И., Нижник С. Б., Истомина Э. С.):

○ — закаленная; △ — закаленная и состаренная после осадки в холодном состоянии до $\epsilon=6,5\%$

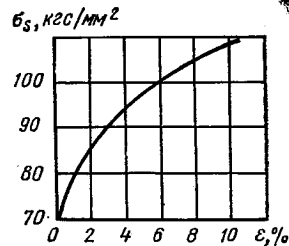
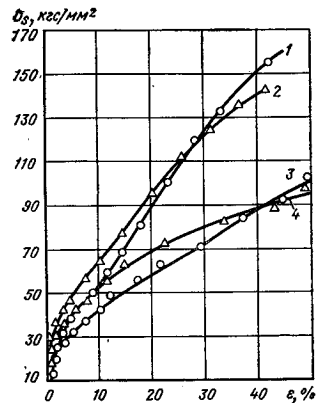


Рис. 5.40. Кривая упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) инструментальной стали 80CrV3 (соответствует 8ХФ) (Neubauer A., Meyer P., Osterburg U.)



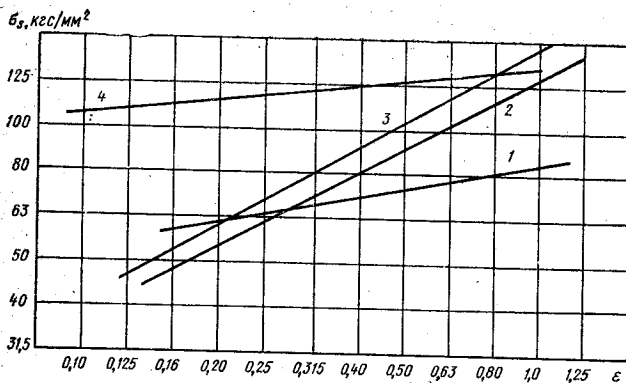


Рис. 5.42. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) ферритных сталей X10Cr3 (1), X22CrNi17 (4) и аустенитных сталей X5CrNiMo18.10 (2), X5CrNi18.9 (3) и X12CrNi18.3 (3) (Schwandt S.)

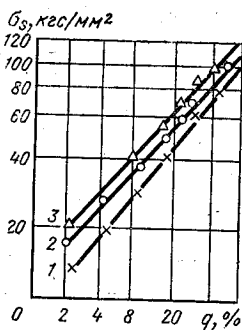


Рис. 5.43. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) аустенитных сталей 07X16H6 (1), 12X18H9 (2) и 12X18H10T (3) [22]

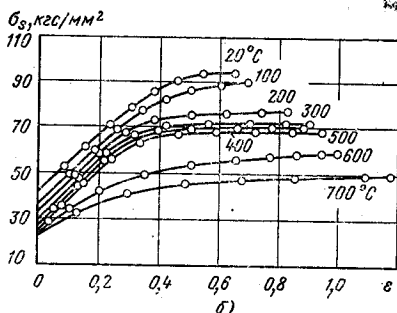
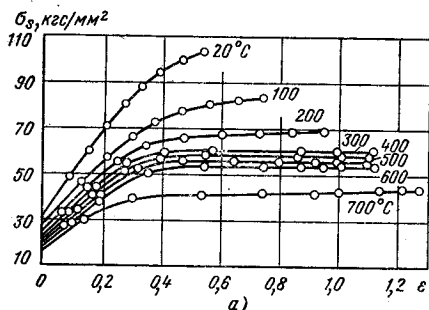


Рис. 5.44. Кривые упрочнения при сжатии аустенитной стали 12X18H9T (а) и 20X23H18 (б) при температурах 20—700°C [26]

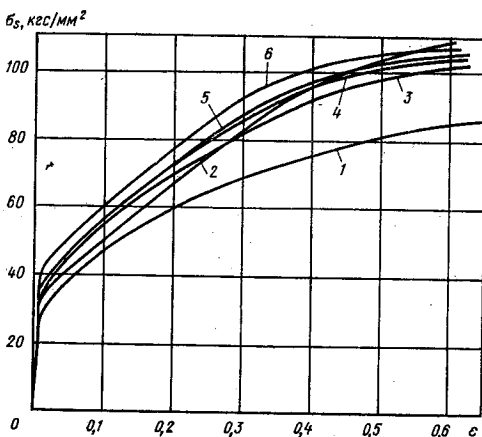


Рис. 5.45. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) закаленных аустенитных сталей X2CrNi18.16 (1), X12CrNi18.8 (2), X5CrNiMo18.10 (3), X10CrNiMoTi18.10 (4); X10CrNiTi18.9 (5); X10CrNiNb18.9 (6) [9]

Рис. 5.46. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) аустенитных сталей (Materna D.):
 1 — X12CrNi17.7 (сорт А); 2 — X12CrNi17.7 (сорт В); 3 — X8CrNi18.12

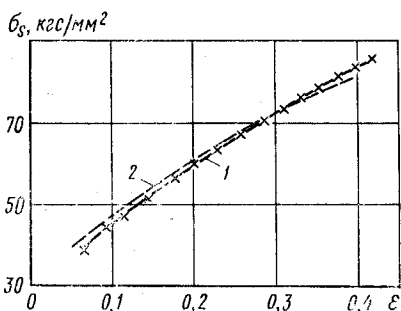
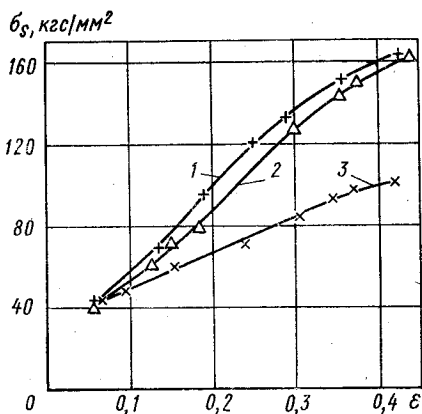


Рис. 5.47. Кривые упрочнения аустенитной стали X8CrNi18.12 при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) (Materna D.):
 1 — изотермическом; 2 — обычном

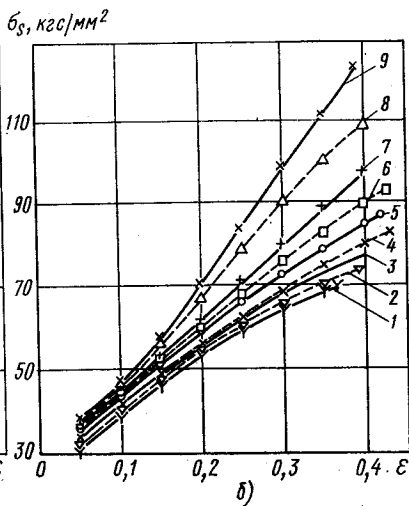
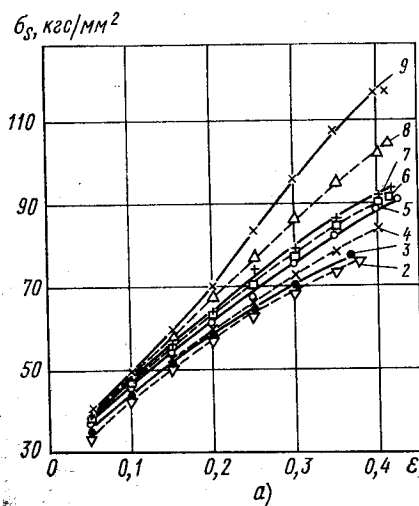


Рис. 5.48. Кривые упрочнения при растяжении аустенитных сталей X12CrNi17.7 сорта А (б) и X12CrNi17.7 сорта В (а) при температурах (Materna D.):
 1 — 140°C; 2 — 120°C; 3 — 100°C; 4 — 80°C; 5 — 60°C; 6 — 50°C; 7 — 40°C; 8 — 30°C; 9 — 20°C

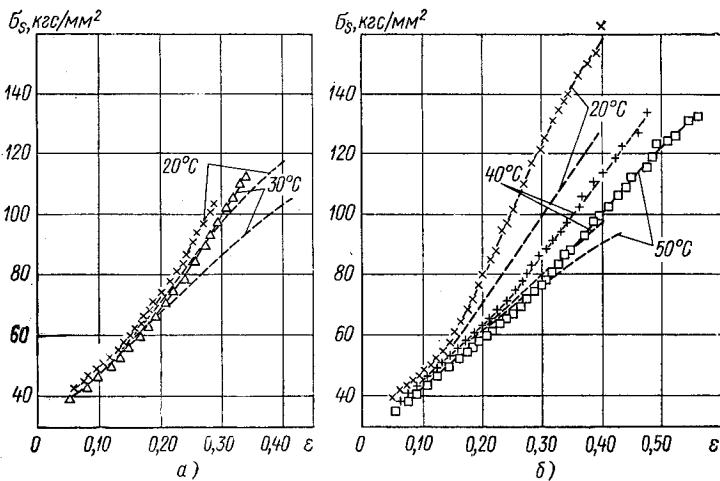


Рис. 5.49. Кривые упрочнения аустенитных сталей X12CrNi17.7 сорта А (б) и X12CrNi17.7 сорта В (а) при изотермическом (сплошные линии) и обычном растяжении (штриховые линии) при температурах 20; 30; 40; 50°С (Матерна D.).

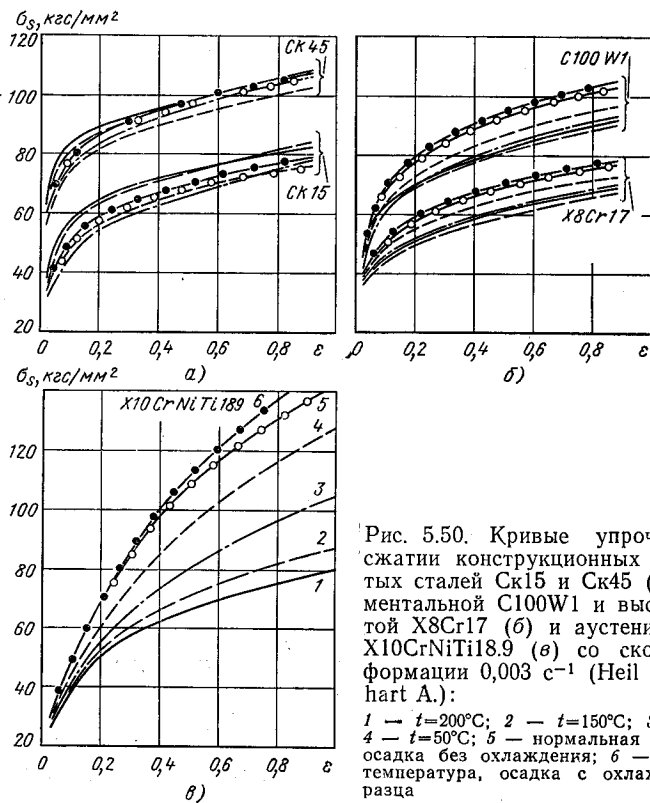


Рис. 5.50. Кривые упрочнения при сжатии конструкционных углеродистых сталей Ск15 и Ск45 (а), инструментальной С100W1 и высокохромистой X8Cr17 (б) и аустенитной стали X10CrNiTi18.9 (в) со скоростью деформации 0,003 с⁻¹ (Heil H.-P., Lienhart A.):

1 — $t=200^{\circ}\text{C}$; 2 — $t=150^{\circ}\text{C}$; 3 — $t=100^{\circ}\text{C}$; 4 — $t=50^{\circ}\text{C}$; 5 — нормальная температура, осадка без охлаждения; б — нормальная температура, осадка с охлаждением образца

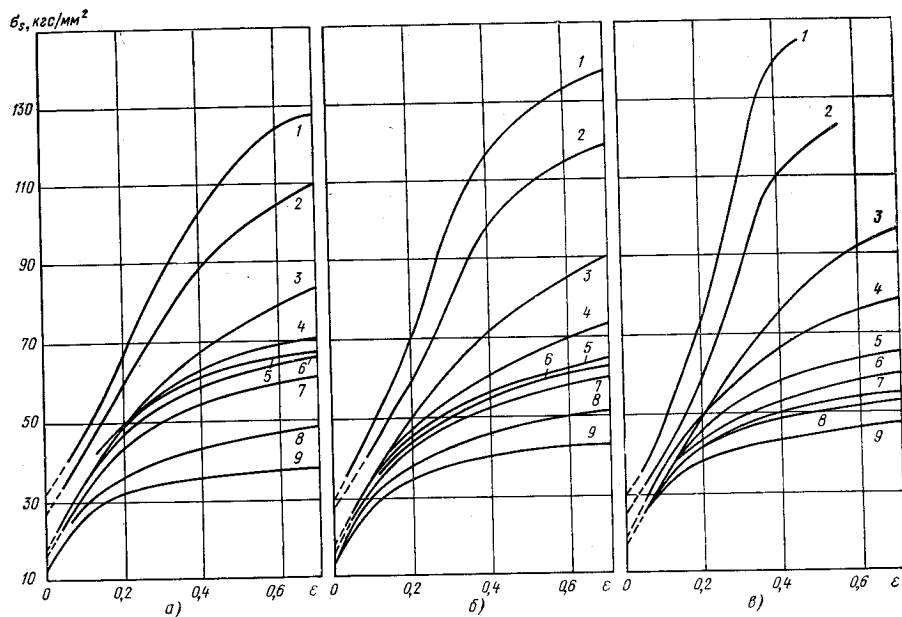


Рис. 5.51. Кривые упрочнения при сжатии закаленной аустенитной стали X8CrNiTi18.10 со скоростями деформации 0,1 (а), 1,5 (б) и 90 с^{-1} (в) при температурах (Fritzsch G., Siegel R.):
 1 — 20°C; 2 — 100°C; 3 — 200°C; 4 — 300°C; 5 — 400°C; 6 — 500°C; 7 — 600°C; 8 — 700°C; 9 — 800°C

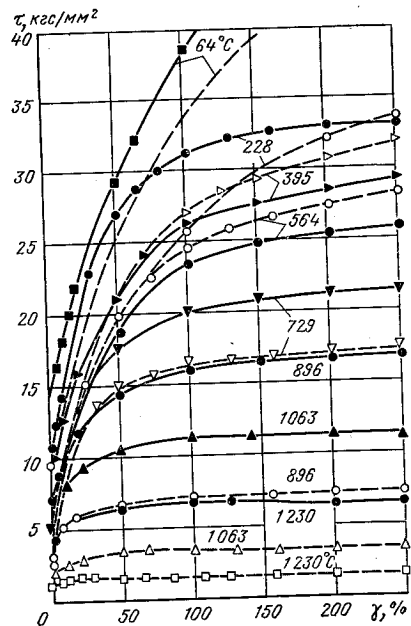


Рис. 5.52. Кривые упрочнения при кручении аустенитной стали 304 со скоростью деформирования $4,5 \cdot 10^{-3}$ (штриховые линии) и 44 с^{-1} (сплошные линии) при различных температурах [42]

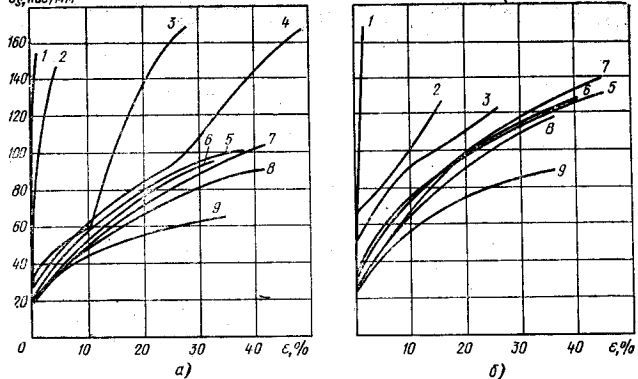


Рис. 5.53. Кривые упрочнения при растяжении никелевых сплавов 37Ni25 (а) и 80Ni25 (б) при температурах (Ламбакахар О. О., Паскаль Ю. И.): 1 — (-196)°С; 2 — (-100)°С; 3 — (-50)°С; 4 — (-25)°С; 5 — 20°С; 6 — 100°С; 7 — 200°С; 8 — 300°С; 9 — 400°С

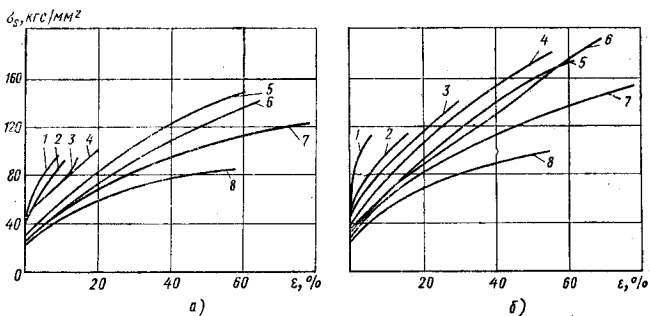


Рис. 5.54. Кривые упрочнения при растяжении мелкозернистых марганцевистых сплавов 60Г13 (а) и 75Г13 (б) при температурах (Ламбакахар О. О., Паскаль Ю. И.): 1 — (-196)°С; 2 — (-100)°С; 3 — (-50)°С; 4 — 20°С; 5 — 100°С; 6 — 200°С; 7 — 300°С; 8 — 400°С

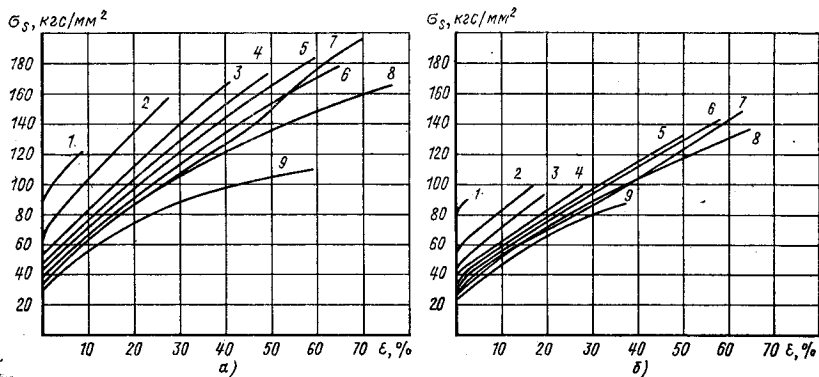


Рис. 5.55. Кривые упрочнения при растяжении мелкозернистого (а) и крупнозернистого сплава 110Г13 при температурах (Ламбакахар О. О., Паскаль Ю. И.): 1 — (-196)°С; 2 — (-150)°С; 3 — (-100)°С; 4 — (-50)°С; 5 — 20°С; 6 — 100°С; 7 — 200°С; 8 — 300°С; 9 — 400°С

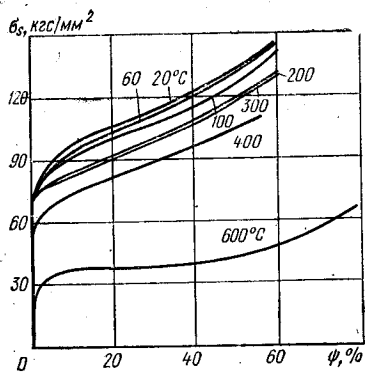


Рис. 5.56. Кривые упрочнения при растяжении стали 14X17H2-III при различных температурах (Руденко В. Н., Спиваков А. С.)

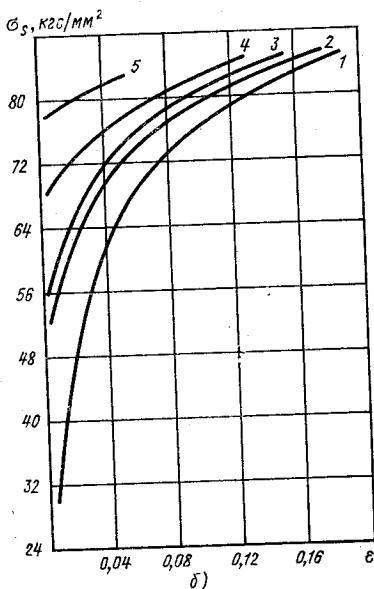
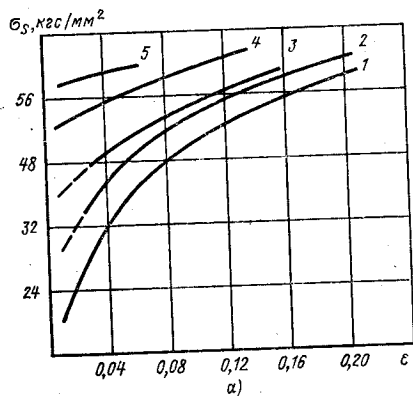


Рис. 5.57. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) горячекатаных и предварительно деформированных волочением сталей со степенями деформации (Pankin W., Fritz H.):
 а — сталь St42; 1 — 0%; 2 — 1,5%; 3 — 5,2%; 4 — 12,4%; 5 — 17,9%; б — сталь St70; 1 — 0%; 2 — 1,2%; 3 — 2,5%; 4 — 5,0%; 5 — 10%

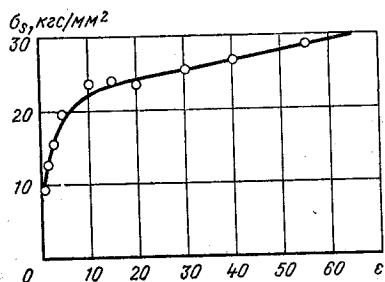


Рис. 5.58. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) волоченого ($\epsilon_{\text{вол}}=55\%$) сплава Y1 (сплав F-Si 3,0%), (Griffiths D., Riley J. N.)

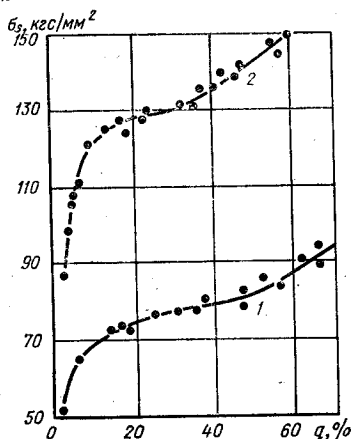


Рис. 5.59. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) волоченых сталей A12 (1) и 55C (2) (по данным автора)

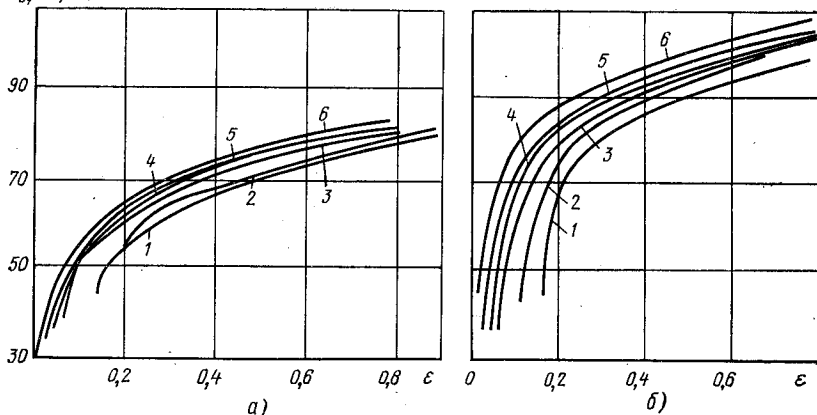
$\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$ 

Рис. 5.60. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) волооченных сталей со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):
 а — St42; 1 — 0%; 2 — 1,5%; 3 — 2,5%; 4 — 5,2%; 5 — 12,4%; 6 — 18,0% б — St70;
 1 — 0%; 2 — 1,2%; 3 — 2,5%; 4 — 5%; 5 — 10%; 6 — 15%

Рис. 5.61. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) предварительно осажженных в холодном состоянии сталей со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):
 а — St42; 1 — 0%; 2 — 1,3%; 3 — 2,6%; 4 — 5,4%; 5 — 10,1%; 6 — 20%; б — St70;
 1 — 0%; 2 — 1,1%; 3 — 2,5%; 4 — 5,4%; 5 — 10,5%; 6 — 20,8%

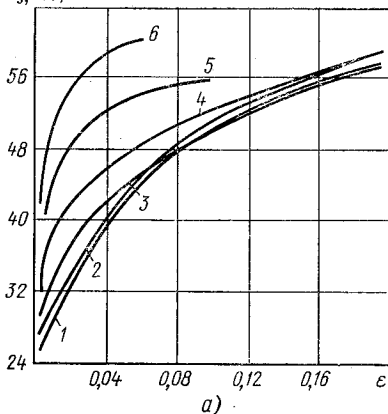
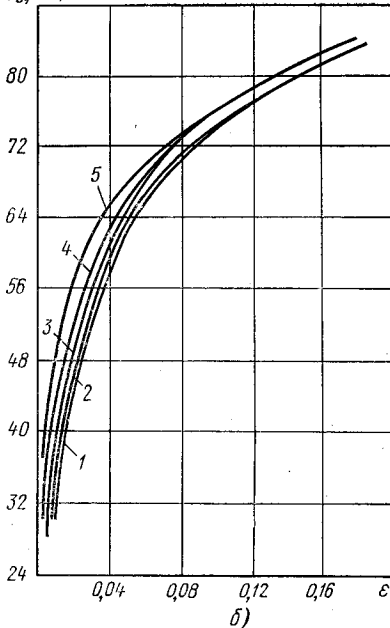
 $\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$  $\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$ 

Рис. 5.66. Кривые упрочнения при растяжении (20°C) Fe—Mn-сплавов (O. Atsushi, Y. Susumu, O. Minoru):
 а — 15% Mn; б — 24% Mn; в — 30% Mn; 1 — в условиях атмосферного давления; 2 — в условиях давления 12 000 кгс/см²; 3 — в условиях атмосферного давления, но предварительно подверженных воздействию давления 12 000 кгс/см²

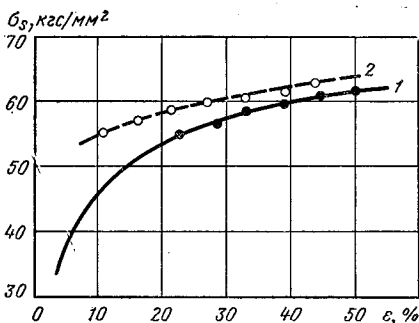


Рис. 5.62. Кривая упрочнения при кручении ($t=20^\circ\text{C}$) горячекатаной (1) и предварительно деформированной (2) растяжением до $\epsilon=14,1\%$ стали С15 (Panknin W., Bach M.)

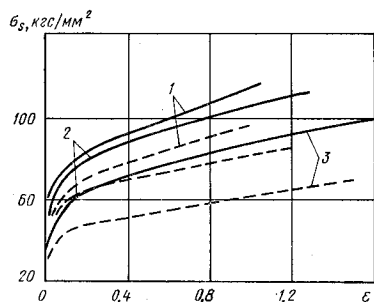


Рис. 5.63. Кривые упрочнения при статическом растяжении (сплошные) и растяжении с наложением ультразвуковых колебаний (штриховые) при 20°C сталей (Овчинников А. Г. и др.): 1 — У8А; 2 — 45; 3 — 20

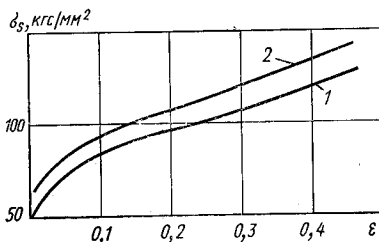


Рис. 5.64. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) аустенитной стали типа 18-8 в условиях атмосферного (1) и постоянного давления (2) $12\,000\text{ кгс/см}^2$ (А. Oguchi, S. Yoshida)

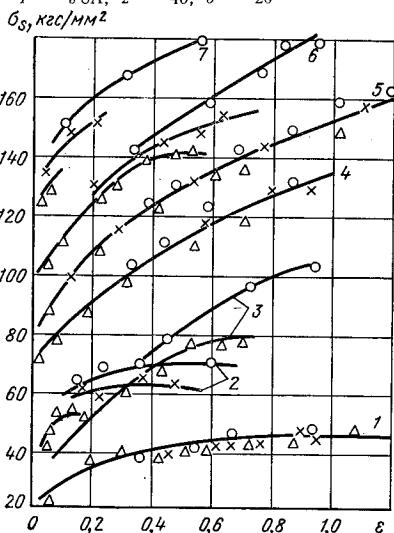
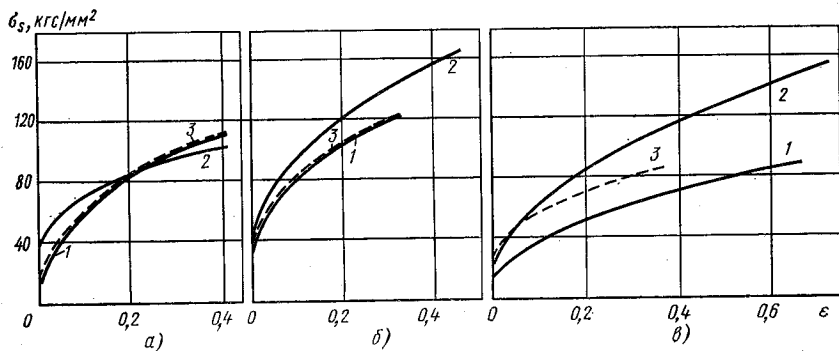


Рис. 5.65. Кривые при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) в условиях атмосферного давления (Δ), гидростатического 400 (\times) и 6000 кгс/см^2 (\circ) [7]: 1 — Д1; 2 — СЧ 21-40; 3 — ЛС59-1; 4 — ВМ1; 5 — П18; 6 — ВТ16; 7 — ВА



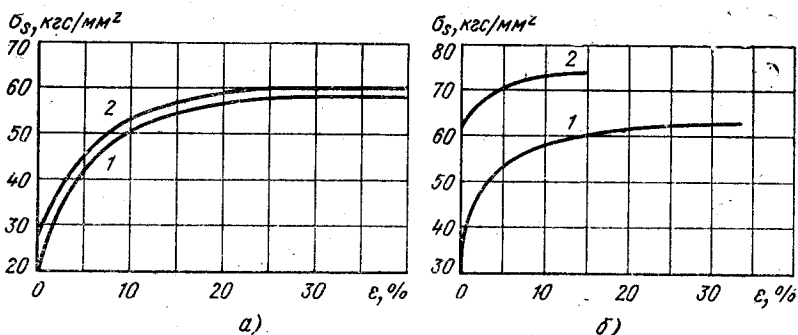


Рис. 5.67. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) технического железа, предварительно деформированного осадкой до $\epsilon=5\%$ (а) и $\epsilon=40\%$ (б) в обычных условиях (2) и с приложением ультразвуковых колебаний с частотой 19 кГц (1) (Северденко В. П., Степаненко А. В.).

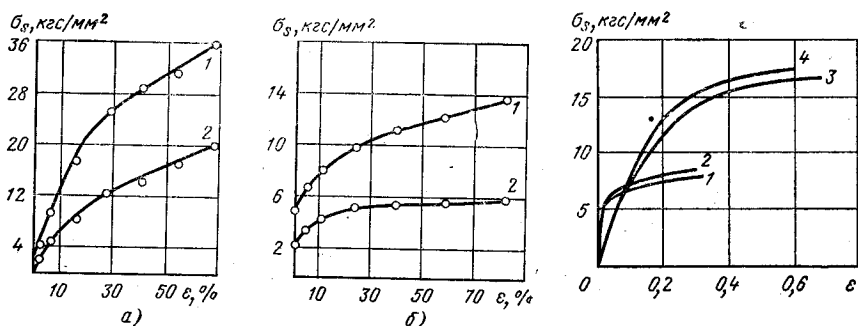


Рис. 5.68. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) меди (а) алюминия (б) (Северденко В. П., Клубович В. В., Харитонович М. В.): 1 — осаживание в обычных условиях; 2 — осаживание с наложением ультразвуковых колебаний

Рис. 5.69. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) алюминия (1, 2) и меди (3, 4) (Ащукин А. В., Гусяков А. А., Кулиш Я. М., Любарский И. М.): 1, 3 — в вакууме $1 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.; 2, 4 — на воздухе

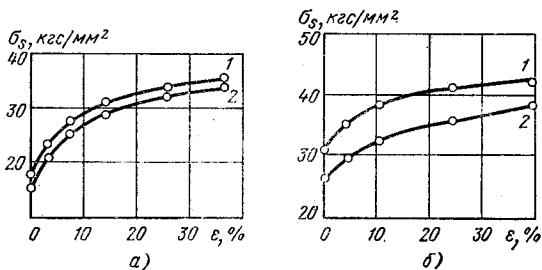


Рис. 5.70. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) предварительно деформированной осадкой в холодном состоянии до $\epsilon=10\%$ (а) и $\epsilon=40\%$ (б) технически чистой меди в обычных условиях (1) и в ультразвуковом поле (2) (Северденко В. П., Клубович В. В., Харитонович М. В.)

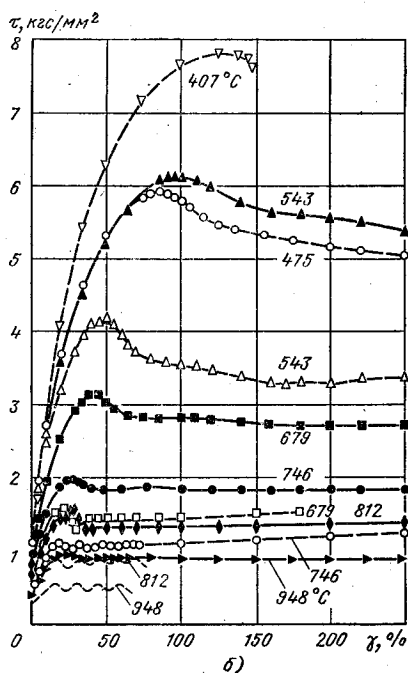
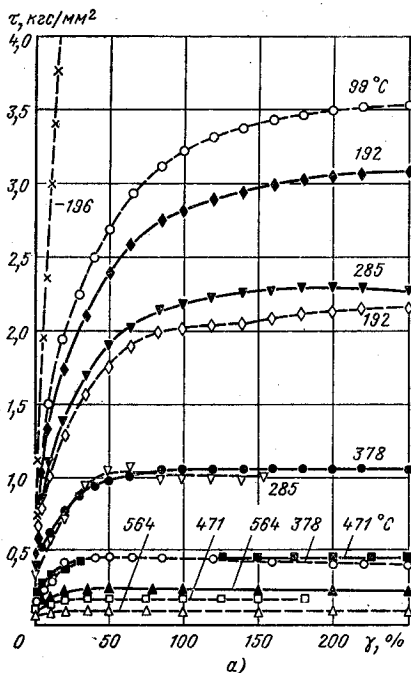


Рис. 5.71. Кривые упрочнения при кручении ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных алюминия А199,995 (а) и меди Cu99,99 (б) со скоростью деформации $2,4 \cdot 10^{-3}$ (штриховые линии) и $0,12 \text{ с}^{-1}$ (сплошные линии) при разных температурах [42]

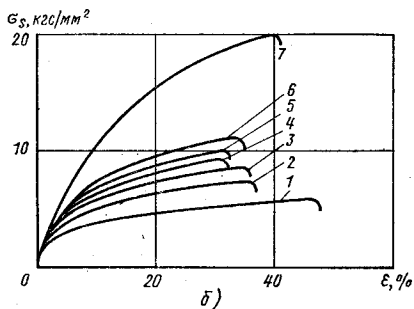
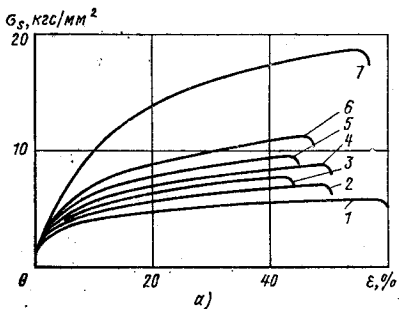


Рис. 5.72. Кривые упрочнения при растяжении отожженного алюминия с различным диаметром зерна (Knöll Hugo, Macheraguch Eckard):
 а — $d_a=150 \text{ мкм}$; 1 — $(+80)^{\circ}\text{C}$; 2 — $(+22)^{\circ}\text{C}$; 3 — $(-15)^{\circ}\text{C}$; 4 — $(-53)^{\circ}\text{C}$; 5 — $(-85)^{\circ}\text{C}$; 6 — $(-100)^{\circ}\text{C}$; 7 — $(-195)^{\circ}\text{C}$; б — $d_a=440 \text{ мкм}$; 1 — 80°C ; 2 — $(-5)^{\circ}\text{C}$; 3 — $(-50)^{\circ}\text{C}$; 4 — $(-75)^{\circ}\text{C}$; 5 — $(-100)^{\circ}\text{C}$; 6 — $(-120)^{\circ}\text{C}$; 7 — $(-195)^{\circ}\text{C}$

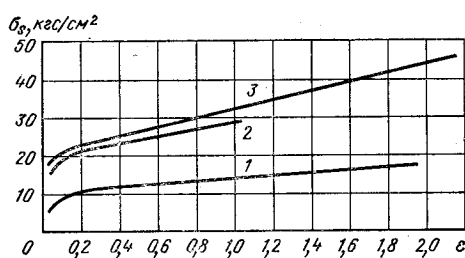


Рис. 5.73. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженных алюминия АД1 (1) и его сплавов АМг2М (2) и Д1 (3) (по данным автора)

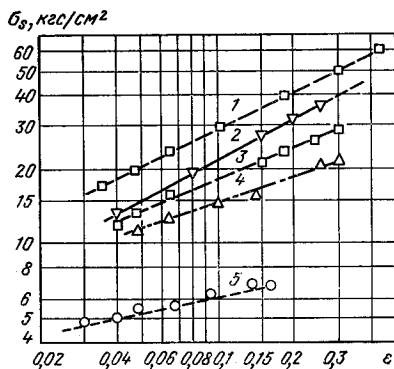


Рис. 5.75. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) после рекристаллизационного отжига алюминия А199,5 (5), электромеди Е-Сu (4) и латуней CuZn15 (3), CuAl4 (2) и CuZn30 (1) при $\dot{\epsilon}=2$ мм/мин

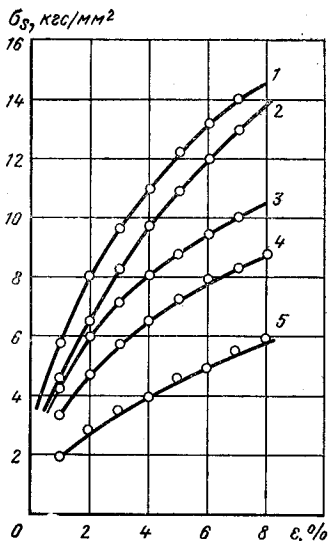


Рис. 5.74. Кривые упрочнения при сжатии отожженного алюминия А199,5 диаметром зерна 30 (1), 115 (2), 110 (3, 4) и 120 мкм (5) со скоростями деформации $5 \cdot 10^2$ (1, 2, 3, 4) и $7 \cdot 10^{-4}$ (5) при температурах -180 (1, 2); -90 (30), 20°C (4, 5) (Polakovič A., Táborský L., Nyross H.)

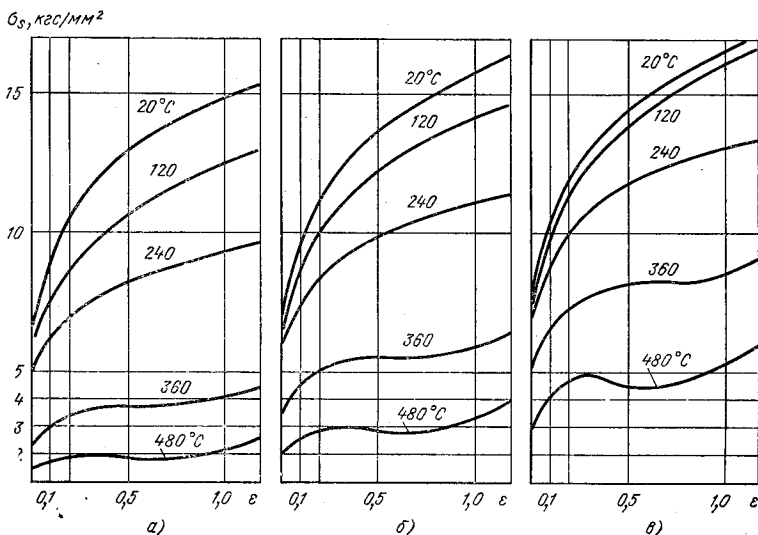


Рис. 5.76. Кривые упрочнения при сжатии алюминия А199,5 при скоростях деформации 0,25 (а), 4 (б) и 63 с⁻¹ (в) и разных температурах [36]

Рис. 5.77. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростью $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ отожженных алюминия Al99,5 (1), медных сплавов CuNi18Zn20 (5), CuZn37 (8), CuSn8 (9), никеля Ni99,5 (6), никелевого сплава NiCu30Fe (7), волооченого алюминиевого сплава AlMg3 (3), волооченого и улучшенного алюминиевого сплава AlMgSi1 (4), AlCuMg2 (2) [46]

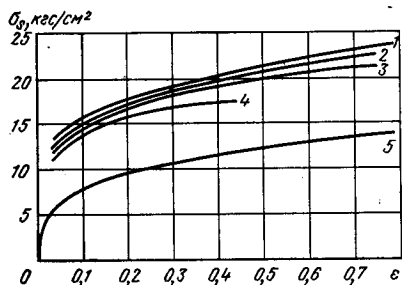
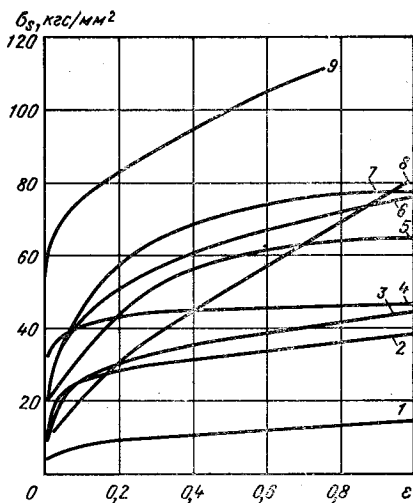


Рис. 5.78. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминия Al99,4 со скоростью деформации (Ohyane M., Takashima F., Osaka K.):

1 — 206 м/с; 2 — 183 м/с; 3 — 137 м/с; 4 — 97 м/с; 5 — статистическое испытание

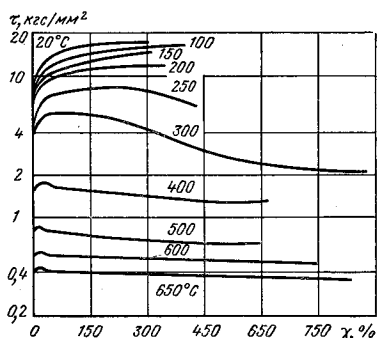
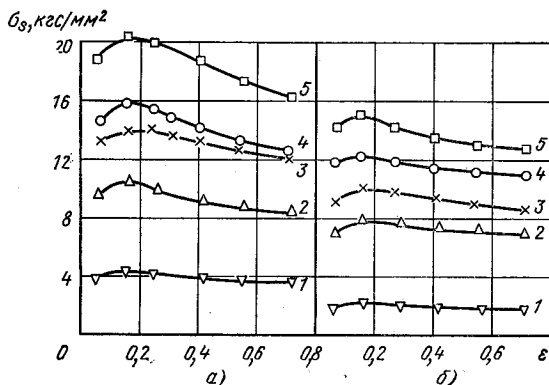


Рис. 5.79. Кривые упрочнения технического чистого алюминия при кручении при разных температурах со скоростью $0,02 \text{ с}^{-1}$ (Hein-Peter Stüwe, Berthold Drube)

Рис. 5.80. Кривые упрочнения при сжатии на пластометре алюминиевых сплавов при температурах 350°C (а) и 450°C (б) со скоростью деформации 80 с^{-1} алюминиевых сплавов АДЗ1 (1), АК6 (2), АК8 (3), Д16 (4), АМг6 (5) [6]



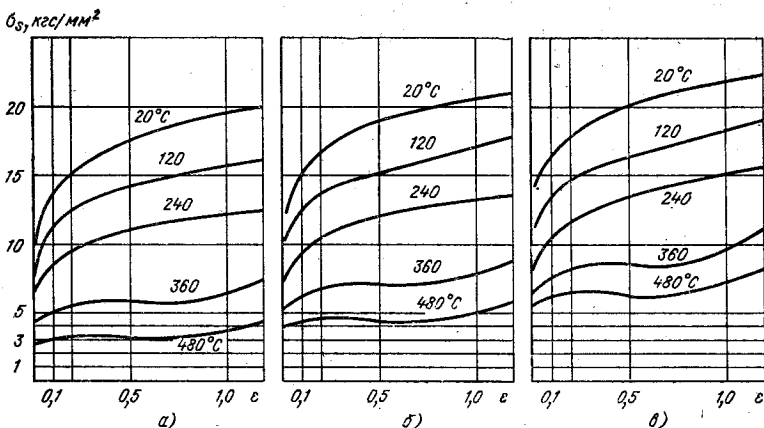


Рис. 5.81. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMn со скоростями деформации 0,25 (а), 4 (б) и 63 с⁻¹ (в) при разных температурах [36].

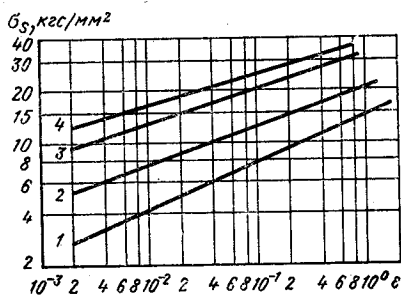


Рис. 5.82. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) алюминия Al199,5 (1) и алюминиевых сплавов AlMg1 (2), AlMg3 (3) и AlMg4 (4) (Lenz D., Renouard G. M.)

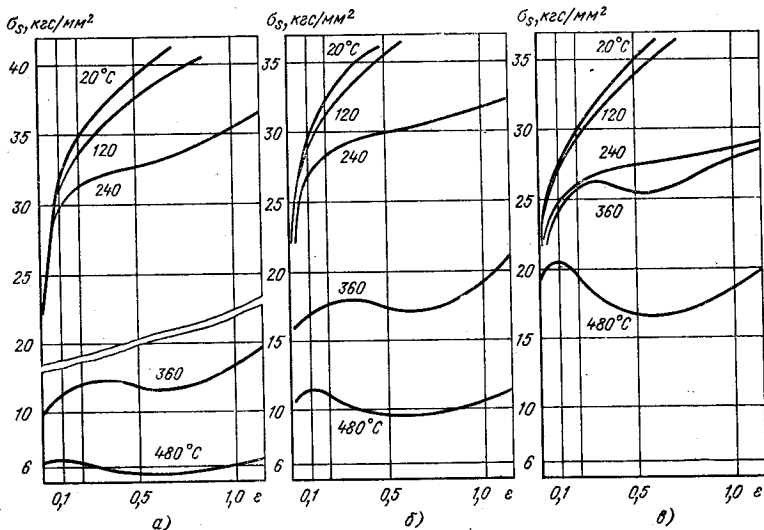


Рис. 5.83. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMg1.5 со скоростями деформаций 0,25 (а), 4 (б) и 63 с⁻¹ (в) при разных температурах [36].

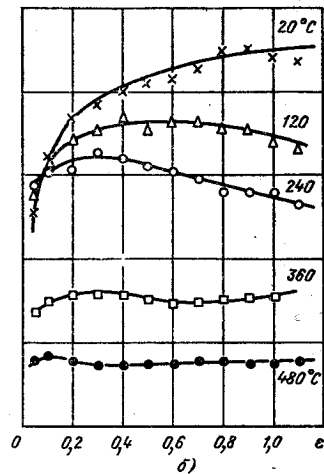
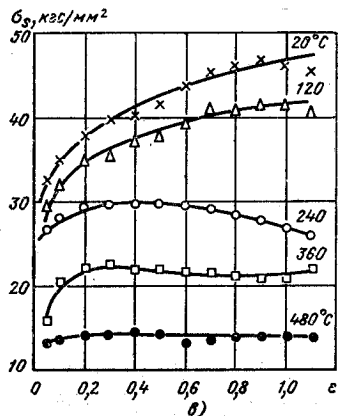
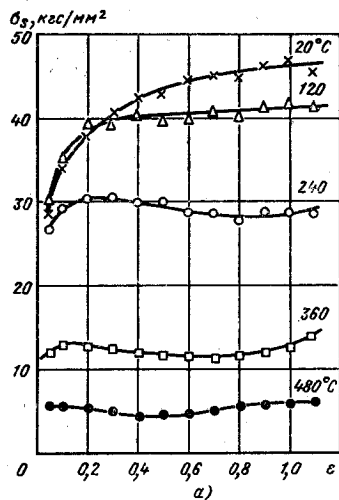
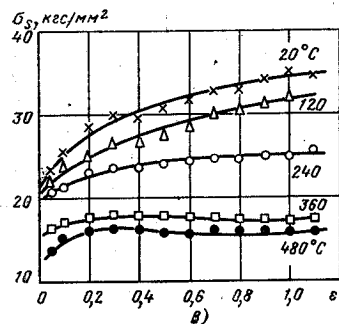
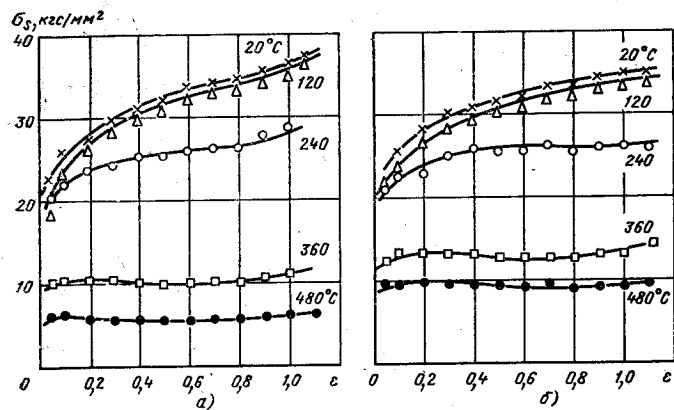


Рис. 5.84. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMgMn со скоростями деформации 0,25 (а), 4,0 (б) и 63 с⁻¹ (в) при разных температурах [36]

Рис. 5.85. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава AlMg 4,5 Мп со скоростями деформаций 0,25 (а), 4 (б) и 63 с⁻¹ (в) при разных температурах [36]

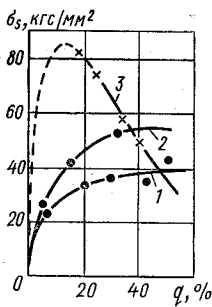


Рис. 5.86. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженного дуралюминия Д16 при скоростях деформаций 1—2 (1), 6,25 (2) и 35—50 м/с (3) (Максимов А. И., Левицкая Г. Л., Сердюк Ю. А., Смирнов Г. В., Лисицын В. П., Фомин Л. Н.).

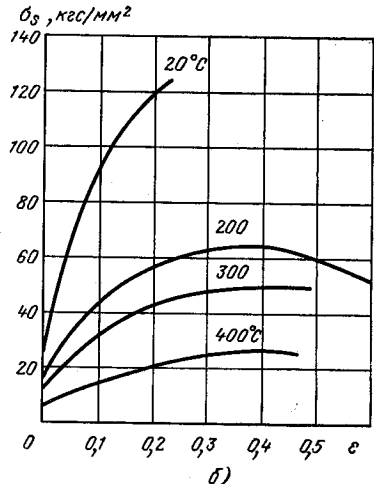
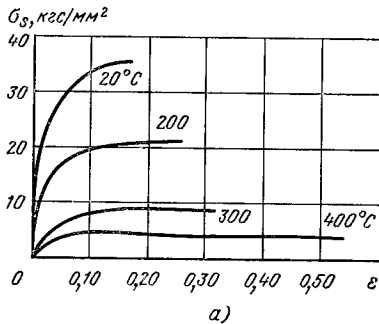


Рис. 5.87. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава АБМц со скоростью деформации 5 (а) и 26 м/с (б) при различных температурах. (Солодуха О. А., Голубков В. Г.)

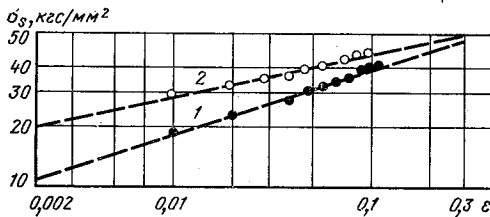
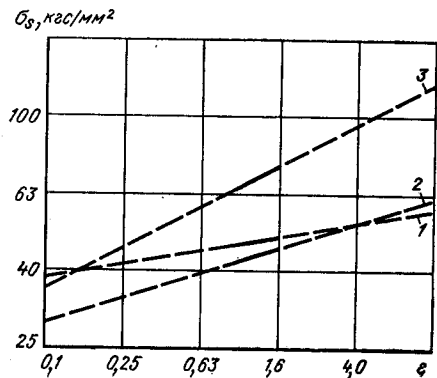


Рис. 5.88. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминиевого сплава AlCuMg1: 1 — после закалки; 2 — после закалки с отпуском (Pysz G.)

Рис. 5.89. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминиевого сплава AlZnMgCu1,5 (1), электромеде E-Cu (2) и стали МвК6 (3)



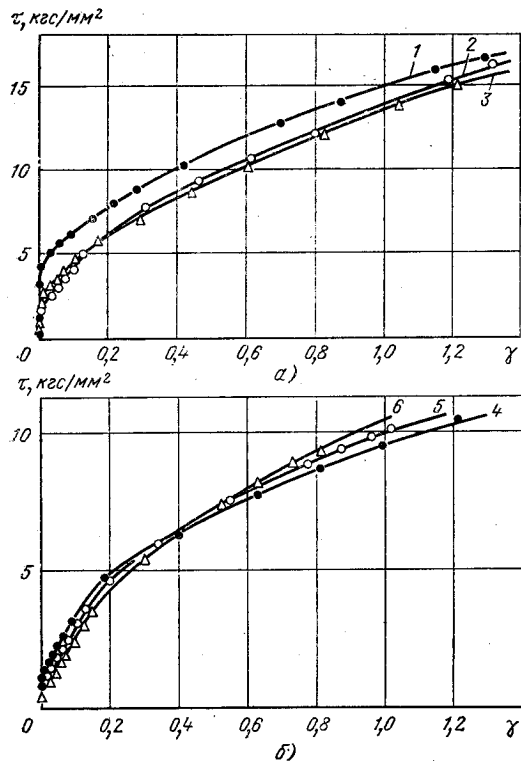


Рис. 5.90. Кривые упрочнения при кручении ($t=20^{\circ}\text{C}$) (Tiainen T., Kettunen P. O.):
 а — никеля Ni 99,9% диаметром зерна 0,058 мм (1); 0,222 мм (2); 0,685 мм (3); б — меди Cu 99,99% диаметром зерна 0,021 мм (4); 0,161 мм (5), 0,909 мм (6)

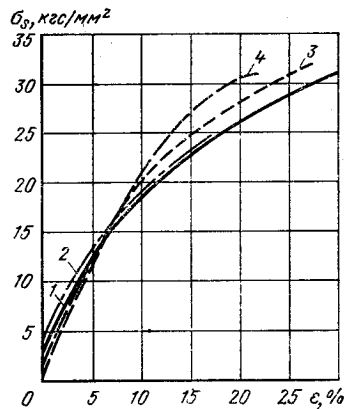


Рис. 5.91. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженной в вакууме меди (99,99%) со скоростью деформации $0,16\text{ с}^{-1}$ с размером зерна (Egon Dick):
 1 — 0,029 мм; 2 — 0,041 мм; 3 — 0,3 мм; 4 — 3,3 мм

Рис. 5.93. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных меди М2 (1) и латуней Л63 (2), ЛС59-1В (3) (по данным автора):
 ○ — непрерывная осадка;
 × — двухступенчатая осадка

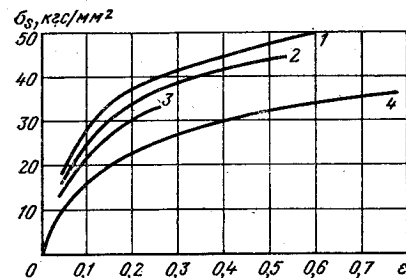
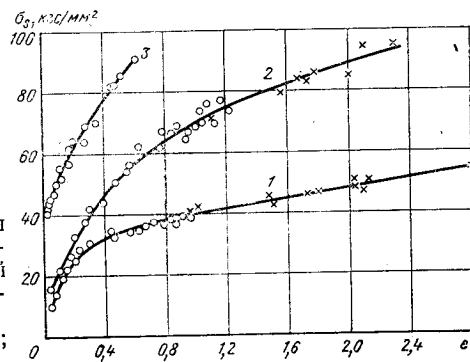


Рис. 5.92. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) меди (99,99%) с различными скоростями (Ohyane M., Takashima F., Osakada K.):
 1 — 18,7 м/с; 2 — 13,1 м/с; 3 — 7,5 м/с; 4 — 0,09 м/с



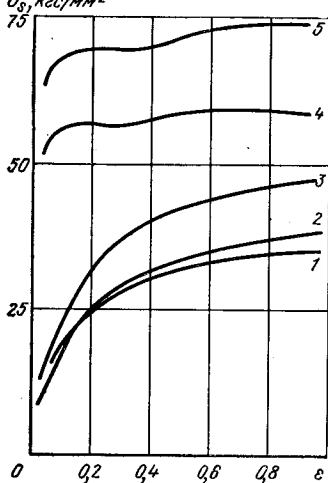


Рис. 5.94. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) отожженных электролитической меди (1) и медных сплавов CuCr (2) и CuNi₂Si (3) и волоченых сплавов CuCr (4) и CuNi₂Si (5) (Vater M.)

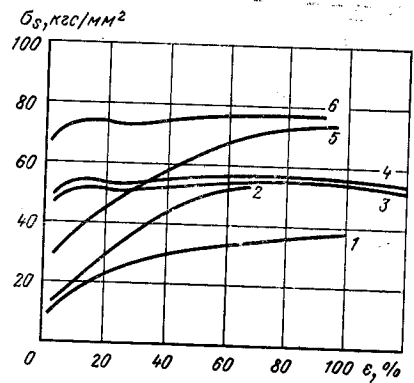


Рис. 5.95. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) электролитической меди (1), латуни Ms63 (2) и Ms60 (5) и волоченых медных сплавов CuCr (3), CuNiSi (4) и CuNi₂Si (6) (Vater M.)

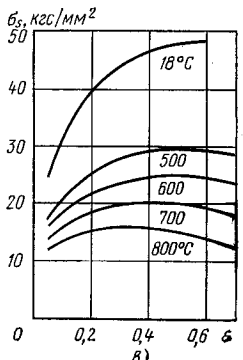
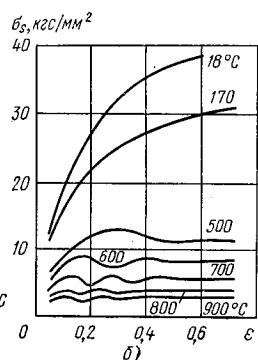
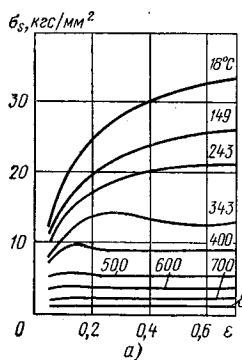


Рис. 5.96. Кривые упрочнения при сжатии меди при различных температурах со скоростями деформации $5 \cdot 10^{-4}$ (а), $0,6-0,7$ (б) и $2,5 \cdot 10^2$ с⁻¹ (в) (Dehnke W.)

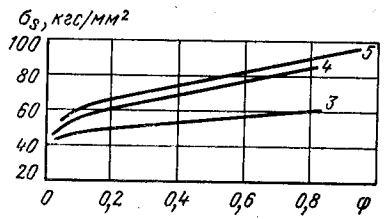
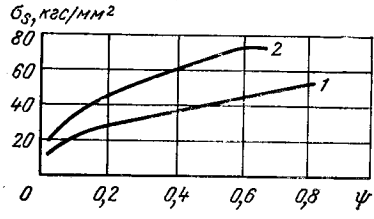


Рис. 5.97. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) (Катор Л., Ньюлас П.):
 1 — высокочистой меди; 2 — электролитического никеля; 3, 4, 5 — медно-никелевых сплавов состава 75,53% Cu и 24,28% Ni; 47,5% Cu и 52,4% Ni; 22,30% Cu и 77,52% Ni

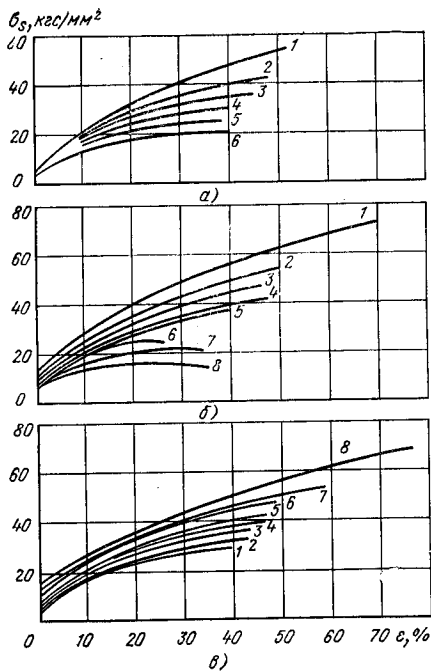


Рис. 5.98. Кривые упрочнения при растяжении меди Cu99,98 ($d_3 = 50$ мкм) и оловянистых бронз ($d_3 = 50$ мкм) с различным содержанием олова (%) при разных температурах (Otmar Vöhringer, Eckard Macherauch)

а — Cu 99,98; 1 — (-195)°C; 2 — (-120)°C; 3 — (-50)°C; 4 — (+22)°C; 5 — (+120)°C; 6 — (+220)°C; б — бронза с содержанием олова 1,27%; 1 — (-195)°C; 2 — (-120)°C; 3 — (-50)°C; 4 — (+22)°C; 5 — (+220)°C; 6 — (+350)°C; 7 — (+400)°C; 8 — (+450)°C; в — медь Cu 99,98 (1) и бронза с содержанием олова 0,17% (2); 0,40% (3); 0,88% (4); 1,27% (5); 2,62% (6); 3,12% (7); 4,90% (8) при $t = 22^\circ\text{C}$

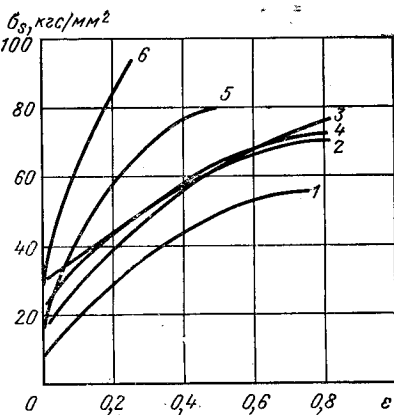
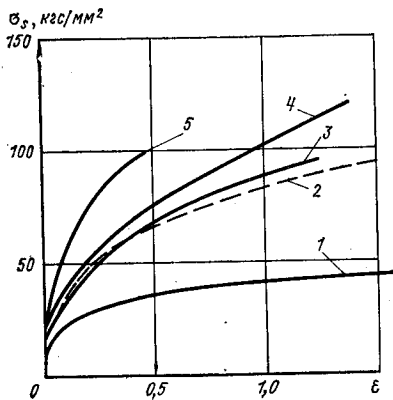


Рис. 5.99. Кривые упрочнения при сжатии ($t = 20^\circ\text{C}$) латуней Ms63 (1), Ms60 (2), Ms60 (3), SoMs59 (4), G-SoMs57F45 (5), G-SoMs57F50 (6), (Vater M., Stenger H.)

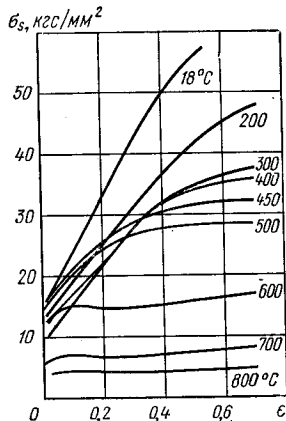


Рис. 5.100. Кривые упрочнения при сжатии латуни CuZn36 со скоростью деформации $2,5 \text{ c}^{-1}$ при различных температурах (Vater M., Lienbart A.)

Рис. 5.101. Кривые упрочнения при растяжении ($t = 20^\circ\text{C}$) электромеди E-Cu (1) и отожженных медных сплавов CuAl7 (2), CuZn31Si (3), CuSn8 (4), CuAl10Fe (5) (Stenger H.)

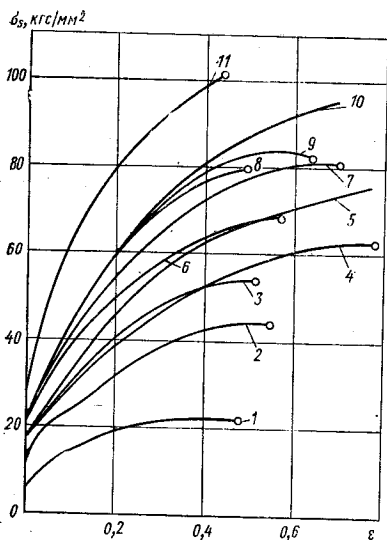


Рис. 5.102. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) литейных бронз G-SnPbBz25 (1), G-SnPbBz20 (2), G-SnPbBz15 (3), Rg5 (4), G-SnBz10 (5), G-SnPbBz5 (6), G-SnBz12 (7), G-SnBz14 (8), G-SnBz16 (9), G-NiAlBzF50 (10), G-NiAlBzF60 (11) (Vater M., Stenger H.)

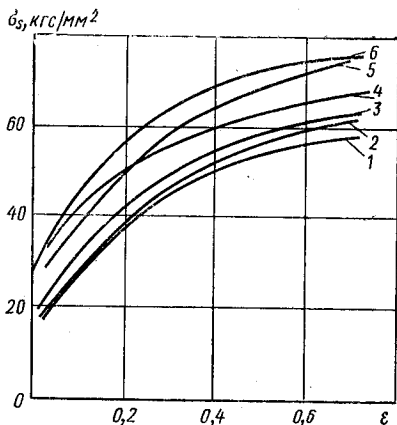


Рис. 5.103. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) никеля (4), сплавов меди с никелем и цинком Ns62.18Pb (1), Ns65.12 (2), Ns62.18 (3), Ns57.12 (5) и никеля с медью NiCu30F (6) (Vater M., Stenger H.)

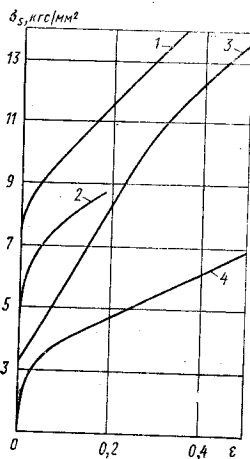
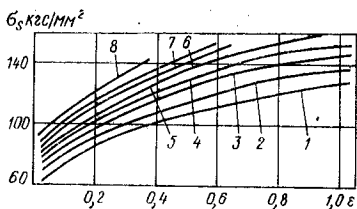
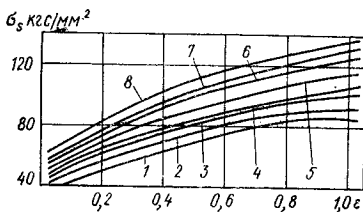


Рис. 5.104. Кривые упрочнения при сжатии [$t=(-196)^{\circ}\text{C}$] титана высокой (1) и технической (3) чистоты и циркония высокой (2) и технической (4) чистоты (Garda A. M., Aigeltinger E., Reed—Hill R. E.)

Рис. 5.105. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) титана с различными скоростями деформаций (Bühler H., Wagener H. W.): а — Ti (сорт 1); б — Ti (сорт 2); 1 — $0,004\text{ c}^{-1}$; 2 — $0,032\text{ c}^{-1}$; 3 — $0,25\text{ c}^{-1}$; 4 — $2,0\text{ c}^{-1}$; 5 — $16,0\text{ c}^{-1}$; 6 — $1,25 \cdot 10^2\text{ c}^{-1}$; 7 — $5 \cdot 10^2\text{ c}^{-1}$; 8 — 10^3 c^{-1}



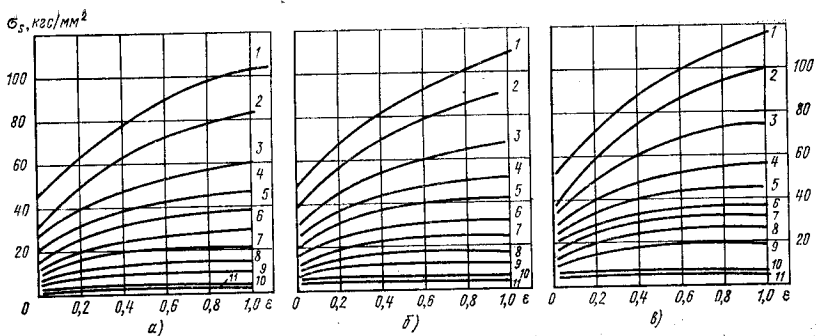


Рис. 5.106. Кривые упрочнения при сжатии титана Ti (сорт 1) со скоростью деформации $0,25$ (а), $2,0$ (б) и 16 с^{-1} (в) при температурах (Bühler H., Wagener H. W.):

1 — 20°C ; 2 — 100°C ; 3 — 200°C ; 4 — 300°C ; 5 — 400°C ; 6 — 500°C ; 7 — 600°C ; 8 — 700°C ; 9 — 800°C ; 10 — 900°C ; 11 — 1000°C

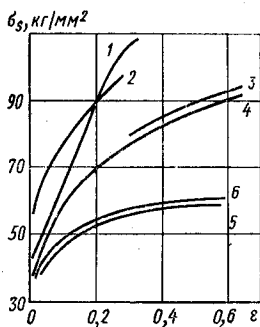
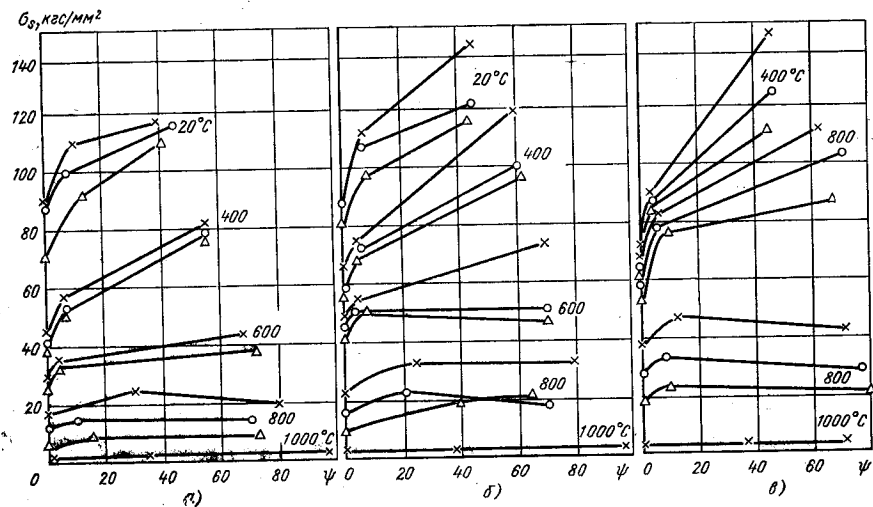


Рис. 5.107. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) титана (1, 2), циркония (3, 4) и ниобия (5, 6) со скоростью деформации 16 с^{-1} (Siegel R., Fritsch G.):

1, 3, 6 — вдоль оси прокатки; 2, 4, 6 — перпендикулярно оси прокатки

Рис. 5.108. Кривые упрочнения при растяжении отожженных титановых сплавов OT4 (а), BT14 (б) и BT8 (в) при скоростях деформации $0,0027$ (Δ), $0,0133$ (\circ), $0,04$ (\times) с^{-1} при различных температурах [12]



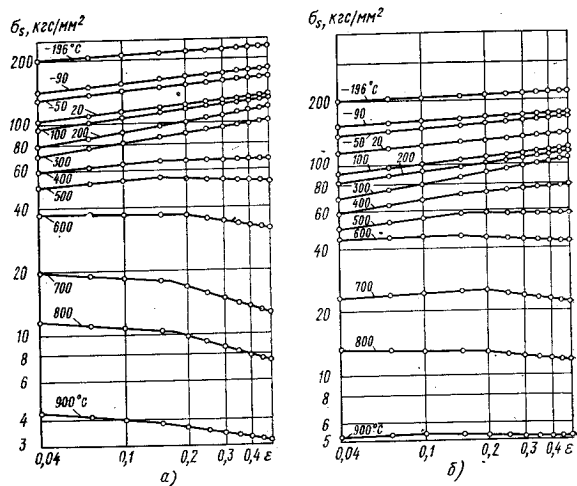


Рис. 5.109. Кривые упрочнения при сжатии отожженного титанового сплава ВТ16 со скоростями деформации $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ (а) и $3,3 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ (б) при разных температурах (Дмитриев Н. П.)

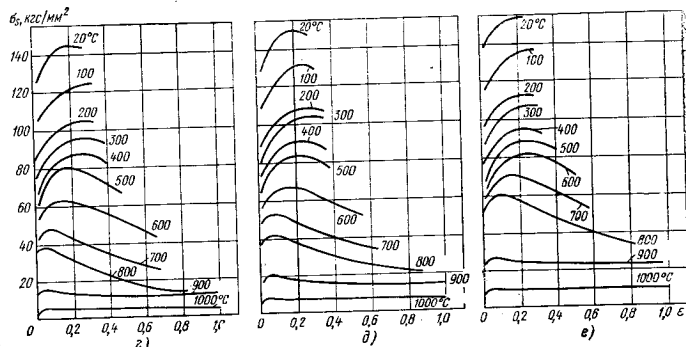
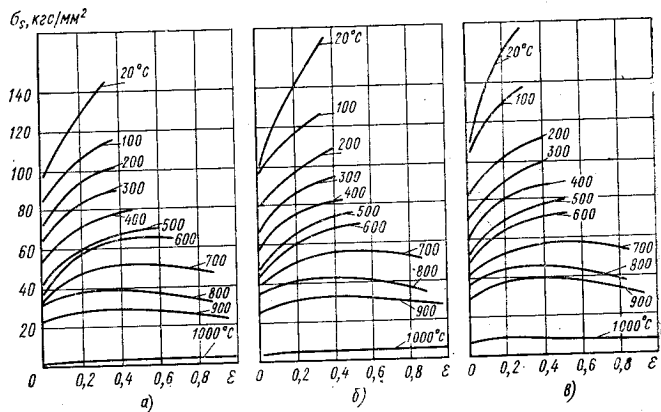


Рис. 5.110. Кривые упрочнения при сжатии отожженных титановых сплавов TiAlSn_{2,5} (а, б, в) и TiAl₆V₄ (г, д, е) со скоростью деформации 0,25 (а, г), 2,0 (б, д) и 16,0 c^{-1} (в, е) при различных температурах (Bühler Н., Wagne-ner Н. W.)

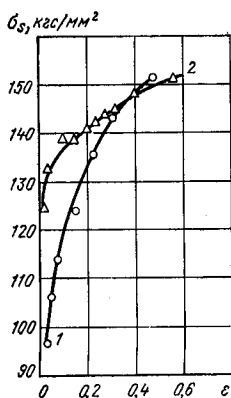


Рис. 5.111. Кривые упрочнения при сжатии ($t = 20^\circ \text{C}$) отожженных титановых сплавов (по опытам автора):
1 — ОТ4; 2 — ВТ16

Рис. 5.112. Кривые упрочнения при сжатии отожженного титанового сплава TiV13Cr11Al3 со скоростью деформации 0,25 (а), 2,0 (б) и 16,0 с^{-1} (в) при различных температурах (Bühler H., Wagneper H. W.)

Рис. 5.113 (снизу). Кривые упрочнения при сжатии отожженного титанового сплава TiAl8Mo1V1 со скоростью деформации 0,25 (а), 2,0 (б) и 16 с^{-1} (в) при различных температурах (Bühler H., Wagneper H. W.)

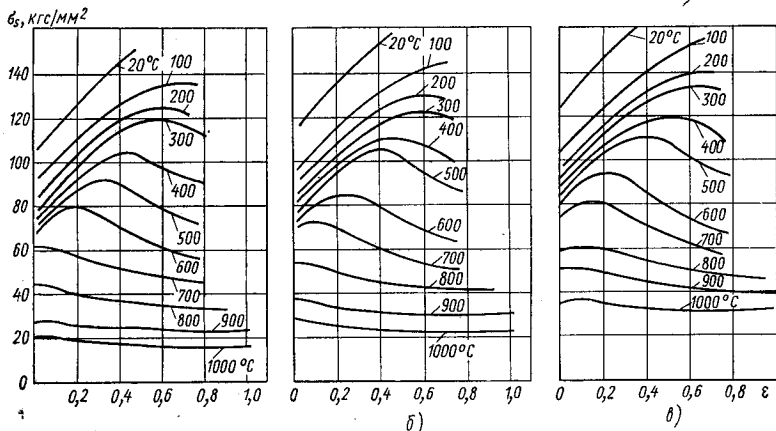


Рис. 5.112

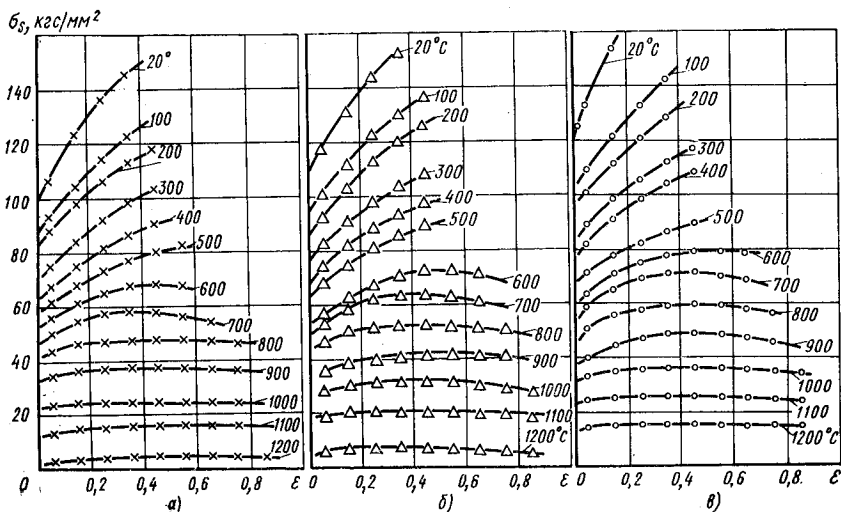


Рис. 5.113

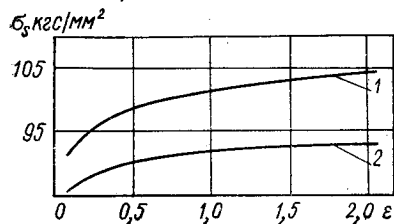


Рис. 5.114. Кривые упрочнения при сжатии (1) и растяжении (2) титанового сплава 317 при $t=20^{\circ}\text{C}$ со скоростью деформации $7 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ (Winstone M. R., Wright M. L., Rees D.)

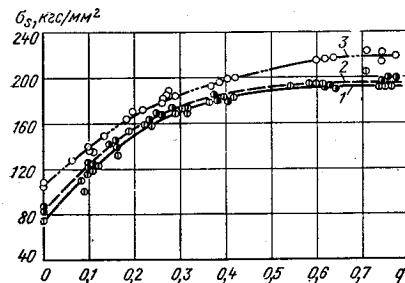


Рис. 5.115. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростью деформации 10 мм/мин горячекатаных жаропрочных сплавов на никелевой основе (по Жарову В. М.): 1 — ЭН437А; 2 — ХН77ТЮР; 3 — ХН70ВМТЮ при 20°C

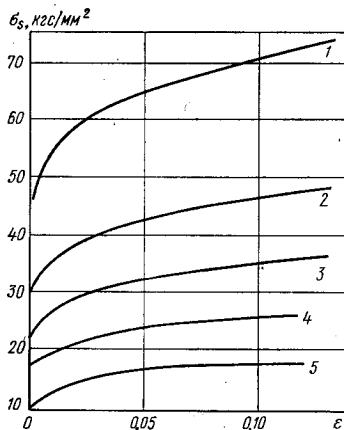


Рис. 5.116. Кривые упрочнения при растяжении циркония (99,7%) со скоростью деформации $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ при различных температурах (Ramani S. V., Mukhopadhyay P., Rodriguer P., Krishnan R.): 1 — $(-196)^{\circ}\text{C}$; 2 — $(-77)^{\circ}\text{C}$; 3 — -25°C ; 4 — 95°C ; 5 — 169°C

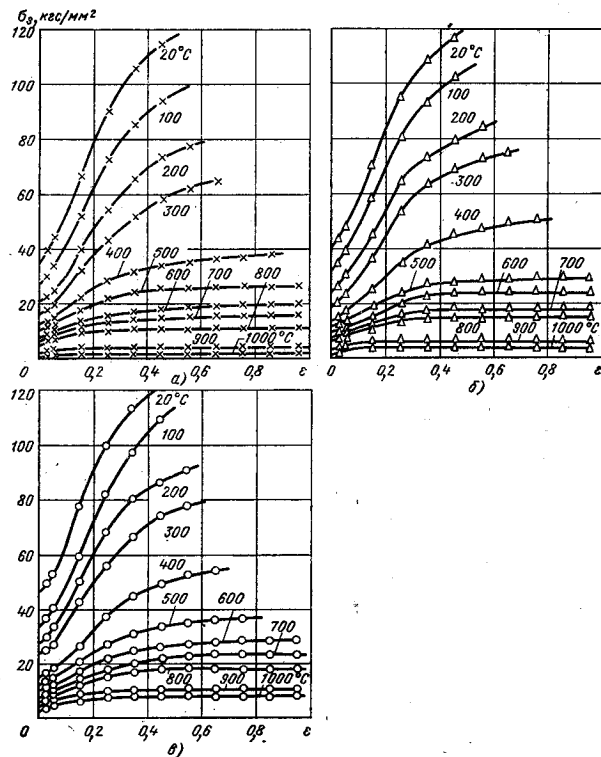


Рис. 5.117. Кривые упрочнения при сжатии отожженного циркония (99,3%) при скоростях деформации 0,25 (а), 2,0 (б) и 16 c^{-1} (в) при различных температурах (Bühler H., Wagener H. W.)

Рис. 5.118. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) циркония (99,3%) со скоростью деформации 16 с^{-1} после нормализации с различным режимом (Wagener H. W.):

1 — $d_a=0,025\text{ мм}$; 2 — $d_a=0,050\text{ мм}$; 3 — $d_a=0,090\text{ мм}$; 4 — $d_a=0,125\text{ мм}$

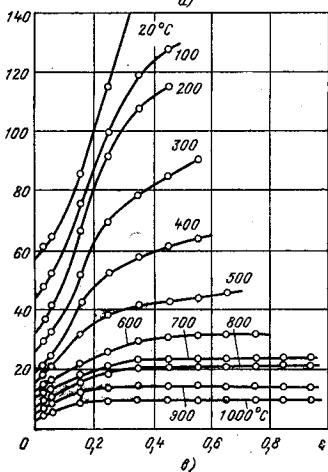
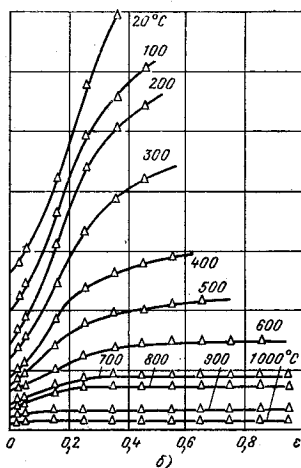
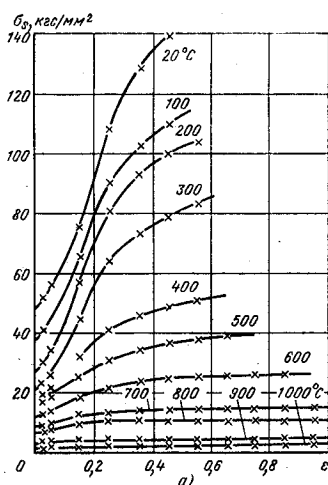
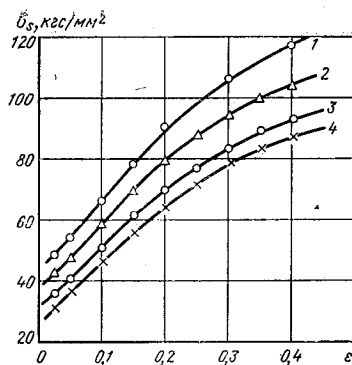


Рис. 5.119. Кривые упрочнения при сжатии отожженного сплава циркония циркалой-2 при скоростях деформации 0,25 (а), 2,0 (б) и 16 с^{-1} (в) при различных температурах (Bühler H., Wagener H. W.)

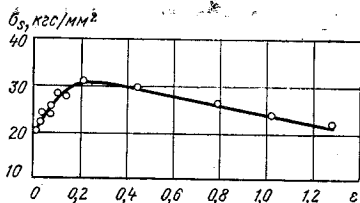


Рис. 5.120. Кривая упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженного цинка (по данным автора)

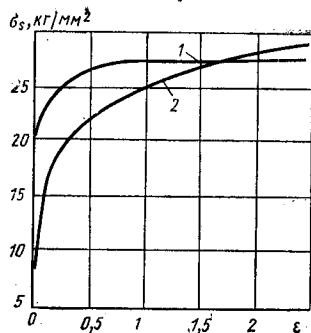


Рис. 5.121. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) отожженного цинка Zn99,9 (Lange K., Geiger M.):

1 — образец с продольным расположением волокон; 2 — образец с поперечным расположением волокон

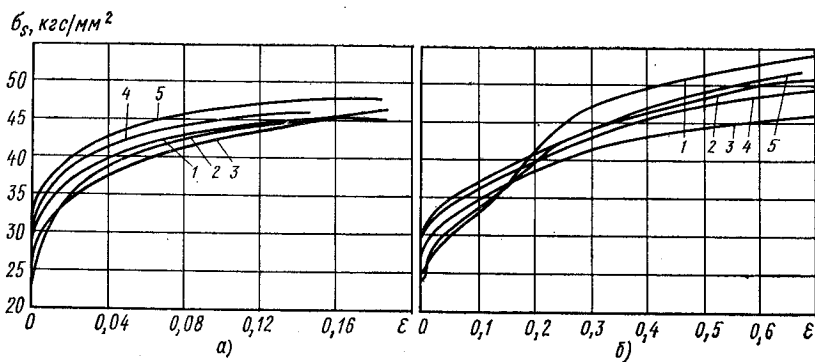


Рис. 5.122. Кривые упрочнения прессованного титана Ti 99,8 при растяжении (а) и сжатии (б) при $t=20^\circ\text{C}$ образцов, вырезанных под различным углом относительно оси прутка (Günter Schröder):

1 — 0° ; 2 — $22^\circ30'$; 3 — 45° ; 4 — $67^\circ30'$; 5 — 90°

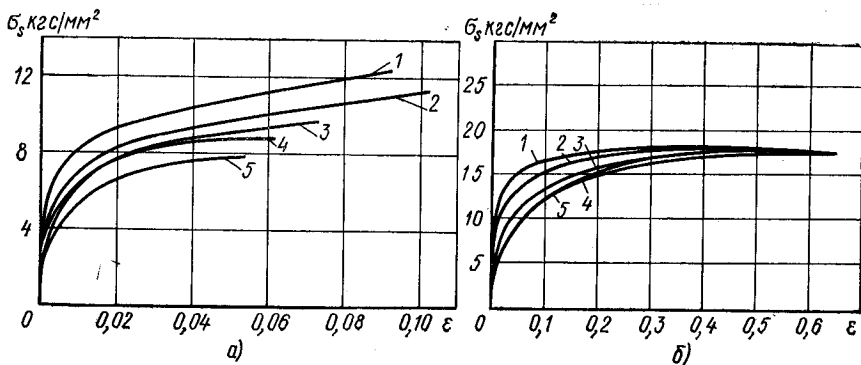


Рис. 5.123. Кривые упрочнения прессованного цинка Zn 99,995 при растяжении (а) и сжатии (б) при $t=20^\circ\text{C}$ образцов, вырезанных под различным углом относительно оси прутка (Günter Schröder):

1 — 0° ; 2 — $22^\circ30'$; 3 — 45° ; 4 — $67^\circ30'$; 5 — 90°

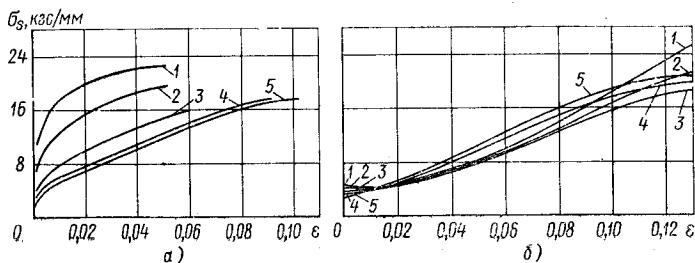


Рис. 5.124. Кривые упрочнения прессованного магнезита при растяжении (а) и сжатии (б) при $t = 20^\circ\text{C}$ образцов, вырезанных под различным углом относительно оси прутка (Günter Schröder):
 $\alpha = 0^\circ$; 2 - $22^\circ 30'$; 3 - 45° ; 4 - $67^\circ 30'$; 5 - 90°

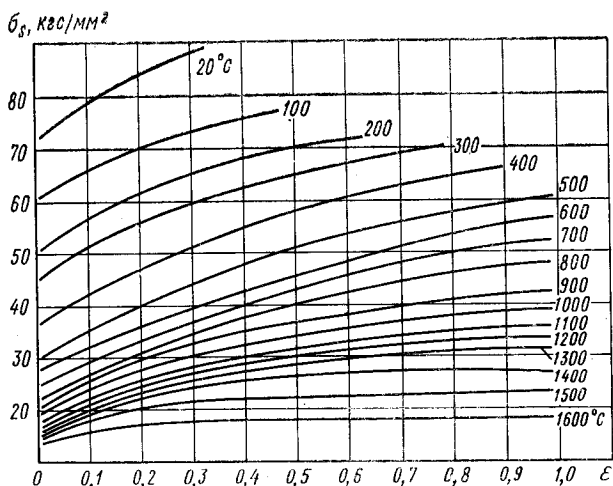


Рис. 5.125. Кривые упрочнения при сжатии отожженного молибдена Mc 99,95 со скоростью деформации $2,0 \text{ с}^{-1}$ при разных температурах (Bühler H., Wagener H.)

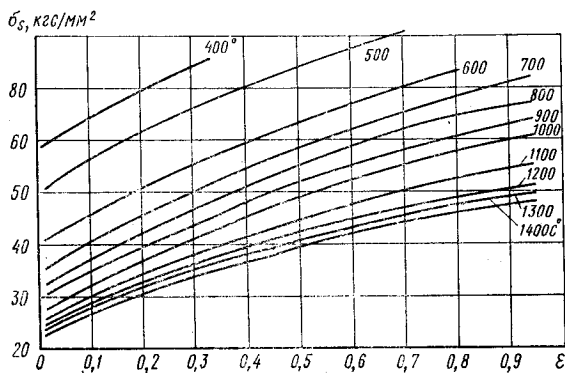


Рис. 5.126. Кривые упрочнения при сжатии отожженного вольфрама W 99,96 со скоростью деформации $2,0 \text{ с}^{-1}$ при разных температурах (Bühler H., Wagener H.)

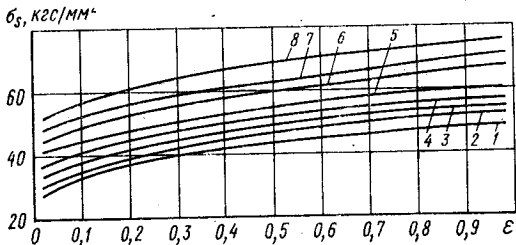


Рис. 5.127. Кривые упрочнения при сжатии ($t = 20^\circ\text{C}$) отожженного тантала (99,8%) с различными скоростями деформации (Bühler H., Wagener H.):

1 — $4 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; 2 — $3,2 \cdot 10^{-2}$ с⁻¹;
 3 — $2,5 \cdot 10^{-1}$ с⁻¹; 4 — 2,0 с⁻¹;
 5 — $1,6 \cdot 10$ с⁻¹; 6 — $1,25 \cdot 10^2$ с⁻¹;
 7 — $5 \cdot 10^2$ с⁻¹; 8 — 10^3 с⁻¹

Рис. 5.128. Кривые упрочнения при сжатии ($t = 20^\circ\text{C}$) отожженного ниобия (99,86%) с различными скоростями деформации (Bühler H., Wagener H.):

1 — $4 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; 2 — $3,2 \cdot 10^{-2}$ с⁻¹;
 3 — $2,5 \cdot 10^{-1}$ с⁻¹; 4 — 2,0 с⁻¹;
 5 — $1,6 \cdot 10$ с⁻¹; 6 — $1,25 \cdot 10^2$ с⁻¹;
 7 — $5 \cdot 10^2$ с⁻¹;
 8 — 10^3 с⁻¹

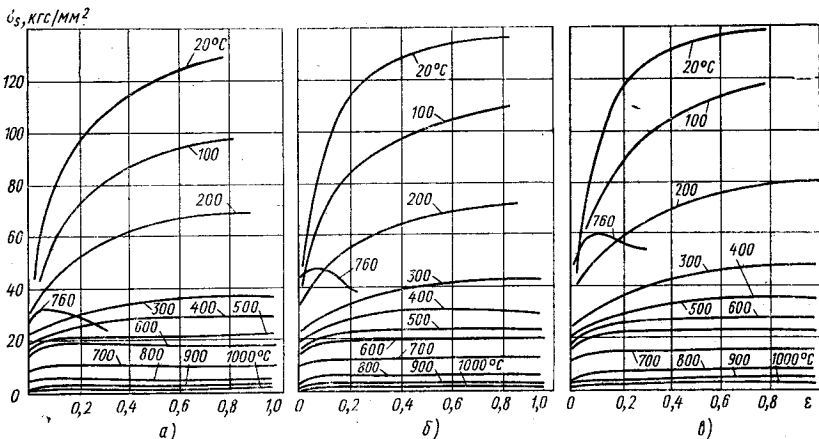
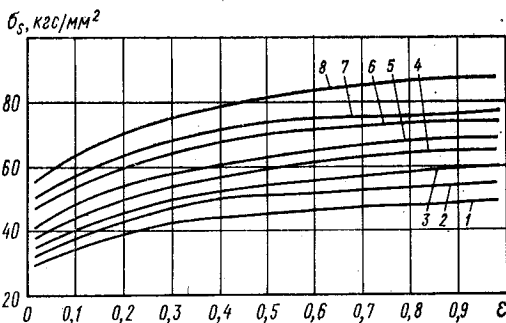


Рис. 5.129. Кривые упрочнения при сжатии отожженного урана со скоростями деформации 0,25 (а), 2,0 (б) и 16 с⁻¹ (в) при различных температурах (Bühler H., Wagener H.)

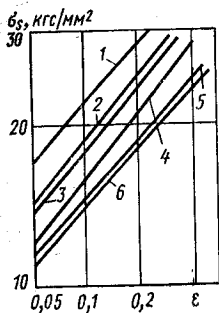


Рис. 5.130. Кривые упрочнения при сжатии серебра при различных температурах * (°C) и скоростях деформации ** (с⁻¹) (Соколов Л. Д., Соколов В. М., Шнейберг А. М., Скуднов В. А.):

1 — (-196)/10⁻¹; 2 — (-196)/4 · 10⁻³; 3 — (-90)/10⁻¹; 4 — (-90)/4 · 10⁻³; 5 — 25/10⁻¹; 6 — 25/4 · 10⁻³

* В подписи к рисунку даны в числителе
** В подписи к рисунку даны в знаменателе

Рис. 5.131. Кривые упрочнения при растяжении (Пресняков А. А., Соймин Н. Я., Аубакирова Р. К.):

а — закаленного от 375°C в воде эвтектоида Al-Zn при $\epsilon=1$ мм/мин при 275°C (1) и 300°C (2); б — литого свинца С2 при 315°C (1); 300°C (2) и литого технического чистого алюминия А-85 при 550°C (3) при $\epsilon=4$ мм/мин

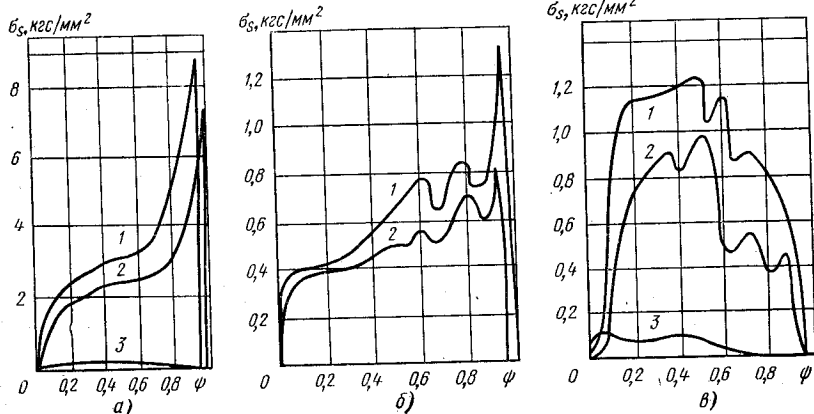
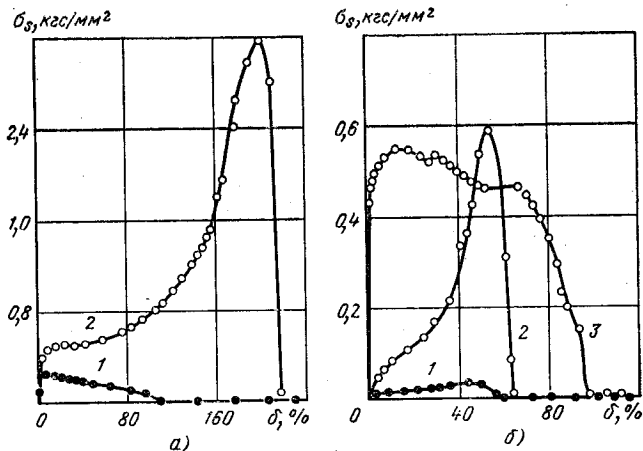


Рис. 5.132. Кривые упрочнения при растяжении свинца (Соймин Н. Я., Аубакирова Р. К., Пресняков А. А.):

а — после литья при 20° С со скоростью деформации 1 (1) и 4 мм/мин (2) и при 315° С со скоростью деформации 1 мм/мин (3); б — после литья при 200° С (1) и предварительного деформированного на 30% при 150° С (2) и скорости деформации 4 мм/мин; в — предварительно деформированного на 60% при 100° С (1) и 20° С (2) и на 30% при 315° С (3) и скорости деформации 4 мм/мин

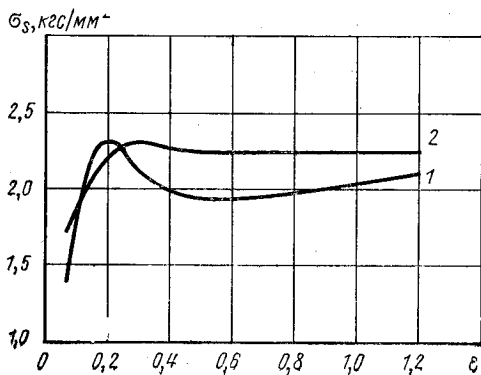


Рис. 5.133. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^\circ\text{C}$) свинца (Dahlheimer R., Caspar Erbsiöh J.): 1 — после прессования; 2 — после прессования и отжига

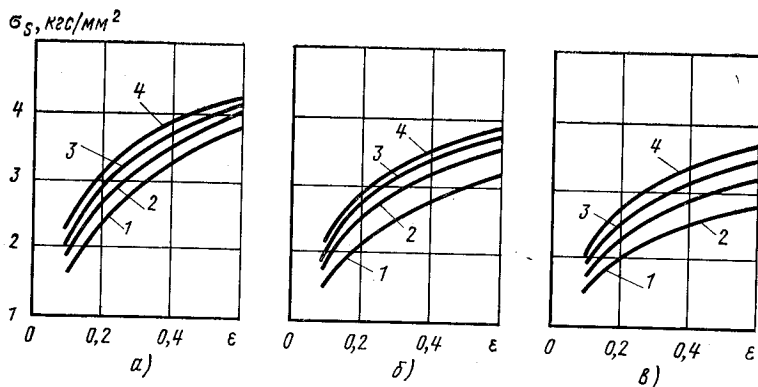
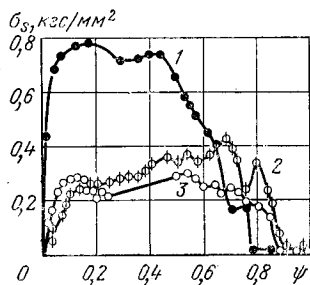


Рис. 5.134. Кривые упрочнения при сжатии свинца на пластометре при температурах 0 (а); 20 (б) и 40° С (в) со скоростями деформации 1 (1); 3 (2); 10 (3); 30 с^{-1} (4) (Сидя Сигэру)

Рис. 5.135. Кривые упрочнения при растяжении предварительно деформированных в холодном состоянии до $\epsilon=60\%$ олова при 125° С (1), свинца при 150° С (2) и алюминия при 625° С (3), со скоростью деформирования 4 мм/мин (Аубакирова Р. К., Соймин Н. Я., Пресняков А. А.)



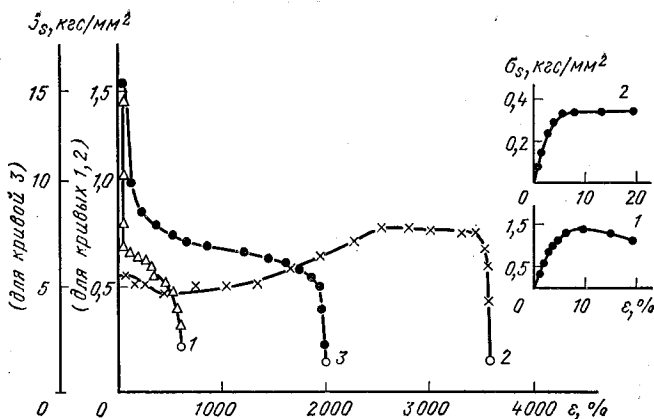


Рис. 5.136. Кривые упрочнения при кручении ($t=20^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=1\cdot 10^{-2}\text{c}^{-1}$) эвтектоидного сплава Zn—Al (20% Al и 80% Zn) (Аубакирова Р. К., Кузьмин С. Л., Лихачев В. А., Мышляев М. М., Пресняков А. А., Чалаев Д. Р.):

1 — в отожженном состоянии при 275°C и $\dot{\epsilon}=6,3\cdot 10^{-4}\text{c}^{-1}$; 2 — в закаленном и состаренном состоянии при 225°C и $\dot{\epsilon}=5\cdot 10^{-3}\text{c}^{-1}$; 3 — в закаленном и состаренном состоянии

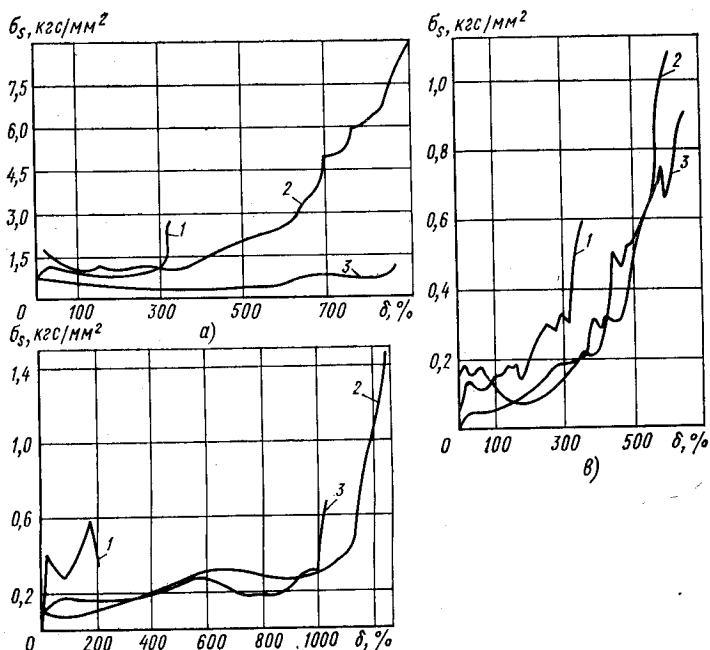


Рис. 5.137. Кривые упрочнения при растяжении сплава олово — свинец эвтектического состава, предварительно деформированного прессованием на 30 (1), 60 (2) и 80% (3) при температуре испытания 40 (а); 120 (б); 160°С (в) (Умурзаков Т. А., Карпенюк А. Н., Пресняков А. А., Жубаев А. Ж.)

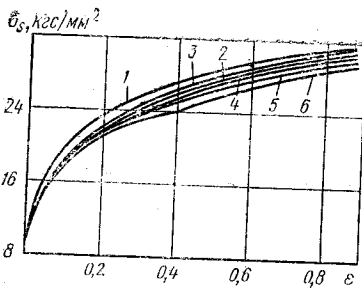


Рис. 5.138. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминиевого сплава AlMg3 после волочения со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):

1 — 0%; 2 — 1%; 3 — 3%; 4 — 5%;
5 — 7%; 6 — 20%

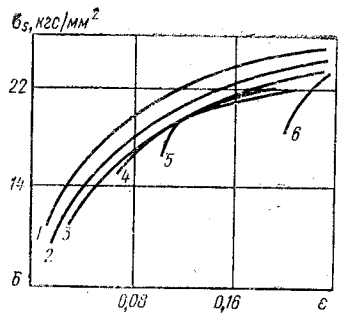


Рис. 5.139. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) алюминиевого сплава AlMg3 после осадки со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):

1 — 0%; 2 — 1%; 3 — 2,6%; 4 — 5,1%;
5 — 9,5%; 6 — 19,9%

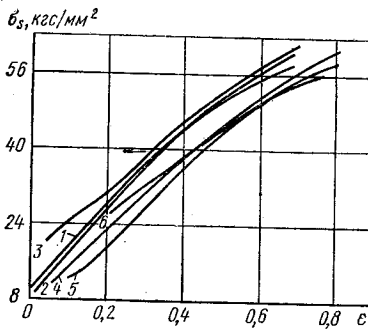


Рис. 5.140. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) латуни Ms63 после волочения со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):

1 — 0%; 2 — 1%; 3 — 3%; 4 — 5%;
5 — 12%; 6 — 21%

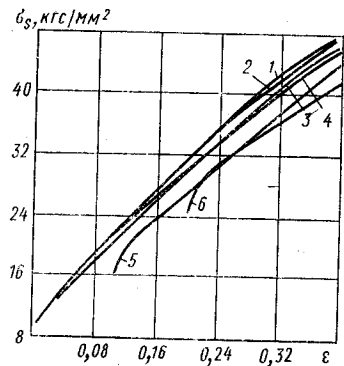


Рис. 5.141. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) латуни Ms63 после осадки со степенями деформации (Panknin W., Fritz H.):

1 — 0%; 2 — 1%; 3 — 2,5%; 4 — 5,5%;
5 — 10,3%; 6 — 19,5%

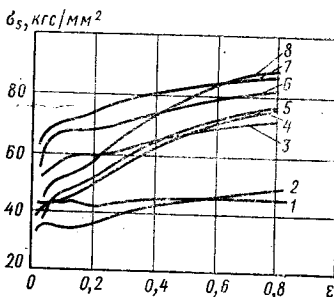


Рис. 5.142. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) волоченных бронз (Vater M., Stenger H.):

1 — SnBz1 ; 2 — SnBz2 ; 3 — SnBz6 ; 4 —
 SnBz8 (8% Sn); 5 — AlBz5 ; 6 — SiBz3 ;
7 — SnBz8 (9% Sn); 8 — AlBz9

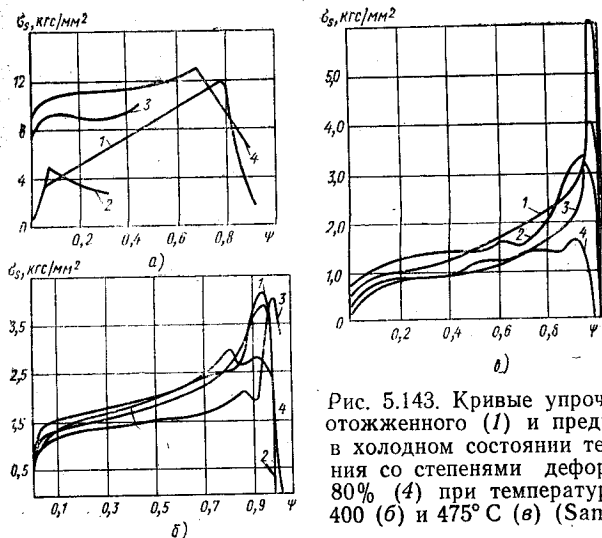


Рис. 5.143. Кривые упрочнения при растяжении отожженного (1) и предварительно прокатанного в холодном состоянии технически чистого алюминия со степенями деформации 30 (2), 60 (3) и 80% (4) при температурах испытания 200 (а), 400 (б) и 475° С (в) (Samanta S. K.)

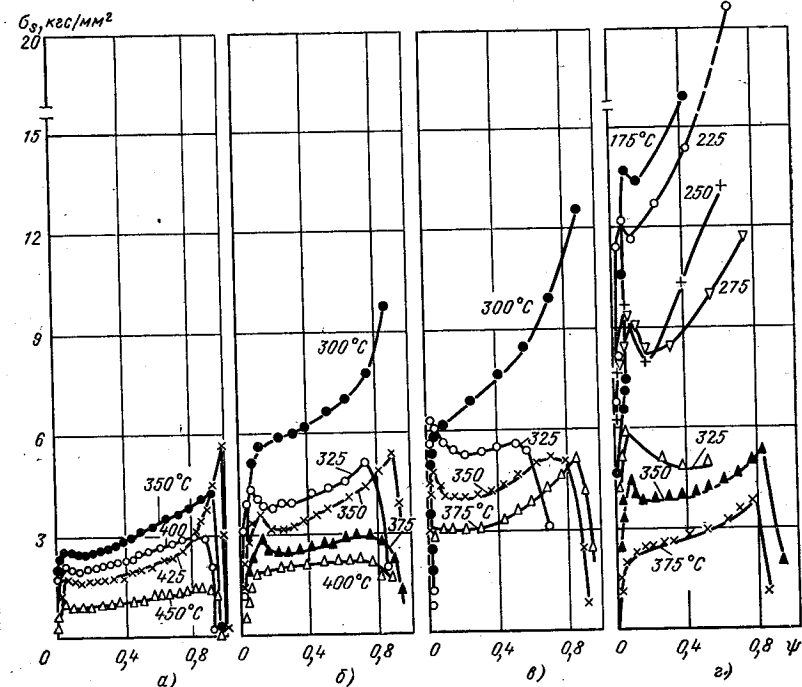


Рис. 5.144. Кривые упрочнения при растяжении ($\dot{\epsilon}=4$ мм/мин) алюминия (Al=99,7%) после закалки и прокатки в холодном состоянии со степенью деформации 13 (а), 30 (б), 60 (в) и 80% (г) при различных температурах испытания [18]

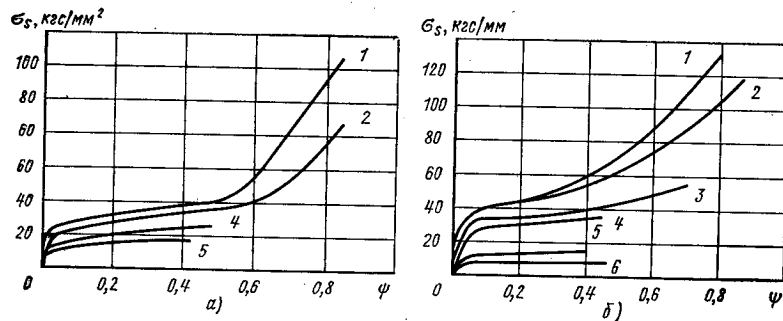


Рис. 5.145. Кривые упрочнения при растяжении прокатанной в холодном состоянии меди (99,99%) со степенью деформации 8 (а) и 25 (б) при различных температурах (Борисенко Н. Д., Соймин Н. Я., Пресняков А. А.):

1 — 20° С; 2 — 100° С; 3 — 200° С; 4 — 300° С; 5 — 400° С; 6 — 500° С

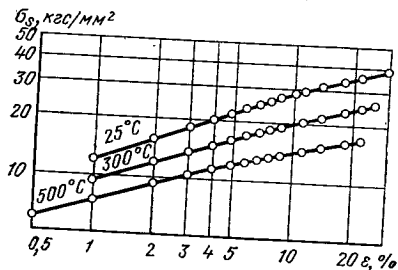


Рис. 5.147. Кривые упрочнения при растяжении листового технического чистого железа ($C=0,038\%$) со скоростью деформации $8,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при различных температурах (Roger Canon, Oleg D. Scherby)

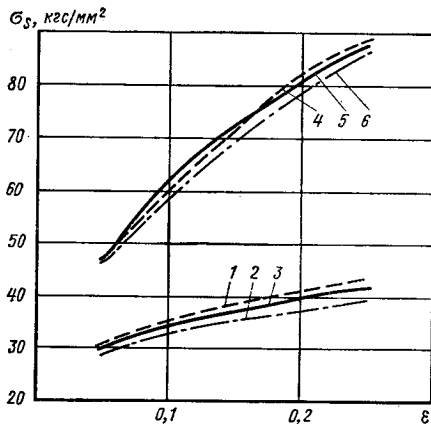


Рис. 5.148. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) листов в состоянии поставки из сталей 08kp (1, 2, 3) и 12X18H9T (4, 5, 6) [35]: 1, 4 — вдоль прокатки листа; 2, 5 — поперек прокатки; 3, 6 — теоретическая

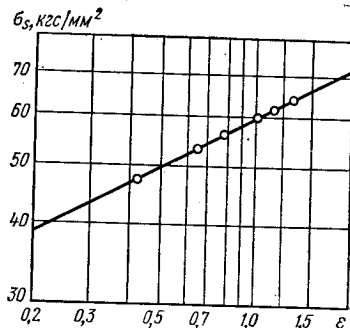


Рис. 5.146. Кривая упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) горячекатаного листового технического чистого железа $C=0,03\%$ (Reinhold L.)

Рис. 5.149. Кривые упрочнения при растяжении листовых материалов (Panknin W., Shawki S. A.):

1 — алюминия Al 99,5 (сорт А), 2 — алюминий Al 99,5 (сорт В); 3 — алюминиевый сплав AlMn; 4 — низкоуглеродистая сталь St VII ($C < 0,10\%$, $S = 0,995$ мм); 5 — низкоуглеродистая сталь St VIII ($C < 0,10\%$, $S = 0,489$ мм); 6 — низкоуглеродистая сталь St VI ($C = 0,06 \pm 0,07\%$, $S = 0,595$ мм); 7 — низкоуглеродистая сталь St (skin) ($C = 0,06 \pm 0,07\%$, $S = 0,947$ мм)

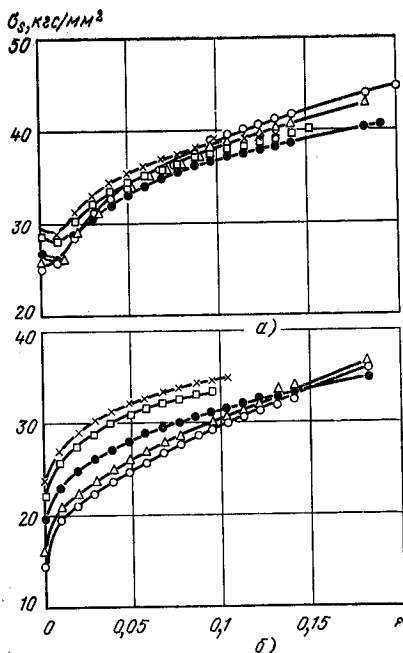
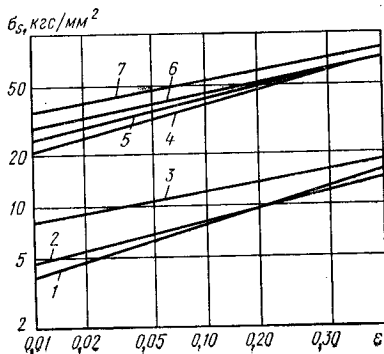


Рис. 5.150. Кривые упрочнения при растяжении ($t = 20^\circ \text{C}$) листов из α -Ti, вырезанных под различным углом относительно оси прутка (Tanale Tatsuhuki, Okubo Tadatsune, Gokyu Jsao):

а — $d_a = 19$ мкм; б — $d_a = 139$ мкм;
 ○ — 0° ; △ — $22,5^\circ$; ● — 45° ; □ — $67,5^\circ$;
 × — 90°

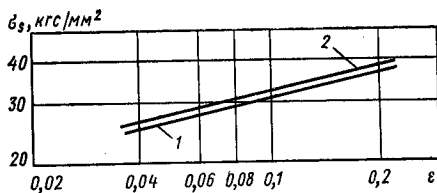


Рис. 5.151. Кривые упрочнения при растяжении ($t = 20^\circ \text{C}$) листовой спокойной низкоуглеродистой стали ($\sigma_v = 14$ кгс/мм²) (Heye W., Sattler H. P.): 1 — вдоль прокатки листа; 2 — поперек прокатки листа

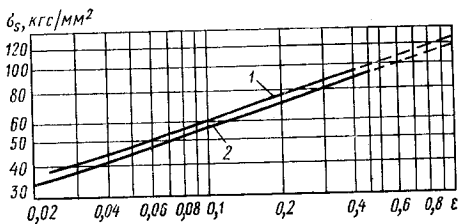


Рис. 5.152. Кривые упрочнения листовой стали 12X18H9T толщиной 0,25 мм при растяжении ($t = 20^\circ \text{C}$) [1]: 1 — одноосном; 2 — двухосном

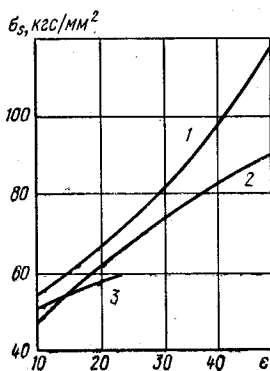


Рис. 5.153. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) тонколистовых материалов (Кюперс В., Шульц Д.):

1 — аустенитная сталь X5CrNi18.7; 2 — аустенитная сталь X5CrNi18.9; 3 — ферритная сталь X8Cr17

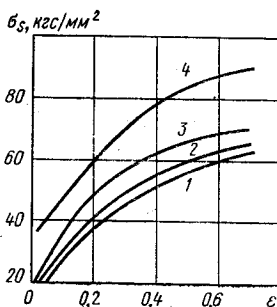


Рис. 5.154. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) листовых материалов (Panknin W., Galal S. A., Schawki):

1 — латунь Ms63, толщина листа $S=0,511$ мм, $d_a=51$ мкм; 2 — латунь Ms63, $S=0,508$ мм, $d_a=28$ мкм; 3 — сплав меди с латунью Ns6218 (Cu=62%; Ni=18%), $S=0,508$ мм, $d_a=27$ мкм; 4 — аустенитная сталь X12CrNi18.8, $S=0,505$ мм

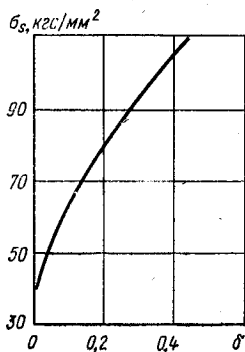


Рис. 5.155. Кривая упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) листа из стали 36ХНТЮ, $S=0,3$ мм (Богданова Ю. А.)

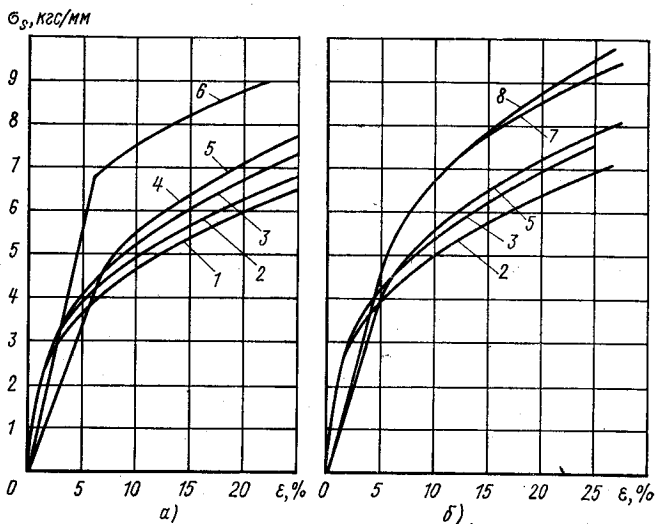


Рис. 5.156. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) листового алюминия Al 99.99 (Al=99,99%) со скоростью деформации $7 \cdot 10^{-5}$ (1); $7 \cdot 10^{-4}$ (2); $7 \cdot 10^{-3}$ (3); $2 \cdot 10^{-2}$ (4); $7 \cdot 10^{-2}$ (5); $7,8 \cdot 10$ (6); $8,4 \cdot 10$ (7); $9,1 \cdot 10$ с $^{-1}$ (8) (Hamel H.—J.):

а — вдоль прокатки листа; б — поперек прокатки листа

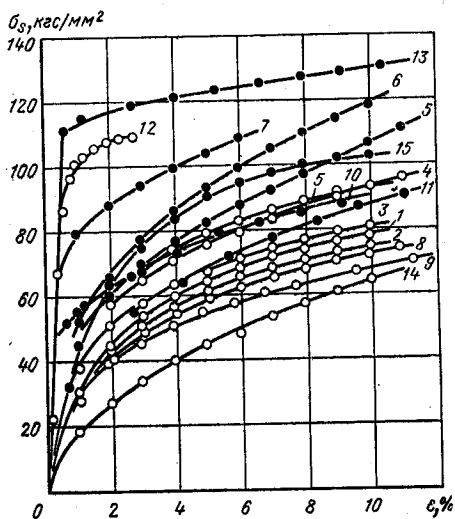


Рис. 5.157. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) листового алюминия различной чистоты при динамических (●) и статических (○) испытаниях с различной скоростью (с^{-1}) (Hamel H.—J.):

1 — $1 \cdot 10^{-4}$ (Al 99,39%); 2 — $1,5 \cdot 10^{-4}$ (Al 99,4%); 3 — $1,5 \cdot 10^{-2}$ (Al 99,4%); 4 — $3 \cdot 10^{-3}$ (Al 99%); 5 — $2,2 \cdot 10^2$ (Al 99,39%); 6 — $3 \cdot 10^2$ (Al 99,0%); 7 — $5 \cdot 10$ (Al 99,39%); 8 — $7 \cdot 10^{-4}$ (Al 99,3%); 9 — $7 \cdot 10^{-5}$ (Al 99,3%); 10 — $6,9 \cdot 10$ (Al 99,3%); 11 — $8,4 \cdot 10$ (Al 99,3%); 12 — $1,10^{-3}$ (Al 99,3%); 13 — $9,2 \cdot 10$ (Al 99,3%); 14 — $7 \cdot 10^{-4}$ (Al 99,5%); 15 — $5 \cdot 10^2$ (Al 99,3%)

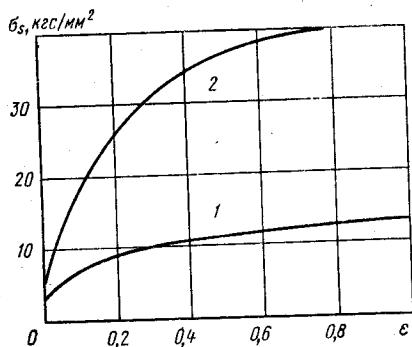
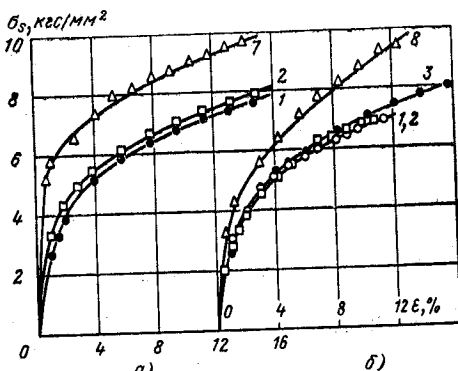


Рис. 5.159. Кривые упрочнения при сжатии ($t=20^{\circ}\text{C}$) листового материала (Левандовский В. Ф., Голубев Т. М.):

1 — алюминия с $S=1,63$ мм; 2 — меди с $S=1,57 \div 1,63$ мм



а) отожженный, вдоль прокатки листа;

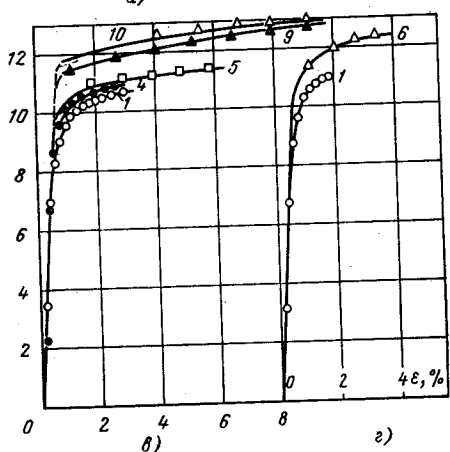


Рис. 5.158. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$ листового алюминия Al 99,3% (Al=99,3%) со скоростями деформации $7 \cdot 10^{-5}$ (1); $7 \cdot 10^{-4}$ (2); $7 \cdot 10^{-3}$ (3); $1 \cdot 10^{-3}$ (4); $2 \cdot 10^{-2}$ (5); $6,2 \cdot 10$ (6); $6,9 \cdot 10$ (7); $8,4 \cdot 10$ (8); $9,4 \cdot 10$ (9); $1,03 \cdot 10^2$ с^{-1} (10); (Hamel H.—J.):

а — отожженный, вдоль прокатки листа; б — отожженный, поперек прокатки листа; в — неотожженный вдоль прокатки листа; г — неотожженный поперек прокатки листа

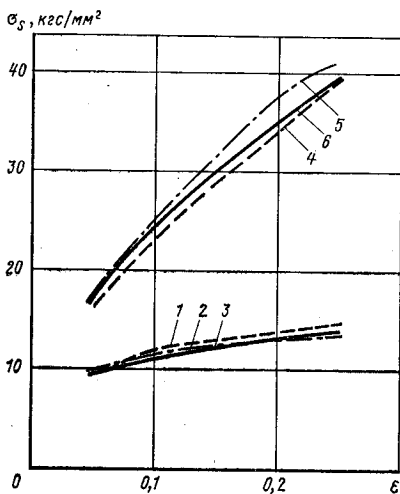


Рис. 5.160. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) листовых материалов в состоянии поставки из алюминиевого сплава АМцАМ (1, 2, 3) и латуни Л63 (4, 5, 6):

1 — вдоль прокатки листа; 2 — поперек прокатки листа; 3 — теоретическая [35]

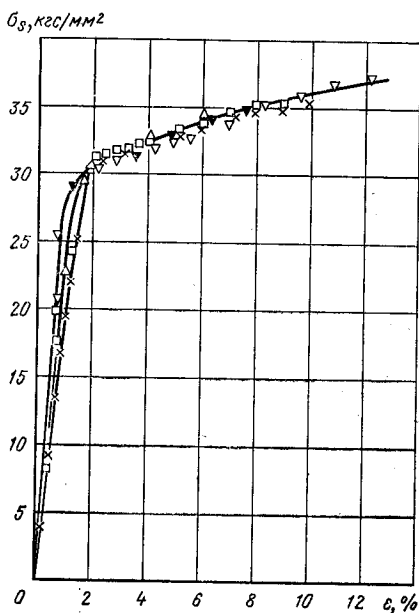


Рис. 5.161. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) холоднокатаного алюминиевого сплава АМцАМ с различной скоростью (Hamel H.—J.):
 \times — $7 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; \square — $1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; \triangle — $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$; ∇ — $9,5 \cdot 10 \text{ c}^{-1}$; \blacktriangledown — $9,6 \cdot 10 \text{ c}^{-1}$

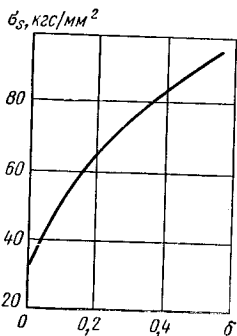


Рис. 5.162. Кривая упрочнения при растяжении ($t=20^\circ\text{C}$) листа толщиной 0,2 мм из сплава Н41ХТ (Богданова Ю. А.)

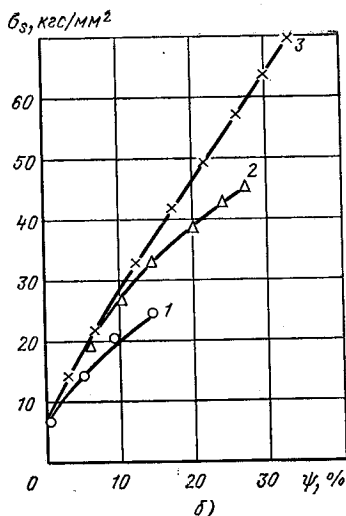
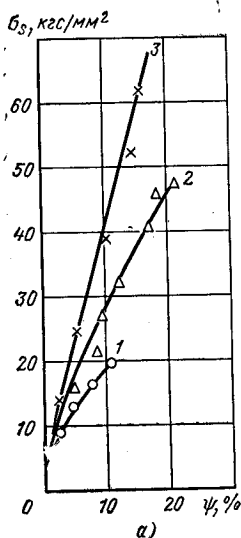


Рис. 5.163. Кривые упрочнения при растяжении горячекатаных материалов при температурах $+20^{\circ}\text{C}$ (а) и -150°C (б) (Томенко Ю. С., Навроцкий И. В., Долженков Ф. Е.):

1 — сталь Ст2кп; 2 — композиционный материал 1X18H10T + Ст2кп (по 50%); 3 — 12X18H10T

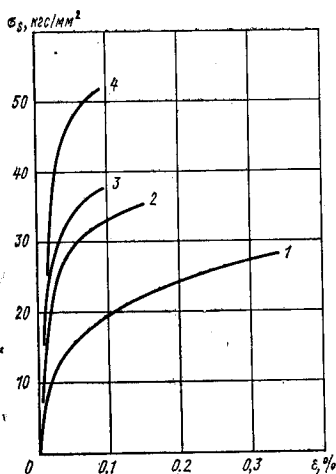


Рис. 5.164. Кривые упрочнения при растяжении ($t=20^{\circ}\text{C}$) со скоростью деформации $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ отожженных материалов:

1 — меди; 2 — композиционного материала $\text{Cu}+3\%$ (объемных) Al_2O_3 ; 3 — композиционного материала $\text{Cu}+5\%$ (объемных) Al_2O_3 ; 4 — композиционного материала $\text{Cu}+10\%$ (объемных) Al_2O_3 [21]

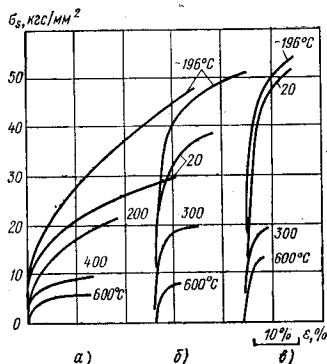


Рис. 5.165. Кривые упрочнения при растяжении отожженных композиционных материалов $\text{Cu}+3\%$ (объемных) Al_2O_3 (а), $\text{Cu}+5\%$ (объемных) Al_2O_3 (б), $\text{Cu}+10\%$ (объемных) Al_2O_3 (в) при различных температурах со скоростью деформации $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [21]

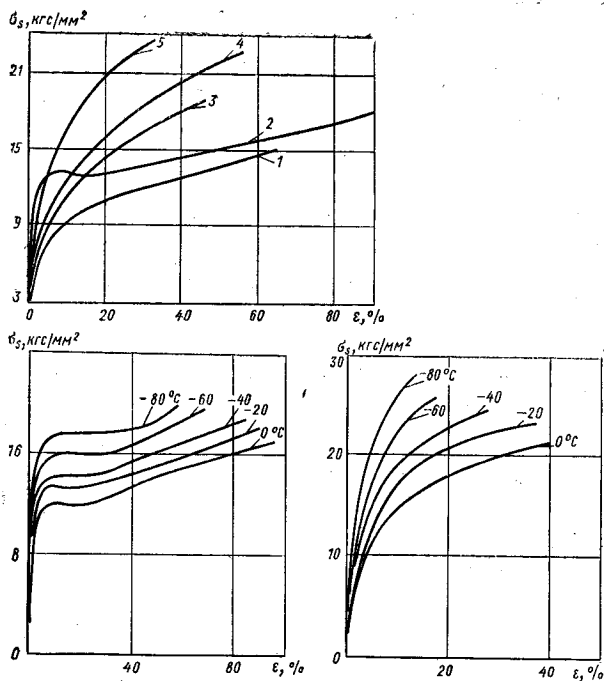


Рис. 5.166. Кривые упрочнения композиционных материалов (Уманский Э. С., Дебровский И. Е., Крючков В. В.):
 а — $t=20^\circ\text{C}$; 1 — носитель В; 2 — Ругал, 3 — РЕ-41у; 4 — РЕ-31; 5 — РЕ-41; б — Ругал при различных температурах; в — РЕ-41 при различных температурах

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкиев А. Ю. Оценка штампуемости тонколистовых металлов. — Труды МВТУ: Машины и технология обработки металлов давлением, М., Машиностроение, 1973, № 165, вып. 10, с. 238—249.

2. Влияние легирующих элементов на деформируемость стали. — Экспресс-информация. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства, 1975, № 9, М., ВИНТИ, с.7—18.

3. Влияние механических свойств листовых металлов на потерю устойчивости формы. — Экспресс-информация. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства, 1975, № 14, М., ВИНТИ, с.2—12.

4. Глаголев Н. И.; Акаро И. Л.; Норицына Г. И. Исследование механики процесса прессования с учетом температурно-скоростного фактора. — В кн.: Исследование и внедрение прогрессивной технологии штамповки. М., МАМИ, 1971, с.128—142.

5. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов, т. 2, М., Metallurgizdat, 1960. 416 с.

6. Гун Г. Я.; Галкин А. М.; Белевич А. М. Тепловой эффект при испытаниях на пластометре. — Известия вузов. Черная металлургия, 1970, № 1, с. 104—107.

7. Гусинский В. И. Исследование деформируемости малопластичных сплавов при холодной объемной штамповке с противодавлением. — Труды ЭНИК-МАШ: Оборудование и технология кузнечно-штамповочного производства. Теория, проектирование, исследование. М., НИИМАШ, 1975, с.269—275.

8. Дель Г. Д. Твердость деформируемого металла. — Известия АН СССР. Металлы, 1967, № 4, с.97—102.

9. Домальски Г. Г.; Шюкер Г. Деформируемость качественных сталей — Черные металлы, 1970, № 20, с. 22—31.

10. Исследование упрочнения в процессе усталости некоторых чистых металлов./Шегулов Д. И., Магидов М. Б., Мясников А. М. и др. — Известия АН СССР, Металлы, 1970, № 6, с.165—169.

11. Колмогоров Л. В. Напряжение. Деформация. Разрушение. Л., Металлургия, 1970, 229 с.

12. Кривые истинных напряжений титановых сплавов при различных температурах и скоростях деформации./Полухин П. И., Миронов О. С., Курбатов В. С. и др. — Технология легких сплавов, 1969, № 1, с.80—83.

13. Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной пластической деформации. М., Машиностроение, 1968, 131 с.

14. Кроха В. А. Экспериментальные кривые упрочнения. — В кн.: Холодная объемная штамповка. Справочник. М., Машиностроение, 1973, с.60—75.

15. Матвеев А. Д. Исследование местного прекращения деформации и изменения формы листовой заготовки в штамповочных операциях. — Автореферат на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М., МАМИ, 1971. *

16. Механические свойства редких металлов./Соколов Л. Д., Скуднов В. А., Соленов В. М. и др./М., Металлургия, 1972, 287 с.

17. Мещерин В. Т.; Ильин Л. Н. Влияние радиуса матрицы и зазора на качество наружной поверхности гнутых П-образных деталей. — Кузнечно-штамповочное производство, 1973, № 2, с.5—7.
18. Мофа Н. Н.; Пресняков А. А.; Аубакирова Р. К. Деформационное разупрочнение алюминия при растяжении — Физика металлов и металловедения, 1975, том 40, вып. 4, с.842—845.
19. Навроцкий Г. А.; Кроха В. А. Определение технологических усилий и работы деформации при штамповке деталей на одно- и многопозиционных автоматах. — В кн: Холодная объемная штамповка. Справочник. М., Машиностроение, 1973, с.295—310.
20. Навроцкий Г. А. Кузнечно-штамповочные автоматы. М., Машиностроение, 1965. 424 с.
21. Некоторые закономерности деформирования меди, содержащей включения Al_2O_3 /Денисенко Э. Т., Войницкий А. Г., Костенко А. Д. и др. — Проблемы прочности, 1970, № 11, с.54—57.
22. Нижник С. Б.; Черняк Н. И. Диаграммы деформирования и структура нержавеющей сталей переходного класса. — Проблемы прочности, 1974, № 4, с. 70—73.
23. Норицын И. А., Кислый П. Е. Определение механических характеристик стали при испытании на кручение. — Заводская лаборатория, 1960, № 8, с. 999—1006.
24. Овчинников А. Г., Грайфер А. Х. Влияние конфигурации формовочного перехода на устойчивость заготовок при высадке. — Кузнечно-штамповочное производство, 1974, № 12, с. 3—5.
25. Пахотин К. К.; Седоков Л. М. Расчет фактического сопротивления сдвигу по результатам испытания упрочняющихся материалов при кручении. — Известия Томского политехнического института, 1975, том 241, с. 23—27.
26. Северденко В. П.; Тюрин Л. Н.; Орлов А. Р. Теплая деформация среднеуглеродистых и нержавеющей сталей. — Кузнечно-штамповочное производство, 1970, № 9, с.11—14.
27. Смирнов-Аляев Г. А. — Механические основы пластической обработки металлов. Л., Машиностроение, 1968. 271 с.
28. Смирнов-Аляев Г. А.; Кроха В. А. О продольной устойчивости при осадке образцов с торцовыми цилиндрическими выточками, заполненными твердой смазкой. — Проблемы прочности, 1973, № 1, с.119—121.
29. Таловеров В. Н.; Мурасов А. Ш.; Наумчев Б. А. Сопротивление деформации инструментальных сталей в интервале температур 20—800° С. — В кн.: Выдавливание рельефных полостей технологической оснастки. Сборник материалов научно-технического семинара. Таллин, НИПТИ систем планирования и управления в электропромышленности ЭССР, 1972, с. 132—144.
30. Тытлянов А. Е.; Щеглов Б. А. Пластическое течение листового металла при определении штампуемости гидростатическим методом. — Кузнечно-штамповочное производство, 1968, № 5, с. 22—26.
31. Томленов А. Д. Элементы теории пластичности и расчеты течения металлов в процессе холодной штамповки. М., Машиностроение, 1974, 213 с.
32. Упрочнение тонкого листа из нержавеющей стали./Михель К. Х., Модек Х. М., Шмидт В. и др. — Черные металлы, 1976, 96, № 1, с.13—19.
33. Физические основы металловедения./Уманский Я. С., Финкельштейн Б. Н., Блантер М. Е. и др. — М., Металлургиздат, 1955, 721 с.
34. Шехтер В. Я. Теория кривых упругости. — В кн.: Холодная объемная штамповка. Справочник. М. Машиностроение, 1973, с.46—60.
35. Яковлев С. П.; Шевелев В. В.; Коротков В. А. К вопросу о кривых упругости анизотропных материалов. — В кн.: Технология машиностроения. Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула, Изд-во Тульского политехнического института, 1970, вып. 9, с.170—173.

36. **Bühler H., Hoptner H. G., Löwen J.** Die Formänderungsfestigkeit von Aluminium und einigen Aluminiumlegierungen. — Bänder — Bleche — Rohre, 1970, Bd. II, № 12, S. 645—649.

37. **Dean T. A.** Effect of billet temperature and deformation rate on loads in two forging operations. — Metallurgia and Metal Forming, 1975, vol. 42, № 1, p.4—8.

38. **Fritzsch G., Siegel R.** Kalt—und Warmfliesskurven von Baustählen. Karl—Marx—Stadt, ZIF, 1965, 155 S.

39. **Gentzsch Gerhard.** Kaltstauchen. Fliesspressen. Massivpragen. Düsseldorf, VDI—Verlag, GMBH, 1968, T.I, 243. S.

40. **Kleemola H. I.** Strain-hardening properties of 0—0,5C, and I, OCu—I, ONi — 0,5C Steels. — Journal Iron and Steel Institute, 1970, Vol. 208, № 11, p.1025—1028.

41. **Ludwigson D. C.** Modified Stress-Strain Relation for FCC Metals and Alloys. — Metallurgical Transactions, 1971, vol. 2, № 10, p.2825—2828.

42. **Ohtakara V., Makamura T., Sakui S.** Temperature and Strain Rate Dependences of Flow Stress in Metals and Alloys in Torsional Deformation — Transactions Iron and Steel Institute of Japan, 1972, Vol. 12, NI, p.36—44.

43. **Plehn H. J.** Berg und Huttenmannische Monatshefte, Wien, 1970, № 3, S.48—60.

44. **Pysz G.** Zum Einfluss des Spannungszustands auf die Kenngrößen des Zugversuchs. Zusammenhang zwischen Spannung und Formänderung. — Neue Hütte, 1973, T.II, № 10, S. 611—615.

45. **Schwandt S.** Das Formänderungsverhalten unlegierter und niedriglegierter Stähle bei der Massivumformung. — Draht—Welt, 1970, Vol. 56, № 10, S. 574—581.

46. **Vater M., Lienbart A.** Überblick über die allgemeinen Grundlagen der bildsamen Formgebung. — Bänder—Bleche — Rohre, 1971, Vol. 12, № 6, S.252—260.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Условные обозначения и пояснения | 3 |
| Введение | 5 |
| 1. Применение кривых упрочнения в теории и практике обработки металлов давлением | 8 |
| 1.1. Определение предельной пластичности и штампуемости металлов | 8 |
| 1.2. Определение продольной устойчивости заготовок в процессе пластической деформации | 11 |
| 1.3. Определение энергосиловых параметров технологических процессов | 13 |
| 1.4. Расчет изменения температуры в процессе пластической деформации | 14 |
| 1.5. Определение напряженно-деформированного состояния металла | 14 |
| 1.6. Определение эксплуатационных свойств деталей | 15 |
| 1.7. Исследование внутренних изменений строения металлов и сплавов | 15 |
| 2. Показатель деформационного упрочнения | 17 |
| 2.1. Методы определения показателя деформационного упрочнения n | 17 |
| 2.2. Влияние различных факторов на величину n прутковых материалов | 18 |
| 2.3. Влияние различных факторов на величину n листовых материалов | 37 |
| 2.4. Зависимость показателя n от класса сталей и типа кристаллической решетки | 42 |
| 3. Связь напряжения течения с механическими свойствами и химическим составом сплавов | 44 |
| 3.1. Связь напряжения течения с химическим составом | 44 |
| 3.2. Связь напряжения течения с механическими свойствами | 46 |

| | |
|---|-----|
| 4. Рекомендации по использованию кривых упрочнения в инженерной практике и примеры расчетов | 54 |
| 4.1. Рекомендации по практическому применению кривых упрочнения | 54 |
| 4.2. Расчет предельного отношения высоты к диаметру | 56 |
| 4.3. Расчет усилий деформирования | 57 |
| 5. Экспериментальные кривые упрочнения сталей, цветных металлов и сплавов | 59 |
| Список литературы | 153 |

ИБ № 1251

Валентина Андреевна Кроха

**УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ
ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

Редактор Т. Д. Онегина

Художественный редактор С. С. Водчиц

Технический редактор А. Ф. Уварова

Корректоры И. М. Борейша

и В. А. Воробьева

Обложка художника А. Я. Михайлова

Сдано в набор 18.07.79. Подписано
в печать 06.06.80. Формат 60×90¹/₁₆.

Бумага типографская № 2.

Гарнитура литературная.

Печать высокая. Усл. печ. л. 10.

Уч.-изд. л. 10,25. Тираж 11 700 экз.

Заказ 1261. Цена 50 к.

Издательство «Машиностроение»,
107076, Москва Б-96, Стромынский пер., 4

Московская типография № 4

Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии

и книжной торговли

129041, Москва, Б. Переяславская, 46