

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Технология машиностроения»

**А. А. Пучков, М. П. Кульгейко, В. М. Быстренков**

# **ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ПОСОБИЕ**

**для студентов специальности 1-36 01 01  
«Технология машиностроения»**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2008**

УДК 669.01(075.8)  
ББК 34.651я73  
П90

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 29.05.2006 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Металлорежущие станки и инструменты» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *М. И. Михайлов*

**Пучков, А. А.**  
П90 Основы материаловедения и термообработки конструкционных материалов : пособие для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» / А. А. Пучков, М. П. Кульгейко, В. М. Быстренков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 84 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-712-4.

Рассмотрены физические основы строения и свойств конструкционных материалов, приведены широко используемые методы определения механических свойств материалов при различных видах нагружения. Изложены основы термической обработки и поверхностного упрочнения деталей, даны характеристики основных групп конструкционных материалов и области их применения.

Для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения».

УДК 669.01(075.8)  
ББК 34.651я73

ISBN 978-985-420-712-4

© Пучков А. А., Кульгейко М. П.,  
Быстренков В. М., 2008  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение относится к числу основополагающих дисциплин для машиностроительных специальностей. Это связано с тем, что получение, разработка новых материалов, способы их обработки являются основой современного производства и во многом определяются уровнем своего развития научно-технический и экономический потенциал страны. Проектирование рациональных, конкурентоспособных изделий, организация их производства невозможны без достаточного уровня знаний в области материаловедения.

Материаловедение является основой для изучения многих специальных дисциплин.

Разнообразие свойств материалов является главным фактором, предопределяющим их широкое применение в технике. Материалы обладают отличающимися друг от друга свойствами, причем каждое зависит от особенностей внутреннего строения материала. В связи с этим материаловедение как наука занимается изучением строения материала в тесной связи с их свойствами. Основные свойства материалов можно подразделить на физические, механические, технологические и эксплуатационные.

От физических и механических свойств зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов.

Среди механических свойств прочность занимает особое место, так как прежде всего от нее зависит неразрушаемость изделий под воздействием эксплуатационных нагрузок. Учение о прочности и разрушении является одной из важнейших составных частей материаловедения. Оно является теоретической основой для выбора подходящих конструкционных материалов для деталей различного целевого назначения и поиска рациональных способов формирования в них требуемых прочностных свойств для обеспечения надежности и долговечности изделий.

Основными материалами, используемыми в машиностроении, являются и еще долго будут оставаться металлы и их сплавы. Поэтому основной частью материаловедения является металловедение, в развитии которого ведущую роль сыграли ученые: П. П. Аносов, Д. К. Чернов, Н. С. Курнаков, А. П. Гуляев и др.

# 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

## 1.1. Свойства металлов и сплавов и их строение

Металлами называются непрозрачные кристаллические вещества, обладающие специфическим блеском, высокими теплопроводностью и электропроводимостью, способностью испускать электроны при нагревании, ковкостью, способностью упрочняться при пластической деформации и другими характерными свойствами. Металлы делятся на черные и цветные. Металлы отличаются плотностью, температурой плавления, тепло- и электропроводностью и т. д.

Металлы и их сплавы характеризуются свойствами, которые принято разделять на *физические* (плотность, температура плавления, теплоемкость, электропроводность, коэффициент линейного расширения, магнитные свойства); *механические* (прочность, твердость, ударная вязкость, сопротивление усталости), определяющие работоспособность металлов; *технологические* (ковкость, жидкотекучесть, свариваемость, обрабатываемость), характеризующие способность металла и сплавов к различным методам горячей и холодной обработки; *химические* (коррозионная стойкость, жаропрочность, жаростойкость), определяющие стойкость металла в агрессивных средах при нормальных и повышенных температурах.

Все перечисленные свойства зависят от природы металла и его внутреннего строения. В твердом состоянии металлов их атомы располагаются в пространстве в определенном порядке, образуя правильные геометрические фигуры – пространственные кристаллические решетки. Связь атомов в кристаллической решетке носит сложный характер и осуществляется главным образом за счет сил притяжения между ионами и свободными электронами, которые обычно называются электронами проводимости или коллективизированными электронами.

Кристаллическая решетка, образованная наименьшим количеством атомов (ионов) данного металла, называется элементарной кристаллической ячейкой. Кристаллические решетки разных веществ различаются по форме и размерам элементарных ячеек. Наиболее распространенными типами их являются: объемно-центрированная кубическая (Fe при низкой температуре, вольфрам, Cr и другие металлы); гранецентрированная кубическая (Fe при высокой температуре, Al, Cu, Ni, свинец и др.); гексагональная (6 граней) (Zn, кадмий, Mg, Ti и др.).

В действительности атомы (ионы) находятся в непрерывном колебательном движении около точек равновесия и только для их средних положений сохраняется тот порядок, который приписывается кристаллической решетке.

Параметры решеток находятся при помощи рентгеновского анализа. Расстояния между атомами в кристаллической решетке, измеренные в разных направлениях, а также плотность расположения атомов в разных плоскостях не одинаковы (анизотропия). Аморфные вещества (стекло, пластмасса) изотропны из-за хаотичного расположения атомов в пространстве.

Реальные металлы являются поликристаллическими, что видно на изломе детали, где зерна разной крупности по-разному ориентированы к поверхностям деталей и излома. Частицы, видимые в изломе, и есть монокристаллы, которые в поликристаллических веществах называются кристаллитами или зернами. Вследствие различной ориентировки кристаллов поликристаллические материалы отличаются небольшой анизотропностью. Величина анизотропности изменяется соответствующей механической, термической обработкой или направленной кристаллизацией в поликристаллическом металле, что создает в нужном направлении повышение прочности, магнитных или электрических свойств металла.

## **1.2. Процесс кристаллизации и аллотропия (полиморфизм) металлов**

Металлы и сплавы при переходе из жидкого в твердое состояние приобретают кристаллическую структуру – первичная кристаллизация, которая зависит в первую очередь от скорости охлаждения, давления, наличия примесей в металле (*Д. К. Чернов*). Кристаллизация включает два процесса, протекающих одновременно: зарождение центров кристаллизации (зародышей) и рост кристаллов из этих зародышей. Местом зарождения таких центров служат частицы посторонних примесей, произвольные неоднородные скопления атомов или стенки формы либо специальные добавки – модификаторы, которые позволяют получать мелкозернистую структуру металла, которая повышает прочность, пластичность и обрабатываемость металла.

Для успешного протекания процесса кристаллизации необходимо расплав переохладить несколько ниже ( $\Delta t$ ) теоретической температуры плавления-затвердевания (равновесной  $t$  °С).

Процесс кристаллизации изучают микроскопическим, рентгеновским и термическим методами. При очень медленном охлаждении расплава чистого металла при определенных температурах происходит скачкообразное изменение его свойств (рис. 1.1).

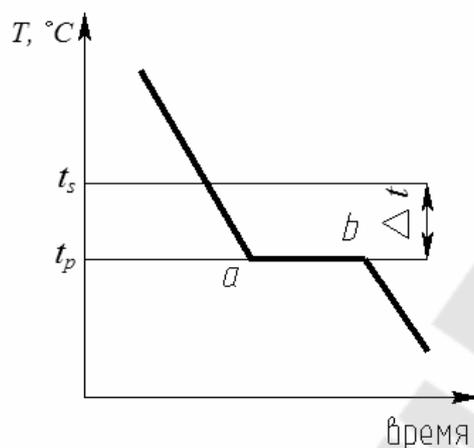


Рис. 1.1. Графическое изображение действительного процесса кристаллизации чистого металла (термический способ)

В действительности процесс кристаллизации начинается только при переохлаждении расплава ( $t_p$ ), а не при температуре плавления-затвердевания ( $t_s$ ). При этом разность температур —  $\Delta t$  называется степенью переохлаждения. Точки  $a$  и  $b$  — критические точки, соответствующие началу и концу процесса кристаллизации. Чем выше скорость охлаждения расплава, тем выше степень его переохлаждения. Горизонтальный участок  $a-b$  объясняется тем, что выделяющаяся скрытая теплота кристаллизации компенсирует отвод теплоты от расплава к охлаждающей среде.

При изменении температуры (ниже точки  $b$ ) тип кристаллической решетки и ее параметры для некоторых металлов могут изменяться — аллотропия или полиморфизм. Для отличия аллотропных форм (модификаций) к химическому символу элемента добавляется буква —  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т. д., при этом буквой  $\alpha$  обозначается самая низкотемпературная модификация данного металла,  $\beta$  — более высокотемпературная модификация и т. д., например  $\alpha - Ni$ , или  $Ni\alpha$ .

Аллотропическое превращение (перекристаллизация, подчиняется тем же законам, что и первичная кристаллизация) в твердом состоянии металла совершается путем перегруппировки атомов пространственной решетки на базе зародышей новой формы и носит название вторичной кристаллизации. На кривых охлаждения-нагрева вторичная кристал-

лизация отмечается горизонтальными участками, а соответствующая температура (критическая) называется температурой полиморфного превращения. Полиморфизм металлов и сплавов широко используется для изменения их свойств путем термообработки. Особенно большое значение имеет полиморфизм железа и сплавов на его основе. Железо имеет три аллотропические формы:  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  (рис. 1.2). В 1-й критической точке (первичная кристаллизация) железо затвердевает в виде объемно-центрированных кубических (ОЦК) кристаллов  $Fe\delta$  с параметрами решетки  $2,93 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ см} = 0,1 \text{ \AA}$ ). Во 2-й и 3-й критических точках происходит вторичная кристаллизация (в твердом состоянии) с изменением аллотропических форм железа и их кристаллических решеток. Раньше считали, что при температурах  $910\text{--}768 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $Fe\beta$ . Однако в точке *Кюри* (4-я критическая точка) изменяются только магнитные свойства железа и несколько параметр решетки.

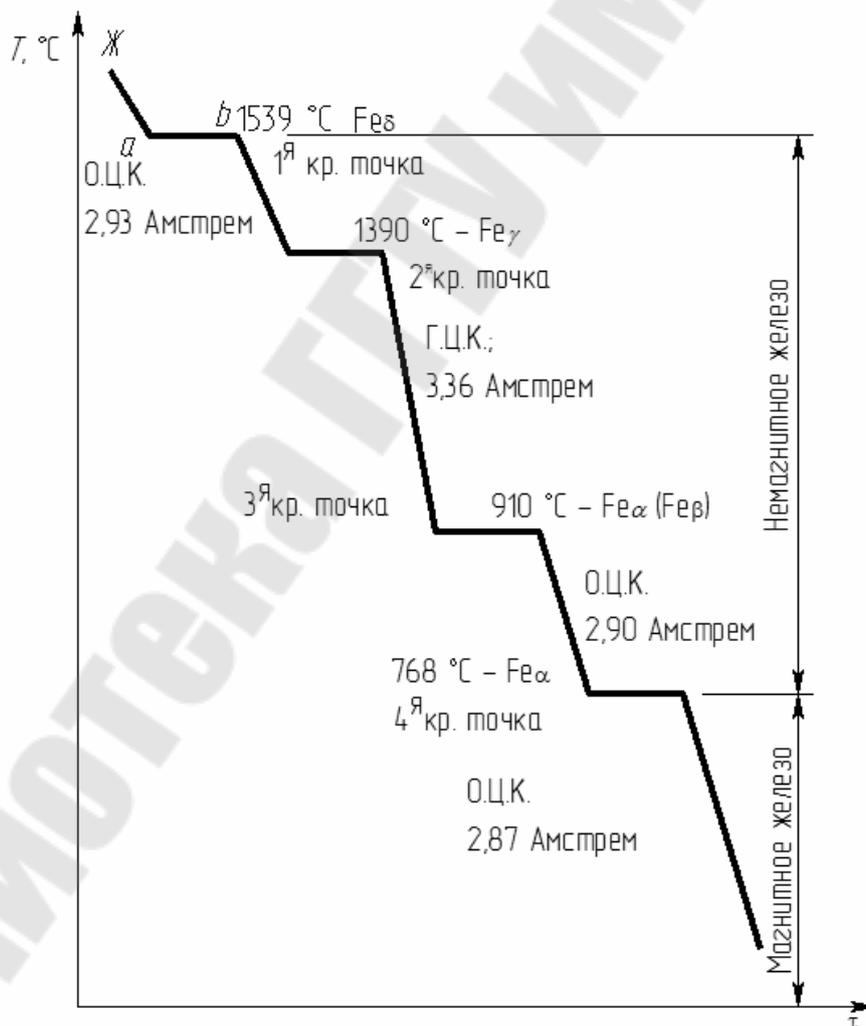


Рис. 1.2. Кривая охлаждения расплава чистого железа (более 99,85 % Fe)

### 1.3. Основы пластичности и прочности металлов

Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость. В любом состоянии материал (металл) подвержен определенным деформациям. При этом деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникнуть при действии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т. д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других физико-химических процессов, протекающих в металле, связанных с изменением объема.

Металл, находящийся в напряженном состоянии, при любом виде нагружения всегда испытывает нормальные ( $S_0$ ) и касательные ( $\tau$ ) напряжения (рис. 1.3).

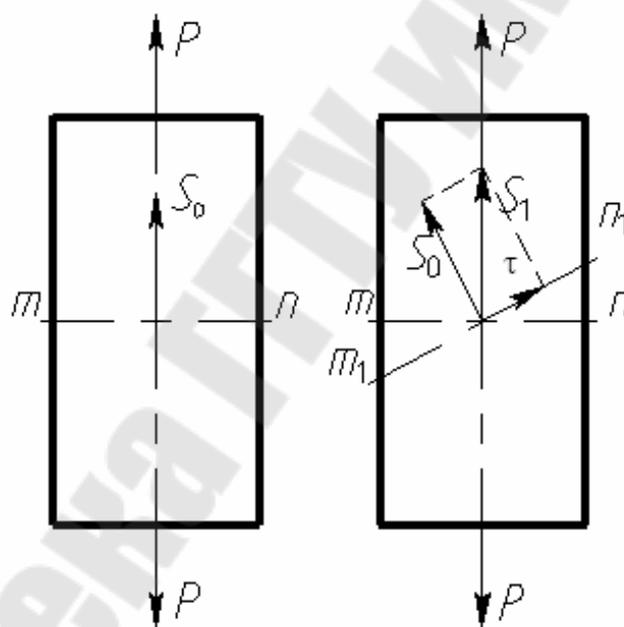


Рис. 1.3. Схема действия напряжения

Деформация металла под действием напряжения может быть *упругой* (только  $S_0$ ) и *пластической* или *остаточной* (только  $\tau$ ). При этом *упругой* называется деформация, полностью исчезающая после прекращения действия (снятия) вызвавших ее напряжений. Если же нормальное напряжение превысит силы взаимного притяжения атомов (сил межатомной связи), то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва.

Пластической или остаточной называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений ( $\tau$ ). При небольших  $\tau$  атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении  $\tau$  наблюдается смещение атомов на параметр решетки, т. е. происходит пластическая деформация. После снятия  $\tau$  в теле наблюдается остаточное изменение формы и размеров, причем сплошность тела не нарушается. В результате развития пластической деформации может произойти пластичное (вязкое) разрушение путем сдвига.

Прочность – способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушению. Большинство технических характеристик прочности определяют в результате статического испытания на растяжение. Для этого стандартный образец, закрепленный в захватах разрывной машины, деформируется при статической, плавно возрастающей нагрузке – автоматически записывается диаграмма растяжения, выражающая зависимость между нагрузкой и деформацией. Например, для низкоуглеродистой отожженной стали диаграмма растяжения имеет следующий вид (рис. 1.4, а):

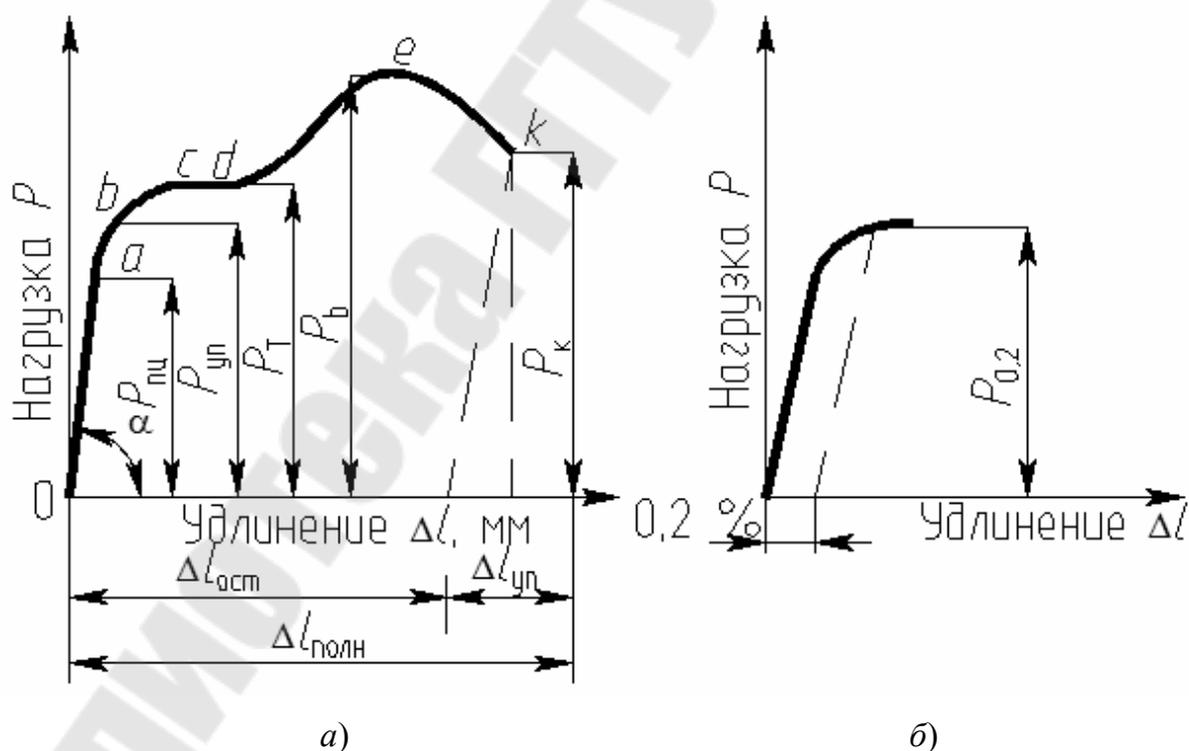


Рис. 1.4. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали (а) и схема определения условного предела текучести  $\sigma_{0.2}$  (б)

На участке  $o-a$  деформация пропорциональна нагрузке или действующему напряжению  $\sigma = \frac{P}{F_0}$ , где  $P$  – приложенная нагрузка;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца. Нагрузке в точке  $a$  соответствует предел пропорциональности:  $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}$ .

Прямолинейную зависимость между напряжением и деформацией можно выразить законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$  – относительная деформация;  $\Delta l$  – абсолютное удлинение, мм;  $l_0$  – начальная длина образца, мм;  $E$  – коэффициент пропорциональности (графически равный  $\text{tg } \alpha$ ), характеризующий упругие свойства материала, называется модулем нормальной упругости или модулем жесткости. Для различных углеродистых и легированных сталей после любой обработки  $E = 210$  МПа.

Теоретический предел упругости – максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию –  $\sigma_{\text{уп}} = \frac{P_{\text{уп}}}{F_0}$ .

*Предел текучести* – физический и условный – характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям. Физический предел текучести соответствует участку  $c-d$  диаграммы и определяется  $\sigma_{\text{T}} = \frac{P_{\text{T}}}{F_0}$  – наблюдается «течение» металла при постоянной нагрузке.

Большая часть технических металлов и сплавов не имеет площадки текучести. Для них наиболее часто определяют *условный предел текучести* – напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 % от начальной расчетной длины образца:  $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$  (рис. 1.4, б).

В точке  $b$ , где нагрузка достигает максимального значения, в наиболее слабом месте образца начинается образование «шейки» – сужение поперечного сечения. *Временное сопротивление разрыву* –

напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения:  $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$ .

*Истинное сопротивление разрушению* – максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца:  $S_K = \frac{P_K}{F_K}$ , где  $F_K$  – конечная площадь поперечного

сечения образца в месте разрушения ( $S_K \gg \sigma_B$ ).

Пластичность – способность тела (металла) к пластической деформации, т. е. способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности.

Это свойство используется при обработке металлов давлением. Характеристиками пластичности являются:

– относительное удлинение

$$\delta = \left[ \frac{(l_K - l_0)}{l_0} \right] \cdot 100 \% = \frac{l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100 \%,$$

где  $l_0$  и  $l_K$  – начальная и конечная длина образца;  $\Delta l_{\text{ост}}$  – абсолютное удлинение образца;

– относительное сужение

$$\psi = \left[ \frac{(F_0 - F_K)}{F_0} \right] \cdot 100 \%,$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца;  $F_K$  – конечная площадь поперечного сужения образца в шейке после разрыва.

У пластичных материалов относительное сужение более точно характеризует их максимальную пластичность – способность к местной деформации и нередко служит технологической характеристикой при листовой штамповке.

#### **1.4. Понятие твердости, вязкости, усталости, остаточных напряжений, наклепа, рекристаллизации и сверхпластичности**

*Твердость* материала – это сопротивление проникновению в его поверхность стандартного тела – наконечника (индентера), например шарика, конуса и т. п., не деформирующегося при испытании. Наибольшее распространение на практике получили методы Бринеля, Роквелла, Виккерса и метод микротвердости.

*Твердость по Бринелю* определяют статическим вдавливанием в испытываемую поверхность под нагрузкой  $P$  стального закаленного шарика ( $\varnothing$  10; 5; 2,5 мм в зависимости от толщины изделия). Число твердости НВ определяют отношением нагрузки  $P$  к сферической поверхности отпечатка – лунки (шарового сегмента) диаметром  $d$ . Продолжительность выдержки под нагрузкой для стали и чугуна составляет 10 с, а для латуни и бронзы – 30 с.

*Твердость по Роквеллу* определяют статическим вдавливанием в отшлифованную поверхность при определенном сочетании нагрузок  $P$  либо стального закаленного шарика  $D \approx 1,6$  мм (например, HRB 30), либо алмазного конуса (HRC 60 или HRA 80 – при меньшей нагрузке) – для закаленных сталей.

*Твердость по Виккерсу* – вдавливаются алмазная четырехгранная пирамида с углом  $\alpha = 136^\circ$  между противоположными гранями (обозначается HV) – для мягких, очень тонких и особо твердых металлов.

*Метод микротвердости* предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплавов (например, зерен феррита в стали), очень тонких поверхностных слоев (сотые доли мм). По существу метод микротвердости не отличается от метода Виккерса. Различие состоит лишь в том, что наконечник – четырехгранная пирамида – имеет меньшие размеры, и нагрузки при ее вдавливании составляют от 5 до 500 кгс.

*Вязкость* – способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации.

Основными типами разрушения металла является хрупкое и пластичное (или вязкое) разрушение.

*Хрупкое разрушение* происходит путем отрыва под действием нормальных растягивающих напряжений, когда они достигают значения сопротивления отрыву. До разрушения материал испытывает упругую деформацию, иногда небольшую пластическую.

*Пластичное (вязкое) разрушение* происходит путем среза под действием касательных напряжений, когда они достигают значения сопротивления срезу  $\tau$ . Для вязкого разрушения характерным является волокнистый излом, что связано с пластическим деформированием металла; плоскость излома расположена под углом.

Вязкость металлов и сплавов определяется их химическим составом, термообработкой и другими внутренними факторами и условиями, в которых находится металл при работе в изделии: температурой, скоростью нагружения, наличием концентраторов напряжений, надрезов и др.

*Хладноломкостью* называется склонность металла к переходу в хрупкое состояние при понижении температуры, что характеризуется порогом хладноломкости, за который в технике принимают температуру, при которой в изломе остается 50 % вязкой составляющей ( $T_{50}$ ).

Для реальных материалов очень важно знать  $T_{50}$ , т. к. она должна быть ниже температуры эксплуатации изделий не менее чем на 40 °С – т. е. должен быть температурный запас вязкости.

Для оценки вязкости материалов и установления их склонности к переходу из вязкого в хрупкое состояние наиболее часто проводят испытания стандартных надрезанных образцов на маятниковых копрах. Образец устанавливают на опорах копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на высоту  $H$ . После разрушения образца маятник поднимается на высоту  $h$  (чем выше вязкость материала, тем ниже  $h$ ), т. е. на разрушение образца затрачивается работа  $A = P \cdot (H - h)$ , где  $P$  – масса маятника, кг. Характеристикой вязкости является ударная вязкость

$$KCU \text{ (KCV или KCV)} = \frac{A}{F_0},$$

где  $F_0$  – площадь образца в месте надреза (U, V, Y – формы надрезов).

*Усталостью* металлов называется разрушение их под действием повторных или знакопеременных нагрузок, т. е. это процесс постепенного накопления повреждения металла под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению. Свойства металла сопротивляться усталости называется *выносливостью*. Предел выносливости (теоретический) – наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает материал без разрушения при бесконечно большом числе циклов нагружения ( $N = 10^7$  – для стали,  $N = 10^8$  – для цветных металлов).

*Остаточными* (собственными, внутренними) называют напряжения, которые остаются в теле после прекращения причин, их вызвавших, и уравнивающиеся внутри тела, без воздействия внешних сил. В зависимости от объемов тела, в пределах которых уравниваются остаточные напряжения, различают: 1) напряжения I рода – это напряжения, уравнивающиеся в объеме всего тела; 2) напряжения II рода – уравнивающиеся в пределах нескольких блоков зерен, одного или нескольких зерен; 3) напряжения III рода – уравнивающиеся в объеме нескольких элементарных ячеек кристаллической решетки. При этом напряжения II и III рода

дезориентированы и их можно определить рентгенографическим способом. Напряжения I рода являются ориентированными и в изделиях имеются зоны растягивающих и сжимающих напряжений.

*Наклепом* называется изменение свойств металла в результате холодной пластической деформации, которая начинается тогда, когда действующие напряжения превысят предел упругости. С увеличением степени пластической деформации повышается прочность и твердость, т. е. происходит упрочнение металла, но наряду с этим понижается пластичность и вязкость металла, т. е. происходит его охрупчивание. В результате пластического деформирования (наклепа) существенно изменяются также физические и химические свойства металла (например, повышается электросопротивление, растворимость в кислотах, но уменьшается теплопроводность).

При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит процесс рекристаллизации. *Рекристаллизацией* называется процесс образования и роста новых зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры.

Температура начала (порога) рекристаллизации металлов и сплавов связано с температурой плавления зависимостью  $T_{рек} = a \cdot T_{пл}$ , где  $T_{рек}$  и  $T_{пл}$  – температура начала рекристаллизации и плавления. Для технически чистых металлов  $a = 0,4$ , для металлов очень высокой чистоты  $a = 0,1-0,2$ ; для твердых растворов  $a = 0,5-0,8$ . Установлено также, что  $T_{рек}$  понижается с увеличением степени предварительной пластической деформации, зависит от размеров зерна до деформации и т. д. Рекристаллизация изменяет свойства металла в обратном направлении по сравнению с наклепом. Основными факторами, определяющими величину зерен металла при рекристаллизации, являются: температура, с повышением которой происходит укрупнение зерен; продолжительность выдержки при нагреве, с увеличением которого величина зерен также существенно вырастает; степень предварительной пластической деформации (при 3–15 % деформации – критическая степень – образуются наиболее крупные зерна при рекристаллизации).

Физической границей между *холодной* и *горячей* обработкой давлением является  $T_{рек}$ , ниже которой – холодная обработка (металл находится в состоянии наклепа), а выше которой – горячая обработка, при которой процессы рекристаллизации успевают пройти полностью.

*Сверхпластичность* – способность металлов и сплавов равномерно удлиняться на сотни и тысячи процентов ( $\delta = 2500\%$  и более). Она обнаруживается у многих металлов и сплавов при определенных

условиях: 1) при наличии ультрамелкозернистой структуры с размерами зерен  $\Delta = 1\text{--}2$  мкм (у технических металлов и сплавов создается специальной обработкой); 2) когда температура деформирования находится в пределах  $0,6\text{--}0,85 T_{пл}$  (для сталей  $680\text{--}720$  °С), т. е. как при обычной горячей обработке металлов давлением; 3) если скорость деформирования (растяжения) находится в диапазоне  $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{--}10^{-1} \text{ с}^{-1}$ ; 4) аномально высокая пластичность наблюдается также вблизи (несколько ниже) температуры фазовых превращений и в момент мартенситного превращения.

Используя эффект сверхпластичности, можно при затрате небольших усилий осуществить значительные деформации.

### 1.5. Металлические сплавы

В основном в промышленности используются различные металлические сплавы, а не чистые металлы.

Металлическим сплавом называется кристаллическое вещество, состоящее из двух и более металлов или неметаллов, полученное путем сплавления составляющих его веществ в жидком состоянии. В последнее время сплавами также называют металлические материалы, полученные спеканием смеси компонентов в твердом состоянии, совместной конденсацией из паров и другими способами (псевдосплавы).

Различают двух-, трех- и многокомпонентные сплавы. Необходимым условием образования металлического сплава является взаимная растворимость компонентов в жидком состоянии.

При затвердевании компоненты сплава могут образовывать твердые растворы, химические соединения и механические смеси. Таким образом, свойства сплава зависят не только от химического состава, но и от характера взаимодействия веществ, его составляющих.

При образовании твердого раствора, когда атомы растворимого компонента либо внедряются в решетку растворителя, либо замещают в ней атомы растворителя, происходит искажение кристаллической решетки, изменение ее параметров, а следовательно, и свойств растворителя.

Если компоненты сплава вступают в химическое взаимодействие, то образуется химическое соединение с новым типом кристаллической решетки и новыми свойствами, отличающимися от свойств образующих ее элементов.

При кристаллизации сплава, который образуется только механической смесью компонентов, кристаллы каждого компонента со-

храняют те свойства, которые они имеют в чистом виде. Поэтому свойства механической смеси определяются количественным соотношением входящих в нее кристаллов компонентов.

Механическая смесь, образованная одновременно выпадающими из жидкого расплава кристаллами компонентов, называется эвтектикой (легко плавящейся). Эвтектика имеет самую низкую температуру плавления в данной системе сплавов.

## 1.6. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Сплавы железа с углеродом (стали и чугуны) являются наиболее распространенными металлическими материалами и практически используются во всех отраслях промышленности. Сплавы железа с углеродом в зависимости от содержания углерода, температуры нагрева и скорости его охлаждения могут иметь различные структурные составляющие: твердые растворы, химические соединения и механические смеси.

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются:

– чистое железо – серебристо-светлый металл, атомный номер 26, атомный вес 55,85. Свойства железа зависят от степени его чистоты (технически чистое железо содержит менее 0,1–0,15 % примесей) и при нагреве оно испытывает аллотропические превращения  $Fe\alpha$ – $Fe\gamma$ – $Fe\delta$ . Плотность железа 7,85 г/см<sup>3</sup>. Железо обладает невысокими твердостью и прочностью ( $HV \approx 80$ ,  $\sigma_b \approx 250$  МПа) и хорошей пластичностью (удлинение  $\delta \approx 50$  %);

– углерод в природе встречается в виде двух модификаций: в форме алмаза, имеющего сложную кубическую решетку, и в форме графита, имеющего простую гексагональную решетку с параметрами  $a = 1,4 \text{ \AA}$  и  $c = 3,4 \text{ \AA}$ . Плотность графита 2,25 г/см<sup>3</sup>.

Фазами в системе Fe–Fe<sub>3</sub>C являются:

– феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe\alpha$  (0,02 % C при  $T = 727$  °C и 0,006 % C при  $T = 20$  °C). Твердость и механические свойства Ф близки к свойствам технически чистого железа, они зависят от количества элементов, присутствующих в нем (многие металлы и неметаллы образуют с ферритом твердые растворы замещения);

– аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe\gamma$ . Углерод занимает пору в центре ГЦК ячейки. При температуре 1148 °C аустенит содержит 2,14 % углерода, а при температуре 727 °C – 0,8 % углерода. Аустенит – парамагнитен, пластичен, имеет низкие значе-

ния  $\sigma_v$  и НВ. Элементы, растворяющиеся в аустените, могут значительно изменять его свойства, а также температурные границы его существования;

– цементит (Ц) – карбид железа  $Fe_3C$ , образующийся при содержании углерода 6,67 %. Цементит имеет сложную орторомбическую решетку (12 атомов железа и 4 атома углерода). Цементит имеет очень высокую твердость ( $HV \sim 800$ ), хрупкий, до температуры равной  $217^\circ C$  слабо ферромагнитен;

– жидкая фаза (Ж) – существует выше линии ликвидуса, которая характеризует температуру начала процесса затвердевания (кристаллизации). Железо хорошо растворяет углерод, образуя однородную жидкую фазу.

### 1.7. Диаграмма состояния системы железо–углерод Fe–C ( $Fe_3C$ )

Практическое значение имеет часть диаграммы до содержания 6,67 % углерода, когда образуется химическое соединение карбид железа  $Fe_3C$  (цементит) (рис. 5). Линия  $ACD$  является линией ликвидуса (начало кристаллизации), а линия  $AECF$  – солидуса (окончание первичной кристаллизации). Критические точки  $A$  – чистого железа, а  $D$  – цементита  $Fe_3C$ .

Точное знание всех превращений, происходящих в сталях и чугунах при нагреве и охлаждении в твердом состоянии, а также при кристаллизации из расплава, позволяет разрабатывать наиболее эффективные варианты технологии литейного производства, термообработки, прокатного и кузнечно-прессового производства.

По содержанию углерода диаграмму можно разбить на два участка, соответствующих сталям (до 2,14 % углерода) и чугунам (более 2,14 % углерода). В зависимости от содержания углерода сталь делится на доэвтектоидную (менее 0,8 % углерода), эвтектоидную (0,8 % углерода) и заэвтектоидную (более 0,8 % углерода); чугун – на доэвтектоидный (менее 4,3 % углерода), эвтектоидный (4,3 % углерода) и заэвтектоидный (более 4,3 % углерода).

Линии  $GSEF$  и  $PSK$  соответствуют началу и окончанию процесса вторичного превращения в системе, связанного с переходом железа из одной модификации в другую и изменением растворимости углерода в них. Линия  $GPQ$  показывает изменение растворимости углерода в  $Fe\alpha$  в зависимости от температуры. Максимальная его растворимость (0,025 %) достигается при температуре, равной  $727^\circ C$ .

Линии диаграммы делят ее на области, соответствующие различным фазовым состояниям системы: жидкость (Ж), аустенит (А), феррит (Ф), цементит (Ц). Цементит первичный образуется из жидкого сплава, вторичный – из аустенита, третичный – из феррита. Кроме этого образуется эвтектоидная смесь феррита и цементита с постоянным содержанием углерода (0,8 %) – перлит (П), а также эвтектоидная смесь аустенита и цементита с постоянным содержанием углерода (4,3 %) – ледебурит (Л).

Перлит образуется при температуре, равной 727 °С, в результате перекристаллизации аустенита. Обычно структура перлита представляет собой тонкие, чередующиеся пластинки цементита и феррита, что обуславливает его хорошую обрабатываемость. Твердость перлита составляет 160–200 НВ.

Ледебурит образуется при кристаллизации жидкого расплава при температуре 1148 °С. В качестве структурной составляющей ледебурит присутствует в сплавах с содержанием углерода более 2 % (в чугунах), ледебурит отличается высокой твердостью и хрупкостью.

Из диаграммы состояния Fe–С видно, какие происходят превращения в рассматриваемой системе в зависимости от изменения температуры и содержания углерода в ней (рис. 1.5).

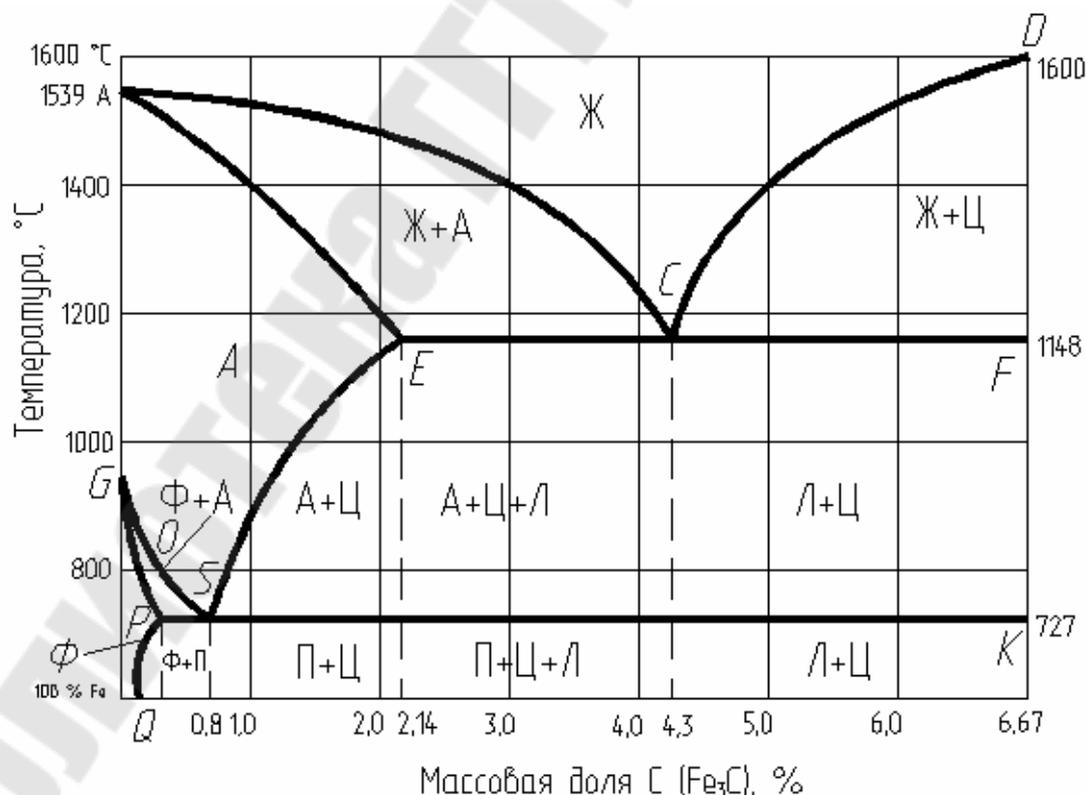


Рис. 1.5. Диаграмма состояния системы железо–углерод

## 2. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 2.1. Основные виды термической обработки, в том числе отжиг I рода

Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, проводимых в определенной последовательности с целью изменения внутреннего строения сплава и получения необходимых свойств. Любой вид термической обработки (ТО) может быть представлен графиком в координатах температура ( $t$  °С) – время ( $\tau$ ) (рис. 2.1).

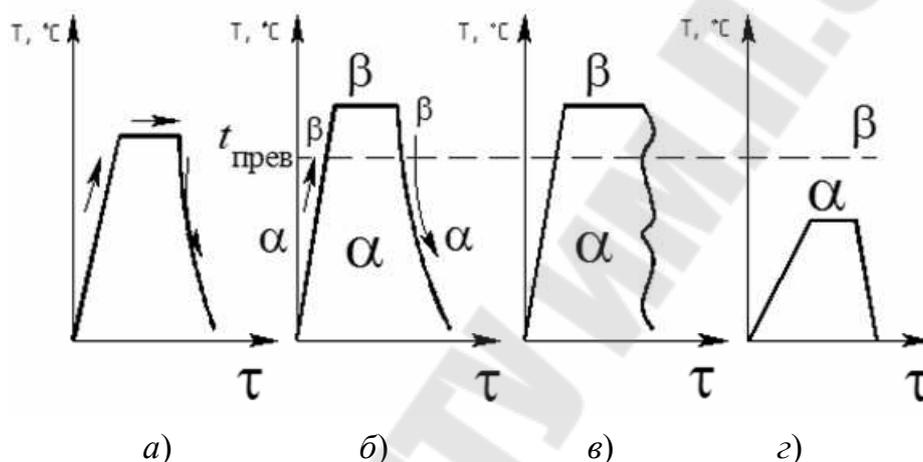


Рис. 2.1. Графики некоторых видов термической обработки: а – общая схема; б – отжиг II рода; в – закалка; з – отпуск

По классификации А. А. Бочвара различают четыре основных вида термической обработки: отжиг I рода; отжиг II рода; закалку и отпуск. Сочетание теплового воздействия с химическими, механическими воздействиями является основой двух других разновидностей термической обработки: химико-термической (ХТО) и термомеханической (ТМО).

*Отжиг* предназначен для изменения формы и размеров зерен, снятия внутренних напряжений, снижения твердости, а также устранения химической и физической неоднородности стали, обусловленной предшествующей обработкой.

*Отжиг I рода* возможен для любых металлов и сплавов и его проведение не обусловлено фазовыми превращениями в твердом состоянии, но обеспечивает получение более равновесного состояния металла или сплава.

Основное значение при проведении такого отжига имеет температура нагрева и время выдержки при этой температуре, т. к. именно

эти параметры определяют скорость процессов, устраняющих отклонения от равновесного состояния. Скорость нагрева и охлаждения для отжига I рода имеет второстепенное значение.

Различают следующие разновидности отжига I рода.

*Диффузионный отжиг* (гомогенизация) используют для устранения химической неоднородности, возникающей при кристаллизации сплава. Поэтому обычно температура такого отжига составляет  $0,8-0,9 T_{пл}$  (1100–1150 °С). Время выдержки при этой температуре должно обеспечить выравнивание состава и растворение избыточных фаз (10–15 ч). Для измельчения зерна сталь после гомогенизации часто подвергают полному отжигу.

*Рекристаллизационный отжиг* применяют после холодной пластической деформации для снятия наклепа и получения равновесного состояния сплава. В результате рекристаллизации в деформированном металле образуются новые зерна, снимаются напряжения и восстанавливается пластичность металла ( $t \approx 680-730$  °С, время выдержки около 30 мин).

*Отжиг для снятия напряжений*, возникающих при ковке, сварке, литье и т. п., которые могут вызвать коробление, т. е. изменение формы, размеров и даже разрушение изделий ( $t \approx 400-600$  °С, время выдержки около 2,5 мин на 1 мм толщины сечения).

Графически это можно представить следующим образом (рис. 2.2).

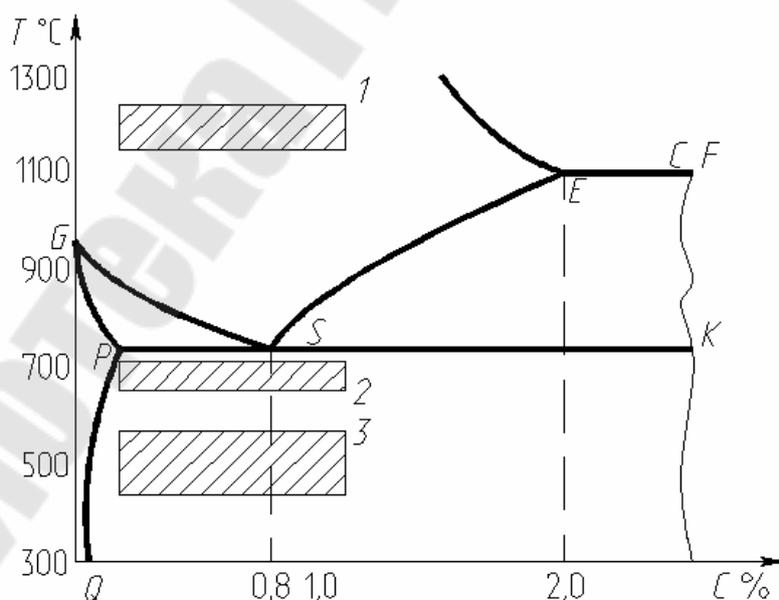


Рис. 2.2. Отжиг I рода: 1 — диффузионный отжиг; 2 — рекристаллизационный отжиг; 3 — отжиг для снятия напряжений

## 2.2. Отжиг II рода

*Отжиг II рода* проводится для металлов, испытывающих фазовые превращения при нагреве и охлаждении. Такая термическая обработка проводится для сплавов, в которых имеются полиморфные, эвтектоидные превращения, а также может быть переменной растворимостью в твердом состоянии. Практическая целесообразность фазовой перекристаллизации определяется тем, каково влияние структурных изменений на свойства сплава.

По условиям нагрева и охлаждения различают отжиг полный и неполный, изотермический, циклический (маятниковый) и нормализацию.

*Полный отжиг* – нагрев стали до температуры выше линии *GSE* на 30–50 °С и медленное охлаждение после выдержки. При нагреве образуется мелкозернистый аустенит, который при медленном охлаждении распадается с образованием ферритно-перлитной структуры с мелким зерном, что способствует повышению вязкости и пластичности стали и улучшает ее обрабатываемость.

*Неполный отжиг* – отличается от полного тем, что нагрев стали осуществляется до более низких температур (выше линии *PSK*, но ниже – *GSE*). Сокращаются затраты времени и энергии, но однако структура доэвтектоидных сталей после неполного отжига гораздо хуже, чем после полного, поэтому он применяется довольно редко.

Если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым, применяют т. н. *циклический* или *маятниковый* отжиг – нагревают сталь выше линии *PSK* (740–750 °С), затем охлаждают до температуры 680 °С (ниже линии *PSK*), после чего повторяя циклы, нагревают до температуры, равной 740–750 °С, и охлаждают до температуры 680 °С. В результате перлит получается зернистым, и сталь будет пластичной.

*Нормализация* представляет собой нагрев стали до температуры выше линии *GSE* на 50–60 °С с последующим ее охлаждением на воздухе. Придается стали мелкозернистая структура, повышается несколько прочность стали и улучшается ее обрабатываемость резанием. Преимущество процесса нормализации перед отжигом – низкая себестоимость, и поэтому она вытеснила отжиг углеродистых сталей. Графически эти отжижки могут быть представлены следующим образом (рис. 2.3):

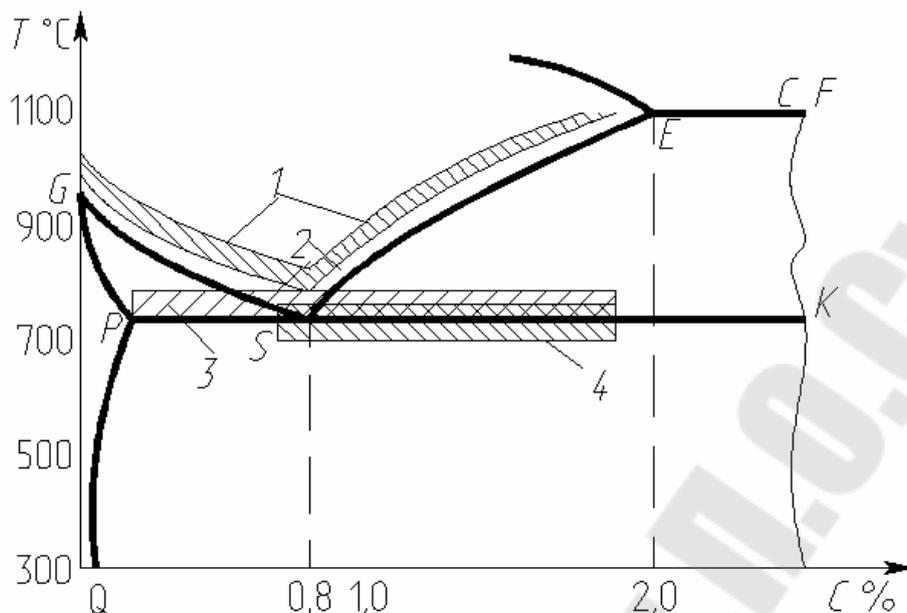


Рис. 2.3. Отжиг II рода: 1 – нормализация; 2 – полный отжиг; 3 – неполный отжиг; 4 – циклический отжиг

*Изотермический отжиг* стали является разновидностью полного отжига и заключается в нагреве ее выше линии  $GSE$ , сравнительно быстром охлаждении до температуры ниже линии  $PSK$  ( $\sim 650$  °C) и изотермической выдержке при этой температуре до полного распада аустенита. Затем следует охлаждение на воздухе. Преимущество изотермического отжига по сравнению с полным состоит в уменьшении продолжительности процесса и получении более однородной структуры.

Следует иметь в виду, что при отжигах детали охлаждаются, как правило, медленно: углеродистые стали – со скоростью  $\sim 200$  °C/ч, легированные  $\sim 30$ – $100$  °C/ч.

### 2.3. Закалка и отпуск

Закалка, как и отжиг II рода, осуществляется для металлов и сплавов, имеющих фазовые превращения в твердом состоянии. Главное различие этих видов термической обработки – скорость охлаждения, которая при закалке большая. Для закалки основными параметрами являются температура нагрева, время выдержки и скорость охлаждения. Закалка – наиболее ответственная термическая операция, придающая изделиям из стали высокие твердость, прочность и износоустойчивость. Температура нагрева стали под закалку выбирается в зависимости от содержания в ней углерода. Интервал закалочных

температур доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей показан на рис. 2.4, т. е. находится выше критической точки перехода  $\alpha\text{Fe} \rightarrow \gamma\text{Fe}$ . При быстром охлаждении в стали образуются структуры, отличающиеся от рассмотренных на диаграмме Fe–C, построенной для чрезвычайно медленного охлаждения расплава.

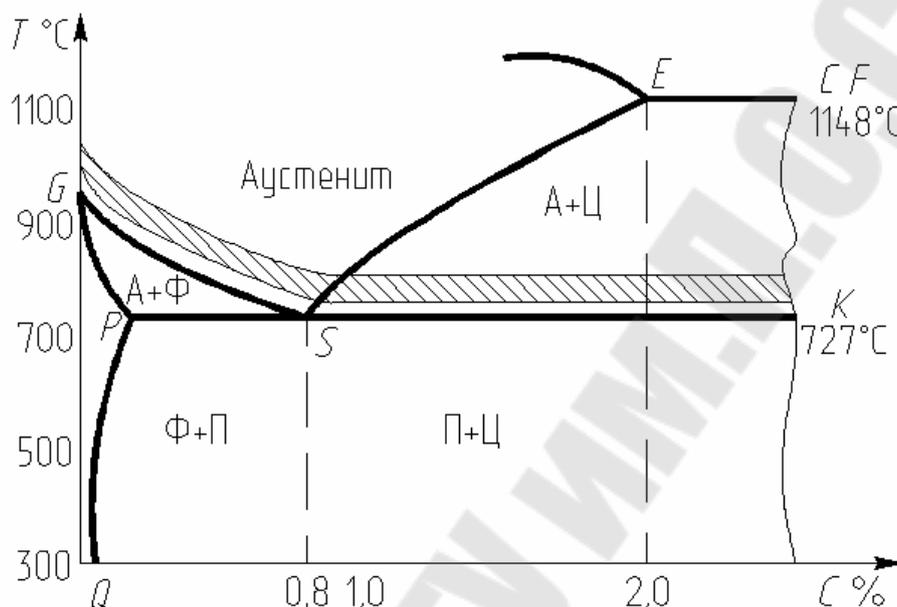


Рис. 2.4. Схема выбора температур закалки

При относительно малых скоростях охлаждения (менее  $40\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ ), образовавшийся при нагреве выше линии  $GSK$  аустенит полностью распадается с образованием ферритно-цементитной смеси – *перлита*. С увеличением скорости охлаждения ( $50\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ ) превращения происходят при более низких температурах. Чем ниже температура превращения, тем выше степень дисперсности ферритно-цементитной смеси и ее твердость. Мелкодисперсная ферритно-цементитная смесь, образующаяся при охлаждении углеродистой стали со скоростью более  $50\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , называется *сорбитом*. Еще более мелкодисперсная смесь, образующаяся при скорости охлаждения более  $80\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , называется *трооститом*. Перлит, сорбит, троостит имеют пластинчатое строение и различаются лишь степенью дисперсности. С увеличением степени дисперсности твердость и прочность стали возрастают.

Еще при больших скоростях охлаждения основной структурой стали является *мартенсит*, представляющий собой перенасыщенный твердый раствор C в  $\alpha\text{Fe}$ . Содержание в мартенсите углерода такое же, как и в исходном аустените. Мартенсит имеет высокую твердость,

которая обусловлена повышенным содержанием углерода и большим числом несовершенств кристаллического строения, но характеризуется также и высокой хрупкостью.

Наличие остаточных напряжений структурного и термического происхождения, а также неравновесных структурных составляющих – мартенсита и аустенита (часть аустенита всегда остается непревращенной) – обуславливает неустойчивое состояние закаленной стали, что требует после закалки изделия подвергнуть его окончательной термической операции – *отпуску*.

Отпуск заключается в нагреве стали до температуры ниже линии *PSK*, выдержке ее при заданной температуре и последующем охлаждении (обычно на воздухе). Напряжения в стали снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска. С уменьшением скорости охлаждения остаточные напряжения уменьшаются.

Различают три вида отпуска.

*Низкотемпературный отпуск (низкий)* осуществляется в интервале температур 100–205 °С. При таком отпуске из кристаллической решетки мартенсита начинает выделяться углерод в виде  $\epsilon$  – карбида. Твердость его при этом практически не снижается, а внутренние напряжения уменьшаются. Низкому отпуску подвергают инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали после поверхностной закалки, цементации и т. д.

*Среднетемпературный отпуск (средний)* проводят при температуре 350–500 °С. При температуре выше 300 °С  $\epsilon$  – карбид превращается в цементит, который отделяется от решетки твердого раствора, что сопровождается снижением твердости и повышением вязкости и пластичности стали (троостит отпуска). Этому отпуску подвергают рессоры, пружины, штампы и т. п.

*Высокотемпературный отпуск (высокий)* осуществляется при температуре 500–650 °С. При этом полностью снимаются внутренние напряжения и происходит коагуляция частиц цементита, что понижает твердость закаленной стали, но значительно увеличивает пластичность и вязкость стали (сорбит отпуска).

*Улучшение* – термическая обработка сталей, состоящая из закалки и высокого отпуска. После такой обработки сталь имеет высокие показатели прочности, пластичности и ударной вязкости.

## 2.4. Основы технологии термической обработки сталей

Технологический процесс термической обработки сталей включает три основные стадии: нагрев, выдержку и охлаждение.

Нагрев при термической обработке может производиться в печах, печах-ваннах и электрических устройствах. Температура нагрева выбирается в зависимости от проводимой термической операции по диаграмме состояния системы железо–углерод. Нагрев следует вести быстро, но с учетом химического состава сталей, объема и сложности конфигурации деталей, не допуская образования в них дефектов (трещин) из-за больших перепадов температуры внутри и снаружи детали. Легированные стали имеют меньшую теплопроводность, чем углеродистые, и поэтому их также следует нагревать осторожно (помещая в холодную или слегка разогретую печь и постепенно увеличивать температуру до заданной).

В процессе нагрева и выдержки при высокой температуре за счет контакта металла с окружающей средой происходит выгорание углерода и легирующих элементов, образование окалины, насыщение поверхностей деталей нежелательными элементами. Это надо учитывать при выборе нагревательных печей, которые бывают: с воздушной атмосферой, содержащей продукты горения; защитной газовой атмосферой и печи-ванны (соляные, соляно-щелочные, свинцовые).

Для закалки в основном применяют печи непрерывного действия: конвейерные, толкательные, с вращающимся подом, а для отжига и нормализации – печи периодического действия: камерные, шахтные и печи-ванны.

Охлаждение при термической обработке производится с необходимой скоростью в зависимости от проводимой операции. Скорость охлаждения зависит от охлаждающей среды. При закалке углеродистых сталей используют воду (18–25 °С) и различные водные растворы, а для легированных сталей – воздух, масло, расплавы легкоплавких металлов. При увеличении скорости охлаждения увеличиваются внутренние напряжения, которые приводят к короблению и растрескиванию деталей. Поэтому при обработке инструмента применяют двойное охлаждение, например, вначале в воде (до 300–400 °С), а затем в масле, что предупреждает появления в нем трещин и коробления.

## 2.5. Старение и обработка холодом

Отпуск применяется к сплавам, которые подвергнуты закалке с полиморфным превращением.

К материалам, подвергнутым закалке без полиморфного превращения, применяется старение.

Закалка без полиморфного превращения – термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние, свойственное сплаву при более высоких температурах (пересыщенный твердый раствор).

Старение – термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора.

В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов.

В отличие от отпуска после старения увеличиваются прочность и твердость и уменьшается пластичность.

Старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

В стареющих сплавах выделения из твердых растворов встречаются в следующих основных формах:

- тонкопластинчатой (дискообразной);
- равноосной (сферической или кубической);
- игольчатой.

Форма выделений определяется конкурирующими факторами: поверхностной энергией и энергией упругой деформации, стремящимися к минимуму.

Поверхностная энергия минимальна для равноосных выделений. Энергия упругих искажений минимальна для выделений в виде тонких пластин.

Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации.

Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре.

Нагрев сплава увеличивает подвижность атомов, что ускоряет процесс.

Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется искусственным старением.

Предел прочности, предел текучести и твердость сплава с увеличением продолжительности старения возрастают, достигают максимума и затем снижаются (явление перестаривания)

При естественном старении перестаривания не происходит. С повышением температуры стадия перестаривания достигается раньше.

Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это деформационное старение.

Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе: процессы, подготавливающие выделение, и сами процессы выделения.

Для практики большое значение имеет инкубационный период – время, в течение которого в закаленном сплаве совершаются подготовительные процессы, когда сохраняется высокая пластичность. Это позволяет проводить холодную деформацию после закалки.

Если при старении происходят только процессы выделения, то явление называется дисперсионным твердением.

После старения повышается прочность и снижается пластичность низкоуглеродистых сталей в результате дисперсных выделений в феррите цементита третичного и нитридов.

Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных сплавов, а также многих жаропрочных сплавов.

*Обработка стали холодом.* Высокоуглеродистые и многие легированные стали имеют температуру конца мартенситного превращения ( $M_k$ ) ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Обычно для этого используют сухой лед.

Такая обработка называ. Поэтому в структуре стали после закалки наблюдается значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость изделия, а также ухудшает магнитные характеристики. Для устранения аустенита остаточного проводят дополнительное охлаждение детали в области отрицательных температур, до температуры ниже  $t. M_k$  ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Обычно для этого используют сухой лед.

Такая обработка называется обработкой стали холодом.

Обработку холодом необходимо проводить сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Увеличение твердости после обработки холодом обычно составляет 1–4 HRC.

После обработки холодом сталь подвергают низкому отпуску, т. к. обработка холодом не снижает внутренних напряжений.

Обработке холодом подвергают детали шарикоподшипников, точных механизмов, измерительные инструменты.

## **2.6. Поверхностное упрочнение стальных изделий**

Многие детали машин работают в условиях повышенного трения и при этом воспринимают еще значительные ударные нагрузки (коленчатые валы, кулачки, зубья колес). В таких деталях необходимо сочетание высокой твердости и износостойкости поверхностных слоев с достаточными вязкостью и сопротивлением усталости сердцевины, что обеспечивается поверхностным упрочнением и химико-термической обработкой (ХТО).

Существует несколько методов поверхностной закалки: с применением нагрева кислородно-ацетиленовым пламенем или пламенем газовой горелки, контактный нагрев электротокком, индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), который имеет ряд преимуществ перед предыдущими: улучшается качество изделий, уменьшаются деформации, почти полностью устраняется окисление и обезуглероживание стали и значительно повышается производительность труда, а также улучшаются санитарно-гигиенические условия работы и появляется возможность механизировать и автоматизировать процесс закалки вплоть до включения операции закалки в автоматические линии. К недостаткам этого способа относятся высокая стоимость установки и необходимость изготовления для каждой детали собственного индуктора, повторяющего конфигурацию закаливаемых поверхностей детали, т. к. деталь нагревается вихревыми токами (токи Фуко).

После закалки ТВЧ детали подвергают низкому отпуску при температуре 160–200 °С с обеспечением большей твердости, чем после обычной закалки. Однако экономически целесообразна закалка ТВЧ в массовом и крупносерийном производствах.

Метод разработан советским ученым Вологдиным В. П. Основан на том, что если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой.

Обычно используются машинные генераторы с частотой 50–15000 Гц и ламповые генераторы с частотой больше  $10^6$  Гц. Глубина закаленного слоя – до 2 мм.

Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия.

Схема технологического процесса закалки ТВЧ представлена на рис. 2.5.

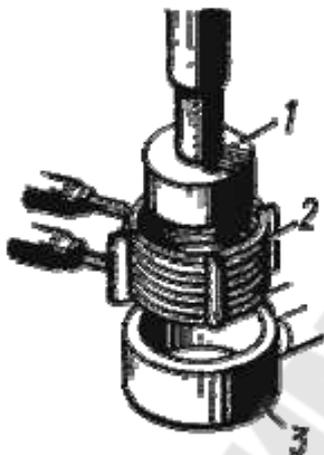


Рис. 2.5. Схема технологического процесса закалки ТВЧ:  
1 – деталь; 2 – индуктор; 3 – спрейер

После нагрева в течение 3–5 с индуктора 2 деталь 1 быстро перемещается в специальное охлаждающее устройство – спрейер 3, через отверстия которого на нагретую поверхность разбрызгивается закалочная жидкость.

Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве.

При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигльчатого мартенсита. Твердость повышается на 2–4 НРС по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость и предел выносливости.

Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации, а после закалки низкому отпуску при температуре 150–200 °С (самоотпуск).

Наиболее целесообразно использовать этот метод для изделий из сталей с содержанием углерода более 0,4 %.

Преимущества метода:

- большая экономичность, нет необходимости нагревать все изделие;
- более высокие механические свойства;

- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности детали;
- снижение брака по короблению и образованию закалочных трещин;
- возможность автоматизации процесса;
- использование закалки ТВЧ позволяет заменить легированные стали на более дешевые углеродистые;
- позволяет проводить закалку отдельных участков детали.

Основной недостаток метода – высокая стоимость индукционных установок и индукторов.

Целесообразно использовать в серийном и массовом производстве.

В настоящее время на некоторых заводах поверхностную закалку деталей осуществляют с помощью мощной лазерной техники. Лазерный луч позволяет провести локальный нагрев металла с высокой скоростью, охлаждение происходит за счет отвода теплоты в основной объем детали.

Кроме того, поверхностная прочность увеличивается и при обработке поверхности детали дробью или накаткой роликами, раскаткой и т. п., т. е. когда наблюдается пластическое деформирование поверхностного слоя.

## 2.7. Химико-термическая обработка стали

*Химико-термической обработкой* (ХТО) называется процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностных слоев деталей. Изменение химического состава поверхностного слоя достигается в результате его взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной), в которой осуществляется нагрев. В результате изменения химического состава поверхностного слоя меняется также его фазовый состав и микроструктура. Основные параметры ХТО – температура нагрева и продолжительность выдержки. Основные процессы любого вида ХТО: диссоциация – абсорбция – диффузия.

*Диссоциация* – получение насыщающего элемента в более активном, атомарном состоянии:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ ,  $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$  и т. п.

*Абсорбция* – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента. *Диффузия* – перемещение захваченного поверхностью атома в глубь изделия.

Скорости всех трех процессов обязательно должны быть согласованы. Для абсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения. Если основной металл и насыщающий элемент образуют механические смеси, то ХТО невозможна.

Основными видами ХТО являются: цементация (науглераживание), азотирование, цианирование (совместное насыщение С и N) и диффузионная металлизация (насыщение поверхности алюминием, кремнием, хромом, бором и т. д.). Целью ХТО кроме поверхностного упрочнения детали является повышение их стойкости к воздействию агрессивных сред при нормальных и повышенных температурах.

*Цементация* – применяется для низкоуглеродистых сталей и обеспечивает увеличение углерода до 1,2 % в поверхностном слое детали на глубину 0,5–2 мм за 5–10 ч при температуре 900–950 °С с использованием карбюризаторов (активированный древесный уголь, каменноугольный полукокс и торфяной кокс) и активаторов (углекислый барий  $BaCO_3$ , кальцинированная сода  $Na_2CO_3$ ). После цементации детали подвергают нормализации для измельчения зерна металла, повторной закалке и низкотемпературному отпуску. В последние годы применяется цементация в газовой среде (метан, пропан, оксид углерода, этилен и их смеси).

*Азотирование* применяется для среднеуглеродистых сталей и легированных хромом, ванадием, молибденом, вольфрамом, алюминием. Азот образует с указанными элементами устойчивые нитриды и карбонитриды с появлением напряжений сжатия в поверхностном слое, что способствует увеличению прочности, предела выносливости и долговечности деталей машин. Азотирование осуществляется путем нагрева деталей в среде аммиака  $NH_3$  при температуре 480–650 °С (преимущественно 500–520 °С) с получением азотированного слоя толщиной 0,2–0,3 мм (продолжительность примерно 24 ч). Различают газовое, жидкостное и ионное азотирование. При этом азотирование назначают как окончательную операцию при изготовлении деталей после окончательной механообработки и термической операции – закалки с высоким отпуском, что создает в стали структуру сорбита, которая сохраняется в сердцевине изделия и после азотирования, обеспечивая повышенную прочность и вязкость.

Твердость цементированного слоя в 1,5–2 раза меньше азотированного и сохраняется при нагреве только до 180–125 °С, в то время как азотированный слой сохраняет твердость до температуры 600–650 °С.

*Цианирование* (насыщение С и N) осуществляют в ваннах с расплавленными солями, например, 20–25 % NaCN (цианистый натрий); 20–50 % NaCl и 25–50 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Цианированный слой детали обладает высокой твердостью (HRC ≈ 58–62), хорошо сопротивляется износу, повышается усталостная прочность и коррозионная стойкость. Совместная диффузия С и N происходит быстрее, чем каждого из них в отдельности, и поэтому продолжительность цианирования составляет 0,5–2 ч.

Цианирование бывает *высокотемпературным* при температуре 800–950 °С; и *низкотемпературным* при температуре 540–560 °С. При высокотемпературном цианировании поверхность насыщается больше углеродом, чем азотом (0,8–1,2 % С, 0,2–0,3 % N), т. е. приближается к цементации и после нее выполняется закалка с низким отпуском.

Низкотемпературному цианированию подвергаются детали после термической операции как при азотировании. При таком цианировании поверхность насыщается главным образом азотом на глубину 0,015–0,03 мм.

Главный недостаток *жидкостного цианирования* – ядовитость цианистых солей. Этого недостатка нет при газовом цианировании – *нитроцементации*, которая проводится в газовых смесях, содержащих 70–80 % цементирующего газа и 20–30 % аммиака при температуре 850–870 °С в течение 2–10 ч. Состав газа и температура определяют соотношение С и N в слое, глубина которого зависит от температуры и продолжительности выдержки. По сравнению с газовой цементацией нитроцементация имеет ряд преимуществ: уменьшается деформация и коробление изделия, увеличивается сопротивление износу и коррозионная стойкость, меньше рост зерна.

Разновидностями *диффузионной металлизации* являются:

- *Алитирование* – насыщение поверхностного слоя на глубину 0,3–0,8 мм алюминием в сталях с 0,1–0,2 % углерода для повышения окалинстойкости и жаростойкости (1150 °С), т. к. на поверхности детали образуется прочный оксид Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Алитирование чаще проводят в порошкообразных смесях, а также в газовых средах (детали помещают в ретортные печи, засыпают ферроалюминий и пропускают хлор, а также хлористый водород).

- *Силицирование* – насыщение кремнием. Используют главным образом газовое силицирование (порошки ферросилиция и карборунда нагревают до температуры 950–1050 °С и пропускают хлор), кото-

рое за 2 ч дает слой толщиной 1 мм с содержанием кремния 14 %. Силицирование повышает окалиностойкость до температуры 800–850 °С, слой хорошо сопротивляется истиранию и коррозионостоек в морской воде и некоторых кислотах. Для повышения жаростойкости силицирование применяют даже для изделий из сплавов на основе молибдена и вольфрама, обладающих высокой жаропрочностью.

- *Хромирование* – насыщение хромом. Хромированию подвергают детали из стали с различным содержанием углерода. При хромировании средне- и высокоуглеродистых сталей получается очень высокая поверхностная твердость (до HV 1600–1800), повышается износостойкость, окалиностойкость (до 800 °С), а также коррозионная стойкость. При хромировании малоуглеродистых сталей (до 0,2 % С) твердость повышается незначительно, но увеличивается коррозионная стойкость. Хромирование осуществляется при температуре 850–950 °С, время выдержки до 8 ч, глубина слоя 0,2–0,25 мм.

- *Борирование* – насыщение бором. Борирование обеспечивает особенно высокую твердость поверхности (до HV 1800–2000), сопротивление износу, повышает коррозионную стойкость и теплостойкость. Борирование для среднеуглеродистых сталей осуществляют как в порошкообразных смесях, так и в жидких средах (электролизное борирование), температура 850–950 °С, время выдержки 2–6 ч, глубина слоя 0,15–0,35 мм. После борирования детали подвергают закалке ТВЧ или изотермической термообработке для уменьшения напряжений в поверхностном слое.

## 2.8. Термомеханическая обработка (ТМО)

При термомеханической обработке (ТМО) совмещаются пластическая деформация и термическая обработка. Повышение прочности при ТМО объясняется тем, что в результате деформации аустенита происходит дробление его зерен и блоков (уменьшаются в 2–4 раза по сравнению с обычной закалкой), что приводит к образованию при закалке более мелких пластинок мартенсита, уменьшению напряжений II рода и увеличению в 3–5 раз пластичности и в 1,5–2 раза вязкости по сравнению с обычной закалкой.

В зависимости от температуры, при которой проводят деформацию, различают высокотемпературную ТМО (ВТМО) и низкотемпературную ТМО (НТМО). Нагрев при ТМО осуществляется до температур выше линии *GSE* (около 1050–1150 °С), т. е. для выхода в зону устойчивого аустенита. Затем при ВТМО делается «подстуживание»

стали на около 150 °С, деформация 25–35 % и сразу же закалка или рекристаллизация и низкий отпуск; а при НТМО – быстрое охлаждение до температуры 450–550 °С, т. е. охлаждение со скоростью выше критической, деформация на 75–95 % и затем закалка и низкий отпуск (150–200 °С). Смысл переохлаждения аустенита состоит в том, чтобы деформация происходила ниже температуры его рекристаллизации.

Наибольший эффект упрочнения дает НТМО, которую применяют к среднеуглеродистым легированным сталям, закаливаемым на мартенсит; однако более перспективной является ВТМО, т. к. она может применяться практически для любых сталей при уменьшении затрат энергии на деформирование металла, в том числе и для титановых и жаропрочных сплавов. Существует «наследственность» ТМО – сохраняется эффект при вторичной обычной термической обработке (с кратковременным нагревом).

Термомеханическую обработку применяют и для других сплавов. Механические свойства после разных видов ТМО для машиностроительных сталей в среднем имеют следующие характеристики (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Механические свойства сталей после ТМО**

	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
НТМО	2400–2900	2000–2400	5–8	15–30
ВТМО	2100–2700	1900–2200	7–9	25–40
ТО	1400	1100	2	3

*Примечание:* сталь 40 после обычной закалки

### 3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 3.1. Классификация и маркировка сталей

В качестве конструкционных материалов в машиностроении применяют углеродистые и легированные стали, чугуны, сплавы цветных металлов, резину, стекло, древесину, пластмассы и др.

Принята классификация сталей по следующим признакам: числу компонентов; содержанию легирующих элементов; способу производства; характеру ведения процесса и применяемым раскислителям; назначению.

По химическому составу стали подразделяются на углеродистые и легированные (хромом, молибденом, марганцем, титаном и др.): низколегированные (до 2,5 %), среднелегированные (2,5–10 %) и высоколегированные (более 10 %).

По способу производства различают: конвертерную (К), мартеновскую (М) стали и электросталь (Э).

По характеру ведения процесса и способу раскисления стали делят на спокойные – сп (раскисление Mn + Si + Al) более качественные; кипящие – кп (раскисление только Mn) и полуспокойные – пс (раскисление Mn + Al).

По назначению стали разделяют на конструкционные, инструментальные и специальные (стали с особыми свойствами – коррозионностойкие (Сталь 08X17H13M2T; Сталь 08X18Г8H2T; Сталь 10X14АГ15 и др.), жаростойкие и жаропрочные (Сталь 20X23H13; Сталь 20X23H18; Сталь 20X25H20C2; ХН35ВТ и др.), кислотоупорные, с особыми магнитными свойствами, работающие при низких температурах, сплавы с эффектом памяти формы и др.).

Конструкционные углеродистые стали разделяют на стали обыкновенного качества (Ст0, Ст1, ... , Ст6, например, МСт2кп – мартеновская кипящая сталь Ст2) и качественные: с нормальным содержанием Mn (08, 10, 15, ... , 85 – со средним содержанием углерода в сотых долях процента) и с повышенным содержанием Mn (60Г, 65Г, 70Г). Применяют также специальные низкоуглеродистые серофосфористые стали – автоматные стали марок А12, А20, А30, А40Г, обладающие улучшенными свойствами обрабатываемости резанием.

Инструментальные углеродистые стали содержат 0,65–1,35 % углерода и используются для изготовления ударного и режущего инструмента (У7, У8, ... , У13, где У – инструментальная углеродистая сталь, а число показывает содержание углерода в десятых долях процента). Если инструментальные стали выплавляют высококачественными, то в конце обозначения ставится буква А.

В основе маркировки легированных сталей лежит буквенно-цифровая система, предусматривающая следующие обозначения легирующих элементов Г – Mn; С – Si; Х – Cr; Н – Ni; В – вольфрам; М – Мо; К – Со; Ф – ванадий; Т – Ti; Ю – Al; Д – Cu и др. Цифры перед буквами обозначают среднее содержание углерода: две цифры – в сотых долях процента, а одна – в десятых долях процента. Содержание углерода более 1 % перед буквами не указывается.

Цифры после букв показывают примерное содержание легирующих элементов (в %), если оно менее 1 %, то цифра не указывается (например, жаропрочная сталь X23H20C2 – углерода более 1 %, Cr – 23 %, Ni – 20 %, Si – 2 %).

Для изготовления режущих инструментов применяются быстрорежущие (Р) стали, обладающие красностойкостью до 600°С и имеющие скорость резания в 3–4 раза выше, чем инструменты из углеродистых инструментальных сталей.

Марки быстрорежущих сталей Р18, Р12, Р9, Р6М3, Р6С5 и др. (например, Р6М3 – быстрорежущая сталь, с содержанием более 1 % углерода, 6 % вольфрама, 3 % молибдена, остальное железо).

### **3.2. Классификация, маркировка и область применения чугуна**

В зависимости от состояния углерода и его формы в чугуне различают: *белый* (передельный), *серый* (СЧ), *ковкий* (КЧ), *высокопрочный* (ВЧ) чугуны. Чугуны практически не поддаются ковке, изделия получают литьем.

*Серый чугун.* Структура не оказывает влияние на пластичность, она остается чрезвычайно низкой. Но оказывает влияние на твердость. Механическая прочность в основном определяется количеством, формой и размерами включений графита. Мелкие, завихренной формы чешуйки графита меньше снижают прочность. Такая форма достигается путем модифицирования. В качестве модификаторов применяют алюминий, силикокальций, ферросилиций.

Серый чугун широко применяется в машиностроении, т. к. легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами.

В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412).

Серые чугуны при малом сопротивлении растяжению имеют достаточно высокое сопротивление сжатию.

Серые чугуны содержат углерода – 3,2–3,5 %; кремния – 1,9–2,5 %; марганца – 0,5–0,8 %; фосфора – 0,1–0,3 %; серы – < 0,12 %.

Лучшими прочностными свойствами и износостойкостью обладают перлитные серые чугуны.

Учитывая малое сопротивление отливок из серого чугуна растягивающим и ударным нагрузкам, следует использовать этот материал для деталей, которые подвергаются сжимающим или изгибающим нагрузкам. В станкостроении это базовые, корпусные детали, крон-

штейны, зубчатые колеса, направляющие; в автостроении – блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы, диски сцепления. Отливки из серого чугуна также используются в электромашиностроении, для изготовления товаров народного потребления.

Обозначаются индексом СЧ (серый чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$  СЧ 15.

*Ковкий чугун.* Получают отжигом белого доэвтектического чугуна.

Хорошие свойства у отливок обеспечиваются, если в процессе кристаллизации и охлаждения отливок в форме не происходит процесс графитизации. Чтобы предотвратить графитизацию, чугуны должны иметь пониженное содержание углерода и кремния.

Ковкие чугуны содержат: углерода – 2,4–3,0 %, кремния – 0,8–1,4 %, марганца – 0,3–1,0 %, фосфора – до 0,2 %, серы – до 0,1 %.

Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30-6) и четыре с перлитной (КЧ 65-3) основой (ГОСТ 1215).

По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным является ограничение толщины стенок для отливки и необходимость отжига.

Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Из ферритных чугунов изготавливают картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, хомутики, муфты, фланцы.

Из перлитных чугунов, характеризующихся высокой прочностью, достаточной пластичностью, изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, тормозные колодки.

Обозначаются индексом КЧ (высокопрочный чугун) и двумя числами, первое из которых показывает значение предела прочности, умноженное на 0,1, а второе – относительное удлинение – КЧ 30-6.

*Высокопрочный чугун.* Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293) могут иметь ферритную (ВЧ 35), феррито-перлитную (ВЧ 45) и перлитную (ВЧ 80) металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03–0,07% от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита.

Чугуны с перлитной металлической основой имеют высокие показатели прочности при меньшем значении пластичности. Соотношение пластичности и прочности ферритных чугунов – обратное.

Высокопрочные чугуны обладают высоким пределом текучести, что выше предела текучести стальных отливок. Также характерна достаточно высокая ударная вязкость и усталостная прочность при перлитной основе.

Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2–3,8 %, кремния – 1,9–2,6 %, марганца – 0,6–0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка – около 1 %. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прес-сов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Отливки коленчатых валов массой до 2–3 т, взамен кованых валов из стали, обладают более высокой циклической вязкостью, мало-чувствительны к внешним концентраторам напряжения, обладают лучшими антифрикционными свойствами и значительно дешевле.

Обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$  ВЧ 100.

### **3.3. Твердые сплавы и металлокерамические материалы**

В современной промышленности для изготовления режущего и бурового инструмента применяют материалы, полученные методами порошковой металлургии и состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама (ВК), титана (ТК), тантала (ТТК), цементированных металлической связкой (кобальт, реже никель) – твердые сплавы. Красностойкость их 900–1000 °С, скорость резания в 5–8 раз выше, чем быстрорежущих сталей. Выпускаются: вольфрамовые (ВК3, ВК6 и др. – содержится соответственно 3 и 6 % кобальта, остальное карбиды вольфрама), титановольфрамовые (Т30К4, Т15К6, Т5К10 и др. – цифры после Т показывают процентное содержание карбидов титана) и титанотанталовольфрамовые (ТТ7К12, ТТ20К9 и др. – цифры после ТТ показывают суммарный процент карбидов титана и тантала).

ВК применяются при обработке хрупких материалов: чугуна, бронзы, стекла, фарфора; ТК – для обработки вязких материалов: латуни, низкоуглеродистых сталей; ТТК – при тяжелых условиях обработки резанием.

Вольфрам дорогостоим и дефицитен, поэтому начали использовать твердые сплавы на основе кубического нитрида бора (борозон, эльбор), гексанит, твердость которого превышает твердость алмаза, а красностойкость достигает 1930 °С – используется для обработки закаленных сталей и твердых сплавов, но он хрупок.

Используются также минералокерамические материалы, состоящие из зерен оксидов металлов или синтетических минералов, соединенных минеральной связкой – синтетическим стеклом.

Например, для изготовления *микролита* (ЦМ-332) употребляют корунд (кристаллический оксид алюминия) с добавками окиси магния. *Микролиты* характеризуются большей химической стойкостью, твердостью и красностойкостью, чем твердые сплавы, но они хрупки и имеют низкую прочность.

Находят применение керамико-металлические материалы (*керметы*), которые обладают сравнительно высокой прочностью и не теряют работоспособности до температуры 450–630 °С (на основе  $Al_2O_3$  – спеченная алюминиевая пудра (САП)), либо до температуры более 1100 °С (на основе карбида титана), а для более высоких температур – композиции на основе карбидов бора и кремния. В качестве связки в них используют в основном хром, никель, реже кобальт. *Керметы* на основе боридов переходных металлов (боролиты) отличаются высокой жаростойкостью, они могут работать в тяжелых условиях (при воздействии высоких температур и химически агрессивных газов). *Боролиты* используются для изготовления деталей ракетных двигателей и защитных износостойких покрытий.

### **3.4. Цветные металлы и сплавы на их основе.**

#### **Титан и его сплавы. Алюминий и его сплавы.**

#### **Магний и его сплавы. Медь и ее сплавы**

Цветные металлы являются более дорогими и дефицитными по сравнению с черными металлами, однако область их применения в технике непрерывно расширяется. Это сплавы на основе титана, алюминия, магния, меди.

Переход промышленности на сплавы из легких металлов значительно расширяет сырьевую базу. Титан, алюминий, магний можно получать из бедных и сложных по составу руд, отходов производства.

## *Титан и его сплавы*

Титан – серебристо-белый легкий металл с плотностью  $4,5 \text{ г/см}^3$ . Температура плавления титана зависит от степени чистоты и находится в пределах  $1660\text{--}1680 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Титан имеет низкую теплопроводность. При нормальной температуре обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосфере, в воде, в органических и неорганических кислотах, благодаря тому, что на воздухе быстро покрывается защитной пленкой плотных оксидов. При нагреве выше  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  становится очень активным элементом. Он либо растворяет почти все соприкасающиеся с ним вещества, либо образует с ними химические соединения.

Титановые сплавы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими:

- сочетание высокой прочности ( $\sigma_{\text{в}} = 800\text{--}1000 \text{ МПа}$ ) с хорошей пластичностью ( $\delta = 12\text{--}15 \%$ );
- малая плотность, обеспечивающая высокую удельную прочность;
- хорошая жаропрочность, до  $600\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах.

Однородные титановые сплавы, не подверженные старению, используют в криогенных установках до гелиевых температур.

Сплавы на основе титана можно подвергать всем видам термической обработки, химико-термической и термомеханической обработке. Упрочнение титановых сплавов достигается легированием, наклепом, термической обработкой.

Часто титановые сплавы легируют алюминием, он увеличивает прочность и жаропрочность, уменьшает вредное влияние водорода, увеличивает термическую стабильность. Для повышения износостойкости титановых сплавов их подвергают цементации или азотированию.

Основным недостатком титановых сплавов является плохая обрабатываемость режущим инструментом.

По способу производства деталей различаются деформируемые (ВТ 9, ВТ 18) и литейные (ВТ 21Л, ВТ 31Л) сплавы.

Области применения титановых сплавов:

- авиация и ракетостроение (корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, детали крепежа);
- химическая промышленность (компрессоры, клапаны, вентили для агрессивных жидкостей);
- оборудование для обработки ядерного топлива;

- морское и речное судостроение (гребные винты, обшивка морских судов, подводных лодок);
- криогенная техника (высокая ударная вязкость сохраняется до  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### *Алюминий и его сплавы*

Алюминий – легкий металл с плотностью  $2,7\text{ г/см}^3$  и температурой плавления  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Имеет гранцентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  предохраняет его от коррозии.

Механические свойства: предел прочности  $150\text{ МПа}$ , относительное удлинение  $50\%$ , модуль упругости  $7000\text{ МПа}$ .

Алюминий высокой чистоты маркируется А99 ( $99,999\%$  Al), А8, А7, А6, А5, А0 (содержание алюминия от  $99,85\%$  до  $99\%$ ).

Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, мало нагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов.

*Принцип маркировки алюминиевых сплавов.* В начале указывается тип сплава: Д – сплавы типа дюралюминов; А – технический алюминий; АК – ковкие алюминиевые сплавы; В – высокопрочные сплавы; АЛ – литейные сплавы.

Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный (закалка плюс старение); Н – нагартованный; П – полунагартованный

По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы:

- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой;
- деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;
- литейные сплавы.

Методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые сплавы (САС), испеченные алюминиевые порошковые сплавы (САП).

### *Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой*

Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем – АМц, с магнием – АМг; после обозначения элемента указывается его содержание (АМгЗ).

Магний действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость.

Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительнее растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы нагартованные и полунгартованные (АМгЗП).

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

### *Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой*

К таким сплавам относятся дюралюмины (сложные сплавы систем алюминий–медь–магний или алюминий–медь–магний–цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец.

Дюралюмины обычно подвергаются закалке с температуры 500 °С и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность достигается через 4–5 суток.

Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

Высокопрочными стареющими сплавами являются сплавы, которые кроме меди и магния содержат цинк. Сплавы В95, В96 имеют предел прочности около 650 МПа. Основной потребитель – авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

Ковочные алюминиевые сплавы АК, АК8 применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре 380–450 °С, подвергаются закалке от температуры 500–560 °С и старению при 150–165 °С в течение 6–15 ч.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300 °С.

Изготавливают поршни, лопадки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

#### *Литейные алюминиевые сплавы*

К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий – кремний (силумины), содержащие 10–13 % кремния.

Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность.

Литейные сплавы маркируются от АЛ2 до АЛ20. Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

#### *Магний и его сплавы*

Магний – очень легкий металл, его плотность – 1,74 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления – 650 °С. Магний имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку. Очень активен химически, вплоть до самовозгорания на воздухе. Механические свойства технически чистого магния (Mg1): предел прочности – 190 МПа, относительное удлинение – 18 %, модуль упругости – 4500 МПа.

Основными магниевыми сплавами являются сплавы магния с алюминием, цинком, марганцем, цирконием. Сплавы делятся на деформируемые и литейные.

Сплавы упрочняются после закалки и искусственного старения. Закалку проводят от температуры 380–420 °С, старение при температуре 260–300 °С в течение 10–24 ч. Особенностью является длительная выдержка под закалку – 4–24 ч.

#### *Деформируемые магниевые сплавы*

Магний плохо деформируется при нормальной температуре. Пластичность сплавов значительно увеличивается при горячей обработке давлением (360–520 °С). Деформируемые сплавы маркируют МА1, МА8, МА9, ВМ5–1.

Из деформируемых магниевых сплавов изготавливают детали автомашин, самолетов, прядильных и ткацких станков. В большинстве случаев эти сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью.

### *Литейные магниевые сплавы*

Литейные сплавы маркируются МЛЗ, МЛ5, ВМЛ-1. Последний сплав является жаропрочным, может работать при температурах до 300 °С.

Отливки изготавливают литьем в землю, в кокиль, под давлением. Необходимы меры, предотвращающие загорание сплава при плавке, в процессе литья.

Из литейных сплавов изготавливают детали двигателей, приборов, телевизоров, швейных машин.

Магниевые сплавы благодаря высокой удельной прочности широко используются в самолето- и ракетостроении.

### *Медь и ее сплавы*

Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку. Плотность меди 8,94 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1083 °С.

Характерным свойством меди является ее высокая электропроводность, поэтому она находит широкое применение в электротехнике. Технически чистая медь маркируется: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М2, М3 и М4 (99 % Cu).

Механические свойства меди относительно низкие: предел прочности составляет 150–200 МПа, относительное удлинение – 15–25 %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди.

Различают две группы медных сплавов: латуни – сплавы меди с цинком, бронзы – сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

### *Латуни*

Латуни могут иметь в своем составе до 45 % цинка. Повышение содержания цинка до 45 % приводит к увеличению предела прочности до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %.

По способу изготовления изделий различают латуни деформируемые и литейные.

Деформируемые латуни маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы (О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц – марганец, А – алюминий, Ц – цинк). Количество этих элементов обозначается соот-

ветствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например, сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка.

Литейные латуни также маркируются буквой Л. После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца.. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получают с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

### *Бронзы*

Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются бронзами.

Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

При маркировке деформируемых бронз на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФ10-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное – медь.

Маркировка литейных бронз также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов, и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное – медь.

*Оловянные бронзы.* При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % имеют в структуре эвтектоидную составляющую Э, состоящую из мягкой и твердой фаз. Такое строение является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую прирабатываемость, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими антифрикционными материалами.

Оловянные бронзы имеют низкую объемную усадку (около 0,8 %), поэтому используются в художественном литье.

Наличие фосфора обеспечивает хорошую жидкотекучесть.

Оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

В деформируемых бронзах содержание олова не должно превышать 6 % для обеспечения необходимой пластичности.

В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

Литейные оловянные бронзы (БрОЗЦ7С5Н1, БрО4Ц4С17) применяются для изготовления пароводяной арматуры и для отливок антифрикционных деталей типа втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников.

*Алюминиевые бронзы (БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4).*

Бронзы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют однофазное строение  $\alpha$ -твердого раствора. При содержании алюминия 9,4–15,6 % сплавы системы медь–алюминий двухфазные и состоят из  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз.

Оптимальными свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5–8 % алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10–11 % вследствие появления  $\lambda$ -фазы ведет к резкому повышению прочности и сильному снижению пластичности. Дополнительное повышение прочности для сплавов с содержанием алюминия 8–9,5 % можно достичь закалкой.

Положительные особенности алюминиевых бронз по сравнению с оловянными:

- меньшая склонность к внутрикристаллической ликвации;
- большая плотность отливок;
- более высокая прочность и жаропрочность;
- меньшая склонность к хладноломкости.

Основные недостатки алюминиевых бронз:

- значительная усадка;
- склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, что охрупчивает сплав;
- сильное газопоглощение жидкого расплава;
- самоотпуск при медленном охлаждении;
- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков сплавы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

Из алюминиевых бронз изготавливают относительно мелкие, но высокоответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев литьем и обработкой давлением. Из бронзы БрА5 штамповкой изготавливают медали и мелкую разменную монету.

*Кремнистые бронзы* (БрКМц3-1, БрК4). Применяют как заменители оловянных бронз. Они немагнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости и механическим свойствам, имеют высокие упругие свойства. Сплавы хорошо свариваются и подвергаются пайке. Благодаря высокой устойчивости к щелочным средам и сухим газам их используют для производства сточных труб, газо- и дымопроводов.

*Свинцовые бронзы* (БрС30). Они используются как высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными бронзами имеют более низкие механические и технологические свойства.

*Бериллиевые бронзы* (БрБ2), являются высококачественным пружинным материалом. Растворимость бериллия в меди с понижением температуры значительно уменьшается. Это явление используют для получения высоких упругих и прочностных свойств изделий методом дисперсионного твердения. Готовые изделия из бериллиевых бронз подвергают закалке от 800 °С, благодаря чему фиксируется при комнатной температуре пересыщенный твердый раствор бериллия в меди. Затем проводят искусственное старение при температуре 300–350 °С. При этом происходит выделение дисперсных частиц, возрастают прочность и упругость. После старения предел прочности достигает 1100–1200 МПа.

### **3.5. Абразивные инструментальные материалы**

Распространенным видом обработки поверхностей является абразивная обработка, которая за последние годы из способа понижения шероховатости поверхности превратилась в наиболее производительный способ формообразования. Абразивная обработка – единственный способ обработки современных инструментальных материалов (твердых сплавов, минералокерамики, сверхтвердых материалов). Парк станков для абразивной обработки достигает 20 % общего станочного парка, а в подшипниковой и некоторых других отраслях промышленности – 60 % и более. Развитию абразивной обработки во многом способствовало создание новых абразивных материалов и новых связей, совершенствование технологии получения абразивных

материалов и инструмента из него, применение новых методов обработки (электрохимической с наложением колебаний, в «кипящем» слое свободным абразивным зерном, электромагнитной и др.) и т. д.

Веществами повышенной твердости, применяемыми в массивном или измельченном состоянии для механической обработки, являются абразивные материалы. Они разделяются на природные (алмаз, корунд, наждак, кварцевый песок, гранат, кремень и др.) и искусственные.

**Природные материалы.** *Алмаз природный* состоит из чистого углерода с небольшим количеством примесей. В промышленных целях используют технический алмаз. Отличается высокой твердостью, теплопроводностью, высоким модулем упругости, малым коэффициентом линейного и объемного расширения, малой склонностью к адгезии с металлами, за исключением железа и его сплавов. Вместе с тем он хрупок, обладает анизотропией (прочность кристалла в различных направлениях изменяется в 500 раз). При нагревании свыше 700–800 °С переходит в графит.

*Корунд* состоит из  $\alpha$ -модификации  $Al_2O_3$ . Преимущественная область применения – для обработки металла и стекла свободными зёрнами, в меньшей степени для производства шлифовальных кругов и брусков для хонингования.

*Наждак* содержит корунд (10–30 %), связанный с магнетитом, гематитом или шпинелью. Область применения та же, что и у корунда.

*Гранат* представляет собой группу минералов, из которых наиболее пригодны для использования в абразивных целях альмандин и пироп. Шлифзерно и шлифпорошки из этих веществ применяют при изготовлении шлифовальной шкурки для обработки древесины, кожи, пластмасс; микрошлифпорошки – для полировки изделий из стекла.

*Кремень* является кварцесодержащим природным материалом. Для абразивного производства используют кремень, содержащий не менее 92 %  $SiO_2$ , не более 2 %  $CaO$  и не более 4 % глинистых минералов. Из кремния производят шлифзерно и шлифпорошки, применяемые для изготовления шлифовальной шкурки или в виде свободных зёрен при обработке древесины.

**Искусственные материалы.** *Алмаз синтетический* – абразивный материал, получаемый из графита при высоких давлении и температуре. По физическим свойствам синтетический алмаз идентичен природному и не уступает ему по абразивной способности. Применяется для всех видов алмазного абразивного инструмента.

*Эльбор* – синтетический материал на основе кубического нитрида бора (BN). Отличается высокой твердостью, теплостойкостью, высоким модулем упругости, низким коэффициентом линейного расширения, химической устойчивостью к кислотам, щелочам, инертностью к железу. При производстве возможно получать эльбор с различными свойствами и строением. Из эльбора изготавливают все виды абразивного инструмента.

*Карбид бора* состоит из 84–93 % кристаллического карбида бора ( $B_4C$ ) и небольшого количества примесей бора, оксида бора, графита и др. Отличается высокой хрупкостью, из-за чего его выпускают в виде шлифматериалов для обработки свободными зернами твердосплавного инструмента.

*Карбид кремния* состоит из  $\alpha$ -модификации SiC. Выпускается в виде зеленого и черного карбидов идентичных химических составов, отличающихся количеством примесей (у зеленого карбида кремния их меньше, поэтому черный более хрупок и обладает меньшей абразивной способностью). Из карбида кремния изготавливают все виды абразивного инструмента.

*Электрокорунд* – искусственный корунд, выпускаемый в виде нескольких разновидностей:

1. Нормальный электрокорунд содержит 93–95 % корунда, остальное – примеси, отличается высокой прочностью, вязкостью. Эти свойства обуславливают его широкое использование при обработке металлов, в том числе и на обдирочных операциях.

2. Белый электрокорунд состоит из 98–99 % корунда и примесей. Применяется для изготовления абразивного инструмента, шлифовальной шкурки, в виде микропорошков при обработке свободными зернами.

3. Хромотитанистый, хромистый или титанистый электрокорунд представляет собой электрокорунд, легированный хромом, титаном, что улучшает его абразивные свойства. Применяется для изготовления всех видов абразивного инструмента, обеспечивая значительное повышение производительности при обработке конструкционных и углеродистых сталей по сравнению с электрокорундом.

4. Циркониевый электрокорунд состоит из корунда и окиси циркония. Используется для изготовления обдирочных кругов. На обдирочных операциях стойкость таких кругов приблизительно в 40 раз превышает стойкость кругов из электрокорунда.

5. Монокорунд обладает высокими механическими и режущими свойствами. Применяется при изготовлении всех видов абразивного инструмента для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов.

6. Сферокорунд состоит из 99 %  $Al_2O_3$  и примесей. Имеет вид полых сфер. Применяется при изготовлении шлифовальных кругов для обработки мягких, вязких материалов: цветных металлов, кожи, резины, пластмасс. Корундовые сферы при работе разрушаются, обнажая новые острые режущие кромки. Это позволяет достичь более высокой производительности.

7. Формокорунд состоит из 80–87 %  $Al_2O_3$ , до 1,5 %  $Fe_2O_3$  и примесей. Зерно корунда цилиндрической (С) формы диаметром 1,2–2,8 мм или призматической (Р) формы шириной 1,2–2,8 мм, длиной 3,8–8 мм. Применяется при производстве абразивного инструмента для тяжелых обдирочных работ.

Обозначение абразивных материалов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Обозначения абразивных материалов**

Абразивный материал	Марка
Электрокорунд: нормальный	16А
	15А
	14А
	13А
	12А
	25А
	24А
	23А
	22А
	34А
белый	33А
	32А
хромистый	37А
	45А
титанистый	44А
	43А
Монокорунд	64С
	63С
Карбид кремния: зеленый	62С

Абразивный материал	Марка
черный	55С
	54С
	53С
	52С

*Абразивный инструмент.* Для абразивной обработки: шлифования, притирки, суперфиниширования и др. – служит абразивный инструмент. Он разделяется на инструмент на жесткой основе (круги, головки, сегменты, бруски), инструмент на гибкой основе (эластичные круги, шкурки, ленты), пасты, абразивные зерна.

Инструмент на жесткой основе. Характеризуется видом абразивного материала, его зернистостью, твердостью, структурой, связкой, классом точности, формой и размерами. Вращающийся инструмент дополнительно характеризуется классом неуравновешенности, а алмазный и эльборовый – концентрацией зерен в рабочем слое.

Каждый вид инструмента на жесткой основе представляет собой тело, образованное абразивными зёрнами, соединенными различными видами связок. Зерна могут свободно размещаться во всем объеме тела, находиться лишь в рабочем слое, могут быть ориентированы так, чтобы обеспечить наиболее эффективный процесс шлифования. В объеме тела инструмента или рабочего слоя имеются поры. Соотношение объема зерен, пор и связки определяет структуру инструмента.

*Характеристики инструмента.* Способность связки инструмента удерживать абразивные зерна характеризует твердость, которая определяется его назначением. Ниже приведены примеры требуемой степени твердости инструмента в зависимости от вида обработки:

ВТ – ЧТ – правка абразивных инструментов; шлифование шариков шарикоподшипников и деталей часовых механизмов;

СТ2 – Т2 – обдирочные операции, ведущиеся вручную (обработка крупных отливок и поковок); отрезка шлифовальными дисками, прорезка канавок; круглое наружное шлифование методом врезания при необходимости сохранить профиль круга, бесцентровое шлифование ведущими кругами, хонингование отверстий небольших диаметров;

С2 – СТ2 – предварительное круглое наружное и бесцентровое шлифование сталей (преимущественно незакаленных) и ковкого чугуна;

С1 – СТ1 – плоское шлифование сегментами и кольцевыми кругами на бакелитовой связке;

С2 – СТ2 – хонингование и резбошлифование кругами на бакелитовой связке; профильное шлифование, обработка прерывистых поверхностей;

СМ1 – С2 – чистовое и комбинированное круглое, наружное, бесцентровое и внутреннее шлифование стали, плоское шлифование периферией круга, резбошлифование деталей с крупным шагом;

С1 – С2 – заточка режущих инструментов вручную;

СМ1 – СМ2 – то же, но с механической или автоматической подачей;

М2 – СМ2 – плоское шлифование торцом круга;

М2 – М3 – заточка и доводка режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, шлифование труднообрабатываемых специальных сплавов.

*Структура абразивного инструмента.* По структуре инструмент разделяют на 12 групп, которым присваиваются номера от № 1 до 12. Чем выше номер, тем меньше зерен, больше связки и пор. Структуры до № 1–4 относят к закрытым (плотным), структуры № 5–8 – к средним, структуры № 9–12 – к открытым. Круги на керамической связке иногда выполняют с повышенной пористостью. Структуры таких инструментов имеют размер пор до 3 мм, что больше размера абразивных зерен, и им присваивают номера от № 13 до 18. При этом зернистость абразивного материала назначается на 1–3 разряда меньше, чем обычно.

На выбор структуры влияют материал детали, требования к качеству ее поверхности, вид и условия шлифования. Так, твердые и хрупкие материалы обрабатывают инструментом закрытых структур, чистовую обработку также осуществляют кругами закрытых структур.

*Класс точности инструмента.* В зависимости от требований к зерновому составу, предельным отклонениям поверхностей, их взаимному расположению, наличию сколов, трещин и раковин абразивный инструмент выпускается трех классов точности: АА, А и Б (шлифовальные круги), а остальные инструменты – двух классов: А и Б.

Точность изготовления инструмента из эльбора и алмазов регламентируется техническими условиями на каждый вид инструмента (ГОСТ 24106–80\*Е и ГОСТ 16191–82 – на круги и т. д.).

*Класс неуравновешенности инструмента.* Во многом определяет производительность обработки, качество поверхности детали, стойкость шлифовальных кругов. В соответствии с требованиями ГОСТ 3060–75 круги по неуравновешенности масс разделяются на 4 класса.

Круги класса точности АА должны соответствовать 1-му классу неуравновешенности, круги класса точности А – 1-му или 2-му, а круги класса точности Б – 1, 2 или 3-му классу неуравновешенности. Класс неуравновешенности кругов из эльбора на керамических связках должен быть 1-м или 2-м.

*Связка* оказывает существенное влияние на режущую способность абразивного инструмента, а следовательно, и на процесс шлифования. Предназначена для закрепления абразивных зерен и наполнителя. Основой (преобладающим компонентом) связки могут быть различные органические и неорганические материалы. Так, в керамических связках – боросиликатное стекло, в металлических – алюминий, медь, железо, цинк, олово и другие металлы, в органических – пульвербакелит и т. д. Кроме основы в связки вводятся и клеящие вещества (декстрин, жидкое стекло) и отвердители (уротропин). В состав органических связок для алмазного инструмента входят наполнители (карбид бора в связку марки Б1, железный порошок в связку марки Б2, карбид кремния зеленый в связку марки Б4, дробленая резина в связку марки БР).

Вид связки маркируется на инструменте буквенными индексами: «К», «Б», «В» – абразивные инструменты из обычных материалов; «К», «О», «М» – абразивные инструменты из эльбора; связки для алмазного инструмента маркируются в соответствии с их разновидностями. Иногда (например, для отрезных кругов на бакелитовой связке) в состав связки вводят упрочняющие элементы. При этом к обозначению связки добавляют индекс «у». Кроме приведенных связок при изготовлении высокопористых кругов находят применение поропластовая или эпоксидно-каучуковая связка. Поропластовая связка – вспененный поливинилформаль. Пористость кругов – до 80 %. Эпоксидно-каучуковая связка (ЭК) на основе эпоксидноноволачного блоксополимера отличается повышенной химической стойкостью.

*Концентрация* зерен в абразивном слое является характеристикой режущей способности инструмента из эльбора и алмазного инструмента. За 100%-ю концентрацию принимается содержание 0,878 г (4,4 карата) зерен эльбора или алмаза в 1 см<sup>3</sup> абразивного слоя.

В промышленности находят применение инструменты с 25-, 50-, 75-, 100-, 125- и 150%-й концентрацией эльбора или алмаза. При маркировке алмазного инструмента концентрация обозначается цифровым индексом. Относительная 25%-я концентрация маркируется цифрой 1, 50%-я – цифрой 2, 75%-я – цифрой 3, 100%-я – цифрой 4, 125%-я – цифрой 5, 150%-я – цифрой 6. При маркировке инструмента из эльбора цифровой индекс должен соответствовать относительной концентрации (100%-я концентрация не маркируется).

*Зернистость инструмента.* Выбирается в зависимости от условий обработки. Так, зернистость 160 и более рекомендуется при обдирочном силовом шлифовании; 125–80 – при обдирочных операциях, при зачистке отливок, поковок, штамповочных и других заготовок; 80–50 – при плоском шлифовании торцом круга, заточке средних и крупных резцов, правке абразивного инструмента, отрезке; 6–25 – при предварительном и комбинированном шлифовании (предварительное и окончательное шлифование выполняются без съема изделия со станка), заточке режущего инструмента; 32–6 – при чистовом шлифовании, обработке профильных поверхностей, заточке мелкого инструмента, шлифовании хрупких материалов; 12–6 – при отделочном шлифовании, доводке твердых сплавов, доводке режущего инструмента, предварительном хонинговании, заточке тонких лезвий; 6–4 – при отделочном шлифовании металлов, стекла, мрамора и т. п., резьбошлифовании, чистовом хонинговании; М40 и мельче – при суперфинишировании, окончательном хонинговании, доводке тонких лезвий измерительных поверхностей калибров, резьбошлифовании изделий с мелким шагом.

*Шлифовальные круги общего назначения.* Твердость кругов – по ГОСТ 18118–79\*, ГОСТ 19202–80, ГОСТ 21322–75\*Е; класс точности кругов — АА, А или Б; зерновой состав – с индексами В и П для кругов класса АА; В; П и Н – для кругов класса А; В, П, Н и Д – для кругов класса Б. Классы неуравновешенности: 1 – для кругов класса АА; 1 и 2 – для кругов класса А; 1, 2 и 3 – для кругов класса точности Б.

Механическая прочность кругов должна обеспечивать работу при окружных скоростях: 30; 35; 40; 50; 60; 80 м/с (круг типа ПП); 30;

35; 40; 50; 60 м/с (круг типа ЧП); 25; 30; 35 м/с (круги типов ПН, К); 20; 25; 30 м/с (круги типов ЧК; ЧЦ; Т; 1Т); 15; 25; 30; 35; 50 м/с (прочие).

Области применения шлифовальных кругов различного профиля:

ПП – круглое наружное шлифование изделий при  $D < 1000$  мм. Круглое внутреннее шлифование отверстий при  $D \leq 150$  мм. Бесцентровое шлифование деталей при  $D \leq 600$  мм. Плоское шлифование периферией круга. Заточка инструментов, резьбо-, шлице-, зубошлифование;

– ПВ; ПВК; ПВДК; ПВД – то же, но с возможностью более прочного закрепления во фланцах, уменьшения площади соприкосновения боковой поверхности с буртиками и фланцами изделий, возможностью подрезания торцов, буртиков, уступов;

– ПН – обдирочное шлифование;

– 2П, 3П – заточка многолезвийных инструментов, шлифование зубьев шестерен, резьбошлифование;

– К – плоское шлифование;

– ЧЦ, ЧК – заточка инструментов, плоское шлифование;

– Т, 1Т – заточка и доводка передних граней зубьев фрез, заточка червячных фрез, обработка зубьев долбяков.

Маркировка кругов должна включать товарный знак предприятия-изготовителя, условное обозначение круга, окружную скорость круга без указания единицы (м/с), номер партии.

Механическая прочность кругов из эльбора должна обеспечивать работу при окружных скоростях 35, 40 и 50 м/с.

Маркировка кругов диаметром более 200 мм из эльбора должна включать: товарный знак предприятия-изготовителя, тип, размер круга по ГОСТ 17123–79\*Е, марку эльбора, зернистость, степень твердости кругов на керамической связке, марку связки кругов на керамической связке К, окружную скорость круга (кроме 35 м/с) на керамической связке, относительную концентрацию эльбора (100%-я концентрация не маркируется), номер партии (или круга), обозначение стандарта. В маркировку кругов диаметром 50–2000 мм входят: зернистость, твердость, относительная 100%-я концентрация.

Алмазные круги должны иметь маркировку, которая содержит: товарный знак предприятия-изготовителя, марку и зернистость алмазного порошка, относительную концентрацию алмазов, марку связки, номер круга, последние две цифры года изготовления.

Примеры условного обозначения абразивного инструмента:

– круг шлифовальный типа ПП с размерами  $D \times d \times H$ , мм, из белого электрокорунда марки 24А, зернистостью 10-П, степенью твердости С2, со структурой № 7, на керамической связке К5, с рабочей скоростью 35 м/с, класс точности А, 1-го класса неуравновешенности (ГОСТ 2424–83) – ПП  $D \times H \times d$  24А 10-П С2 7 К5 35 м/с А1 кл. ГОСТ 2424–83;

– круг эльборовый типа 1Е1 с размерами  $D \times H \times d$ , мм, толщиной эльбороносного слоя  $S$ , из эльбора – 1Е1  $D \times H \times d \times S$  ГОСТ 17123–79\* Е;

– круг алмазный формы 1А1 с размерами  $D \times H \times d \times C$  – 2720-0139 ГОСТ 16167–80.

Типы кругов и область их применения приведены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

Типы шлифовальных кругов (ГОСТ 2424–83)

Обозначение		Наименование
цифровое	буквенное	
1	ПП	Плоские прямого профиля
4	2П	Плоские с двухсторонним коническим профилем
3	3П	Плоские с 45°-м коническим профилем
4	4П	Плоские с малым углом конического профиля
5	ПВ	Плоские с выточкой
23	ПВК	Плоские с конической выточкой
7	ПВД	Плоские с двухсторонней выточкой
26	ПВДК	Плоские с двухсторонней конической выточкой
1	ПР	Плоские рифленые
36	ПН	Плоские наращенные
–	Д	Диски
2	К	Кольца
6	ЧЦ	Чашки цилиндрические
11	ЧК	Чашки конические
14	1Т, 2Т, 3Т, 4Т	Круги-тарелки

## Область применения абразивного инструмента

Абразивный материал	Марка	Абразивный инструмент	Область применения
Электрокорунд нормальный	13А	Свободное зерно, пасты, круги, сегменты	Обдирочное шлифование стальных заготовок кругами на органических связках. Отделочные работы незакрепленным зерном
	14А	Круги, бруски	Шлифование стальных заготовок кругами на органических и неорганических связках
	15А, 16А	Круги, бруски, шлифовальная шкурка	Шлифование стальных заготовок кругами из шлифовального зерна и шлифовальных порошков на органической связке. Отделка стальных заготовок незакрепленным зерном, пастами и брусками
Электрокорунд белый	23А	Свободное зерно, пасты, круги, бруски	То же
	22А, 24А	Круги, бруски, шлифовальная шкурка	Шлифование стальных заготовок кругами из шлифовального зерна и шлифовальных порошков на всех связках. Отделочные работы шлифовальной шкуркой
	25А	Круги, бруски, шлифовальная шкурка	Скоростное шлифование, доводка стальных закаленных заготовок кругами, брусками из шлифованного зерна, шлифовальных порошков и микропорошков на керамических связках. Шлифование труднообрабатываемых сталей и сплавов. Отделочные работы шлифовальной шкуркой
Электрокорунд хромистый	33А, 34А	Свободное зерно, пасты, круги, бруски	Шлифование, доводка и отделка изделий из углеродистых и конструкционных сталей в незакаленном и закаленном состояниях
Электрокорунд титанистый	37А	Круги, сегменты	Скоростное шлифование стальных заготовок кругами на керамической и бакелитовой связках

Абразивный материал	Марка	Абразивный инструмент	Область применения
Электрокорунд циркониевый	38А	Круги, сегменты	Обдирочное силовое шлифование стальных заготовок кругами на бакелитовой связке при высоких скоростях и подачах
Монокорунд	43А	Свободное зерно, пасты, круги, бруски, шлифовальная шкурка	Шлифование и заточка труднообрабатываемых сталей и сплавов инструментами из шлифовального зерна и шлифовальных порошков на керамических связках
	44А, 45А	Бруски, шлифовальная шкурка	Отделка и доводка незакрепленным зерном и шлифовальной шкуркой
Электрокорунд хромотитанистый	91А, 92А	Круги	Шлифование на получистовых и чистовых режимах закаленных изделий из углеродистых, конструкционных, быстрорежущих и труднообрабатываемых сталей кругами на всех связках
	93А, 94А	Круги	Шлифование стальных закаленных и незакаленных заготовок кругами на керамической и бакелитовой связках
		Свободное зерно, пасты	Отделка и доводка чугунных заготовок, а также заготовок из цветных металлов и их сплавов незакрепленными микропорошками
Карбид кремния черный	52С	Круги, бруски, сегменты, шлифовальная шкурка	Обработка заготовок из чугуна, цветных металлов и вольфрамовых твердых сплавов инструментами из шлифовальных порошков и микропорошков на всех связках. Шлифование, отделка и доводка незакрепленным зерном и шлифовальной шкуркой
	54С	Круги, бруски, сегменты, шлифовальная шкурка	Обработка заготовок из чугуна, цветных металлов и вольфрамовых твердых сплавов инструментами из шлифовального зерна на всех связках. Отделочные работы шлифовальной шкуркой

Абразивный материал	Марка	Абразивный инструмент	Область применения
Карбид кремния зеленого	62С	Свободное зерно, пасты, круги, бруски, шлифовальная шкурка	Обработка заготовок из чугуна, алюминия, меди, гранита, мрамора инструментами из шлифовальных порошков на всех связках. Отделка и доводка незакаленным зерном и шлифовальной шкуркой
	63С	Круги, бруски, сегменты, шлифовальная шкурка	Обработка титановых и титанотанталовых твердых сплавов инструментами из шлифовального зерна на всех связках. Отделка и доводка шлифовальной шкуркой
	64С	Свободное зерно, круги, бруски	Обработка заготовок из чугуна, алюминия, меди, гранита, мрамора инструментами из шлифовального зерна и микропорошков на всех связках. Скоростное шлифование заготовок из чугунов кругами на керамической связке. Отделка и доводка незакаленным зерном и шлифовальной шкуркой
Карбид бора	КБ	Свободное зерно, пасты	Шлифование, отделка и доводка незакаленным зерном деталей из твердых сплавов и чугунов

## 4. СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

### *Конструкционные стали*

К конструкционным сталям, применяемым для изготовления разнообразных деталей машин, предъявляют следующие требования:

- сочетание высокой прочности и достаточной вязкости;
- хорошие технологические свойства;
- экономичность;
- недефицитность.

Высокая конструкционная прочность стали, достигается путем рационального выбора химического состава, режимов термической обработки, методов поверхностного упрочнения, улучшением металлургического качества.

Решающая роль в составе конструкционных сталей отводится углероду. Он увеличивает прочность стали, но снижает пластичность и вязкость, повышает порог хладноломкости. Поэтому его содержание регламентировано и редко превышает 0,6 %.

Влияние на конструкционную прочность оказывают легирующие элементы. Повышение конструкционной прочности при легировании связано с обеспечением высокой прокаливаемости, уменьшением критической скорости закалки, измельчением зерна.

Применение упрочняющей термической обработки улучшает комплекс механических свойств.

Металлургическое качество влияет на конструкционную прочность. Чистая сталь при одних и тех же прочностных свойствах имеет повышенные характеристики надежности.

### *Углеродистые стали*

Низкоуглеродистые стали 05кп, 08, 10, 10пс обладают малой прочностью и высокой пластичностью. Применяются без термической обработки для изготовления малонагруженных деталей – шайб, прокладок и т. п.

Среднеуглеродистые стали 35, 40, 45 применяются после нормализации, термического улучшения, поверхностной закалки.

В нормализованном состоянии по сравнению с низкоотпущенным обладают большей прочностью, но меньшей пластичностью. После термического улучшения наблюдается наилучшее сочетание механических свойств. После поверхностной закалки обладают высокой поверхностной твердостью и сопротивлением износу.

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70,75 используются как ресорно-пружинные после среднего отпуска. В нормализованном состоянии – для прокатных валков, шпинделей станков.

Достоинства углеродистых качественных сталей – дешевизна и технологичность. Но из-за малой прокаливаемости эти стали не обеспечивают требуемый комплекс механических свойств в деталях сечением более 20 мм.

### *Легированные стали*

Элементы, специально вводимые в сталь в определенных концентрациях с целью изменения ее строения и свойств, называются легирующими элементами, а стали – легированными.

Содержание легирующих элементов может изменяться в очень широких пределах: хром или никель – 1 % и более процентов; ванадий, молибден, титан, ниобий – 0,1–0,5 %; также кремний и марганец – более 1 %. При содержании легирующих элементов до 0,1 % – микролегирование.

В конструкционных сталях легирование осуществляется с целью улучшения механических свойств (прочности, пластичности). Кроме того, меняются физические, химические, эксплуатационные свойства.

Легирующие элементы повышают стоимость стали, поэтому их использование должно быть строго обосновано.

Достоинства легированных сталей:

- особенности обнаруживаются в термически обработанном состоянии, поэтому изготавливаются детали, подвергаемые термической обработке;

- улучшенные легированные стали обнаруживают более высокие показатели сопротивления пластическим деформациям ( $\sigma_T$ );

- легирующие элементы стабилизируют аустенит, поэтому прокаливаемость легированных сталей выше;

- возможно использование более «мягких» охладителей (снижается брак по закалочным трещинам и короблению), т. к. тормозится распад аустенита;

- повышаются запас вязкости и сопротивление хладоломкости, что приводит к повышению надежности деталей машин.

Недостатки:

- подвержены обратной отпускной хрупкости II рода;

- в высоколегированных сталях после закалки остается аустенит остаточный, который снижает твердость и сопротивляемость усталости, поэтому требуется дополнительная обработка;

– склонны к дендритной ликвации, так как скорость диффузии легирующих элементов в железе мала. Дендриты обедняются, а границы – междендритный материал – обогащаются легирующим элементом. Образуется строчечная структура послековки и прокатки, неоднородность свойств вдоль и поперек деформирования, поэтому необходим диффузионный отжиг;

– склонны к образованию флокенов.

Флокены – светлые пятна в изломе в поперечном сечении – мелкие трещины с различной ориентацией. Причина их появления – выделение водорода, растворенного в стали.

При быстром охлаждении от 200 °С водород остается в стали, выделяясь из твердого раствора, вызывает большое внутреннее давление, приводящее к образованию флокенов.

Меры борьбы: уменьшение содержания водорода при выплавке и снижение скорости охлаждения в интервале флокенообразования.

### *Цементуемые стали*

Используются для изготовления деталей, работающих на износ и подвергающихся действию переменных и ударных нагрузок. Детали должны сочетать высокую поверхностную прочность и твердость и достаточную вязкость сердцевины.

Цементации подвергаются низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,25 %, что позволяет получить вязкую сердцевину. Для деталей, работающих с большими нагрузками, применяются стали с повышенным содержанием углерода (до 0,35 %).

С повышением содержания углерода прочность сердцевины увеличивается, а вязкость снижается. Детали подвергаются цианированию и нитроцементации.

Цементуемые углеродистые стали 15, 20, 25 используются для изготовления деталей небольшого размера, работающих в условиях изнашивания при малых нагрузках (втулки, валики, оси, шпильки и др.). Твердость на поверхности составляет 60–64 HRC, сердцевина остается мягкой.

Цементуемые легированные стали применяют для более крупных и тяжело нагруженных деталей, в которых необходимо иметь, кроме высокой твердости поверхности, достаточно прочную сердцевину (кулачковые муфты, поршни, пальцы, втулки).

Хромистые стали 15X, 20X используются для изготовления небольших изделий простой формы, цементуемых на глубину 1–1,5 мм. При закалке с охлаждением в масле, выполняемой после цементации,

сердцевина имеет бейнитное строение. Вследствие этого хромистые стали обладают более высокими прочностными свойствами при несколько меньшей пластичности в сердцевине и большей прочностью в цементованном слое.

Дополнительное легирование хромистых сталей ванадием (сталь 15ХФ), способствует получению более мелкого зерна, что улучшает пластичность и вязкость.

Никель увеличивает глубину цементованного слоя, препятствует росту зерна и образованию грубой цементитной сетки, оказывает положительное влияние на свойства сердцевины. Хромоникелевые стали 20ХН, 12ХНЗА применяют для изготовления деталей средних и больших размеров, работающих на износ при больших нагрузках (зубчатые колеса, шлицевые валы). Одновременное легирование хромом и никелем, который растворяется в феррите, увеличивает прочность, пластичность и вязкость сердцевины и цементованного слоя. Стали мало чувствительны к перегреву. Большая устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращений обеспечивает высокую прокаливаемость хромоникелевых сталей и позволяет проводить закалку крупных деталей с охлаждением в масле и на воздухе.

Стали, дополнительно легированные вольфрамом или молибденом (18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА), применяют для изготовления крупных тяжело нагруженных деталей. Эти стали являются лучшими конструкционными сталями, но дефицитность никеля ограничивает их применение.

Хромомарганцевые стали применяют вместо дорогих хромоникелевых, однако эти стали менее устойчивы к перегреву и имеют меньшую вязкость. Введение небольшого количества титана (0,06–0,12 %) уменьшает склонность стали к перегреву (стали 18ХГТ, 30ХГТ).

С целью повышения прочности применяют легирование бором (0,001–0,005 %) 20ХГР, но бор способствует росту зерна при нагреве.

#### *Улучшаемые стали*

Стали, подвергаемые термическому улучшению, широко применяют для изготовления различных деталей, работающих в сложных напряженных условиях (при действии разнообразных нагрузок, в том числе переменных и динамических). Стали приобретают структуру сорбита, хорошо воспринимающую ударные нагрузки. Важное значение имеет сопротивление хрупкому разрушению.

Улучшению подвергаются среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,30–0,50 %.

Улучшаемые углеродистые стали 35, 40, 45 дешевы, из них изготавливают детали, испытывающие небольшие напряжения (сталь 35), и детали, требующие повышенной прочности (стали 40, 45). Но термическое улучшение этих сталей обеспечивает высокий комплекс механических свойств только в деталях небольшого сечения, т. к. стали обладают низкой прокаливаемостью. Стали этой группы можно использовать и в нормализованном состоянии.

Детали, требующие высокой поверхностной твердости при вязкой сердцевине (зубчатые колеса, валы, оси, втулки), подвергаются поверхностной закалке токами высокой частоты. Для снятия напряжений проводят низкий отпуск.

#### *Улучшаемые легированные стали*

Улучшаемые легированные стали применяют для более крупных и более нагруженных ответственных деталей. Стали обладают лучшим комплексом механических свойств: выше прочность при сохранении достаточной вязкости и пластичности, ниже порог хладоломкости.

Хромистые стали 30Х, 40Х, 50Х используются для изготовления небольших средненагруженных деталей. Эти стали склонны к отпускной хрупкости, поэтому после высокого отпуска охлаждение должно быть быстрым.

Повышение прокаливаемости достигается микролегированием бором (35ХР). Введение в сталь ванадия значительно увеличивает вязкость (40ХФА).

Хромокремнистые (33ХС) и хромокремниймарганцевые (хромансил) (25ХГСА) стали обладают высокой прочностью и умеренной вязкостью. Стали хромансилы обладают высокой свариваемостью, из них изготавливают стыковочные сварные узлы, кронштейны, крепежные и другие детали. Широко применяются в автомобилестроении и авиации.

Хромоникелевые стали 45ХН, 30ХН3А отличаются хорошей прокаливаемостью, прочностью и вязкостью, но чувствительны к обратимой отпускной хрупкости. Для уменьшения чувствительности вводят молибден или вольфрам. Ванадий способствует измельчению зерна.

Стали 36Х2Н2МФА, 38ХН3ВА и другие обладают лучшими свойствами, относятся к мартенситному классу, слабо разупрочняются при нагреве до 300–400 °С. из них изготавливаются валы и роторы турбин, тяжело нагруженные детали редукторов и компрессоров.

### *Высокопрочные стали*

Высокопрочными называют стали, имеющие предел прочности более 1500 МПа, который достигается подбором химического состава и оптимальной термической обработки.

Такой уровень прочности можно получить в среднеуглеродистых легированных сталях (30ХГСН2А, 40ХН2МА), применяя закалку с низким отпуском (при температуре 200–250 °С) или изотермическую закалку с получением структуры нижнего бейнита.

После изотермической закалки среднеуглеродистые легированные стали имеют несколько меньшую прочность, но большую пластичность и вязкость. Поэтому они более надежны в работе, чем закаленные и низкоотпущенные.

При высоком уровне прочности закаленные и низкоотпущенные среднеуглеродистые стали обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжения, склонностью к хрупкому разрушению, поэтому их рекомендуется использовать для работы в условиях плавного нагружения.

Легирование вольфрамом, молибденом, ванадием затрудняет разупрочняющие процессы при температуре 200–300 °С, способствует получению мелкого зерна, понижает порог хладоломкости, повышает сопротивление хрупкому разрушению.

Высокая прочность может быть получена и за счет термомеханической обработки.

Стали 30ХГСА, 38ХН3МА после низкотемпературной термомеханической обработки имеют предел прочности 2800 МПа, относительное удлинение и ударная вязкость увеличиваются в два раза по сравнению с обычной термической обработкой. Это связано с тем, что частичное выделение углерода из аустенита при деформации облегчает подвижность дислокаций внутри кристаллов мартенсита, что способствует увеличению пластичности.

Мартенситно-старяющие стали (03Н18К9М5Т) превосходят по конструкционной прочности и технологичности среднеуглеродистые легированные стали. Они обладают малой чувствительностью к надразам, высоким сопротивлением хрупкому разрушению и низким порогом хладоломкости при прочности около 2000 МПа.

Мартенситно-старяющие стали представляют собой безуглеродистые сплавы железа с никелем (8–25 %), дополнительно легированные кобальтом, молибденом, титаном, алюминием, хромом и другими элементами. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода в результате закалки в воде или на воздухе фиксируется высокопластичный, но низкопрочный железоникелевый мартенсит, пересыщенный легирующими элементами. Основное упрочнение происходит в процессе старения при температуре 450–550 °С за счет выделения из мартенситной матрицы когерентно с ней связанных мелкодисперсных фаз. Мартенситно-старяющие стали обладают высокой конструкционной прочностью в интервале температур от криогенных до 500 °С и рекомендуются для изготовления корпусов ракетных двигателей, стволов артиллерийского и стрелкового оружия, корпусов подводных лодок, батискафов, высоконагруженных дисков турбомашин, зубчатых колес, шпинделей, червяков и т. д.

### *Пружинные стали*

Пружины, рессоры и другие упругие элементы являются важнейшими деталями различных машин и механизмов. В работе они испытывают многократные переменные нагрузки. Под действием нагрузки пружины и рессоры упруго деформируются, а после прекращения действия нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму и размеры. Особенностью работы является то, что при значительных статических и ударных нагрузках они должны испытывать только упругую деформацию, остаточная деформация не допускается. Основные требования к пружинным сталям – обеспечение высоких значений пределов упругости, текучести, выносливости, а также необходимой пластичности и сопротивления хрупкому разрушению, стойкости к релаксации напряжений.

Пружины работают в области упругих деформаций, когда между действующим напряжением и деформацией наблюдается пропорциональность. При длительной работе пропорциональность нарушается из-за перехода части энергии упругой деформации в энергию пластической деформации. Напряжения при этом снижаются.

Самопроизвольное снижение напряжений при постоянной суммарной деформации называется релаксацией напряжений.

Релаксация приводит к снижению упругости и надежности работы пружин.

Пружины изготавливаются из углеродистых (65, 70) и легированных (60С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР) конструкционных сталей.

Для упрочнения пружинных углеродистых сталей применяют холодную пластическую деформацию посредством дробеструйной и гидроабразивной обработок, в процессе которых в поверхностном слое деталей наводятся остаточные напряжения сжатия.

Повышенные значения предела упругости получают после закалики со средним отпуском при температуре 400–480 °С.

Для сталей, используемых для пружин, необходимо обеспечить сквозную прокаливаемость, чтобы получить структуру троостита по всему сечению.

Упругие и прочностные свойства пружинных сталей достигаются при изотермической закалке.

Пружинные стали легируют элементами, которые повышают предел упругости – кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, бором.

В целях повышения усталостной прочности не допускается обезуглероживание при нагреве под закалку и требуется высокое качество поверхности.

Пружины и другие элементы специального назначения изготавливают из высокохромистых мартенситных (30X13), мартенситно-старяющих (03X12H10Д2Т), аустенитных нержавеющей (12X18H10Т), аустенито-мартенситных (09X15H8Ю), быстрорежущих (Р18) и других сталей и сплавов.

### *Шарикоподшипниковые стали*

Подвергаются воздействию высоких нагрузок переменного характера. Основными требованиями являются высокая прочность и износостойкость, высокий предел выносливости, отсутствие концентраторов напряжений, неметаллических включений, полостей, ликваций.

Шарикоподшипниковые стали характеризуются высоким содержанием углерода (около 1 %) и наличием хрома (ШХ9, ШХ15).

Высокое содержание углерода и хрома после закалики обеспечивает структуру мартенсит плюс карбиды высокой твердости, износостойкости, необходимой прокаливаемости.

Дальнейшее увеличение прокаливаемости достигается дополнительным легированием марганцем, кремнием (ШХ15СГ).

Повышены требования в отношении чистоты и равномерности распределения карбидов, в противном случае может произойти выкрашивание. Стали подвергаются строгому металлургическому контролю на наличие пористости, неметаллических включений, карбидной сетки, карбидной ликвации.

Термическая обработка включает отжиг, закалку и отпуск. Отжиг проводят послековки для снижения твердости и подготовки структуры к закалке. Температура закалки составляет 790–880 °С в зависимости от массивности деталей. Охлаждение – в масле (кольца, ролики), в водном растворе соды или соли (шарики). Отпуск стали проводят при температуре 150–170 °С в течение 1–2 ч. Обеспечивается твердость 62–66 HRC.

Из стали ШХ9 изготавливают шарики и ролики небольших размеров, из стали ШХ15 – более крупные.

Детали подшипников качения, испытывающие большие динамические нагрузки (подшипники прокатных станков), изготавливают из сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ с последующей глубокой цементацией на глубину 5–10 мм. Для деталей подшипников, работающих в азотной кислоте и других агрессивных средах, используется сталь 95Х18.

#### *Стали для изделий, работающих при низких температурах*

Для изделий, работающих при низких температурах, необходимо применять стали с пониженным порогом хладоломкости. Особенно сильно понижены температурные пороги хладоломкости в никельсодержащих сталях. Эффективными материалами являются низколегированные малоуглеродистые стали, которые обладают хорошей свариваемостью.

В строительных металлоконструкциях наибольший эффект достигается при использовании термомеханически упрочненного проката.

Для обеспечения высокого комплекса механических свойств деталей машин используются малоуглеродистые стали, легированные элементами, способствующими дисперсионному упрочнению и образованию мелкозернистой структуры после термической обработки, 10ХСНД, 15Г2СФ, 12ГН2МФАЮ.

Для работы при сверхнизких температурах применяют криогенные стали и сплавы для изготовления емкостей для хранения и перевозки сжиженных газов, имеющих очень низкую температуру кипения (кислород – –183 °С, водород – –253 °С). Основными материалами для работы в подобных условиях являются аустенитные стали с повышенным содержанием никеля 10Х14Г14Н4Т, 10Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6.

#### *Износостойкие стали*

Для работы в условиях изнашивания, сопровождаемого большими удельными нагрузками, используется высокомарганцевая сталь 110Г13Л, имеющая в своем составе 1–1,4 % углерода, 12–14 % мар-

ганца. Сталь имеет аустенитную структуру и относительно низкую твердость (200–250 НВ). В процессе работы, когда на деталь действуют высокие нагрузки, которые вызывают в материале напряжения, превосходящие предел текучести, происходит интенсивное наклепывание стали и рост ее твердости и износостойкости. При этом сталь сохраняет высокую вязкость. Благодаря этим свойствам сталь широко используется для изготовления корпусов шаровых мельниц, щек камнедробилок, крестовин рельсов, гусеничных траков, козырьков землерезов и т. д.

Склонность к интенсивному наклепу является характерной особенностью сталей аустенитного класса.

### *Автоматные стали*

Автоматными называют стали, обладающие повышенной обрабатываемостью резанием.

Эффективным металлургическим приемом повышения обрабатываемости резанием является введение в сталь серы, селена, теллура, кальция, которые изменяют состав неметаллических включений, а также свинца, который образует собственные включения.

Автоматные стали А12, А20 с повышенным содержанием серы и фосфора используются для изготовления малонагруженных деталей на станках автоматах (болты, винты, гайки, мелкие детали швейных, текстильных, счетных и других машин). Эти стали обладают улучшенной обрабатываемостью резанием, поверхность деталей получается чистой и ровной. Износостойкость может быть повышена цементацией и закалкой.

Стали А30 и А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие нагрузки.

У автоматных сталей, содержащих свинец, (АС11, АС40), повышается стойкость инструмента в 1–3 раза и скорость резания на 25–50 %.

Легированные хромистые и хромоникелевые стали с присадкой свинца и кальция (АЦ45Г2, АСЦ30ХМ, АС20ХГНМ) используются для изготовления нагруженных деталей в автомобильной и тракторной промышленности.

Автоматные стали подвергают диффузионному отжигу при температуре 1100–1150 °С для устранения ликвации серы.

### *Стали для режущего инструмента*

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия).

Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500–900 °С, поэтому важным свойством является теплостойкость, т. е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве (красностойкость).

#### *Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435)*

Содержат 0,65–1,35 % углерода.

Стали У7–У13А – обладают высокой твердостью, хорошо шлифуются, дешевы и недефицитны.

Из сталей марок У7, У8А изготавливают инструмент для работы по дереву и инструмент ударного действия, когда требуется повышенная вязкость – пуансоны, зубила, штампы, молотки.

Стали марок У9, У12 обладают более высокой твердостью и износостойкостью – используются для изготовления сверл, метчиков, фрез.

Сталь У13 обладает максимальной твердостью, используется для изготовления напильников, граверного инструмента.

Для снижения твердости и создания благоприятной структуры все инструментальные стали до изготовления инструмента подвергают отжигу.

Для заэвтектоидных сталей проводят сфероидизирующий отжиг, в результате которого цементит вторичный приобретает зернистую форму. Регулируя скорость охлаждения, можно получить любой размер зерен.

Окончательная термическая обработка – закалка с последующим отпуском.

Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных – неполную. Структура закаленных сталей или мартенсит, или мартенсит и карбиды.

Температура отпуска выбирается в зависимости от твердости, необходимой для инструмента.

Для инструментов ударного действия, требующих повышенной вязкости, из сталей У7, У8 отпуск проводят при температуре 280–300 °С, что обеспечивает твердость HRC 56–58.

Для напильников, метчиков, плашек отпуск проводят при температуре 150–200 °С, при этом обеспечивается получение максимальной твердости – HRC 62–64.

Основными недостатками углеродистых инструментальных сталей является их невысокая прокаливаемость (5–10 мм), низкая теплоустойчивость (до 200 °С), т. е. инструменты могут работать только при невысоких скоростях резания.

### *Легированные инструментальные стали*

Содержат 0,9–1,4 % углерода. В качестве легирующих элементов содержат хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний и др. Общее содержание легирующих элементов до 5 %.

Высокая твердость и износостойкость в основном определяются высоким содержанием углерода. Легирование используется для повышения закаливаемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости.

Термическая обработка включает закалку и отпуск.

Проводят закалку с температуры 800–850 °С в масло или ступенчатую закалку, что уменьшает возможность коробления и образования закалочных трещин.

Отпуск проводят низкотемпературный, при температуре 150–200 °С, что обеспечивает твердость HRC 61–66. Иногда, для увеличения вязкости, температуру отпуска увеличивают до 300 °С, но при этом наблюдается снижение твердости HRC 55–60.

Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС и 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость.

Повышенное содержание кремния (сталь 9ХС) способствует увеличению прокаливаемости до 40 мм и повышению устойчивости мартенсита при отпуске. Недостатками сталей, содержащих кремний, являются чувствительность их к обезуглероживанию при термообработке, плохая обрабатываемость резанием и деформированием из-за упрочнения феррита кремнием.

Повышенное содержание марганца (стали ХВГ, 9ХВСГ) способствует увеличению количества остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при закалке. Это особенно важно для инструмента, имеющего большую длину при малом диаметре, например, протяжек.

Хром увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки.

Стали используются для изготовления инструмента и ударного, и режущего.

«Алмазная» сталь ХВ5 содержит 5 % вольфрама. Благодаря присутствию вольфрама в термически обработанном состоянии имеет избыточную мелкодисперсную карбидную фазу. Твердость составляет HRC 65–67. Сталь используется для изготовления инструмента, сохраняющего длительное время острую режущую кромку и высокую размерную точность (развертки, фасонные резцы, граверный инструмент).

### *Быстрорежущие стали*

Стали получили свое название за свойства. В следствии высокой теплостойкости (550–650 °С), изготовленные из них инструменты могут работать с достаточно высокими скоростями резания.

Стали содержат 0,7–1,5 % углерода, до 18 % основного легирующего элемента – вольфрама, до 5 % хрома и молибдена, до 10 % кобальта.

Добавление ванадия повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость. Кобальт повышает теплостойкость до 650 °С и вторичную твердость HRC 67–70.

Основными видами режущих инструментов из быстрорежущей стали являются резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики машинные, ножи для резки бумаги. Часто из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента.

### *Стали для измерительных инструментов*

Основными требованиями, предъявляемыми к сталям, из которых изготавливаются измерительные инструменты, являются высокая твердость и износоустойчивость, стабильность в размерах в течение длительного времени. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения и сведением к минимуму структурных превращений во времени.

Для изготовления измерительных инструментов применяются:

– высокоуглеродистые инструментальные стали, легированные и углеродистые (стали У12, Х, Х9, ХГ), после закалки и стабилизирующего низкотемпературного (120–170 °С) отпуска в течение 10–30 ч. До отпуска желательно провести обработку холодом. Получают твердость 62–67 HRC;

– малоуглеродистые стали (сталь 15, 20) после цементации и закалки с низким отпуском;

– нитралои (сталь 38ХМЮА) после азотирования на высокую твердость.

## *Штамповые стали*

Инструмент, применяемый для обработки металлов давлением (штампы, пуансоны, матрицы) изготавливают из штамповых сталей.

Различают стали для штампов холодного и горячего деформирования.

### *Стали для штампов холодного деформирования*

Стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью (чтобы воспринимать ударные нагрузки), сопротивлением пластическим деформациям.

Для штампов небольших размеров (до 25 мм) используют углеродистые инструментальные стали У10, У11, У12 после закалки и низкого отпуска на твердость 57–59 HRC. Это позволяет получить хорошую износостойкость и ударную вязкость.

Для более крупных изделий применяют легированные стали X, X9, X6ВФ. Для повышения износостойкости инструмента после термической обработки проводят цианирование или хромирование рабочих поверхностей.

Для уменьшения брака при закалке необходимо медленное охлаждение в области температур мартенситного превращения (например, закалка из воды в масло для углеродистых сталей, ступенчатая закалка для легированных сталей).

Если штамповый инструмент испытывает ударные нагрузки, то используют стали, обладающие большей вязкостью (стали 4ХС4, 5ХНМ). Это достигается снижением содержания углерода, введением легирующих элементов и соответствующей термической обработкой. После закалки проводят высокий отпуск при температуре 480–580 °С, что обеспечивает твердость 38–45 HRC.

### *Стали для штампов горячего деформирования*

Дополнительно к общим требованиям от сталей этой группы требуется устойчивость против образования трещин при многократном нагреве и охлаждении, окалиностойкость, высокая теплопроводность для отвода теплоты от рабочих поверхностей штампа, высокая прокаливаемость для обеспечения высокой прочности по всему сечению инструмента.

Для изготовления молотовых штампов применяют хромоникелевые среднеуглеродистые стали 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХСМФ. Вольфрам и молибден добавляют для снижения склонности к отпускной хрупкости. После термической обработки, включающей закалку с темпера-

туры 760–820 °С и отпуск при 460–540 °С, сталь имеет структуру – сорбит или троостит и сорбит отпуска. Твердость 40–45 HRC.

Штампы горячего прессования работают в более тяжелых условиях. Для их изготовления применяются стали повышенной теплостойкости. Сталь 3X2B8Ф сохраняет теплостойкость до 650 °С, но наличие карбидов вольфрама снижает вязкость. Сталь 4X5B2ФС имеет высокую вязкость. Повышенное содержание хрома и кремния значительно увеличивает окалиностойкость стали.

### *Твердые сплавы*

В качестве материалов для инструментов используются твердые сплавы, которые состоят из твердых карбидов и связующей фазы. Они изготавливаются методами порошковой металлургии.

Характерной особенностью твердых сплавов является очень высокая твердость 87–92 HRC при достаточно высокой прочности. Твердость и прочность зависят от количества связующей фазы (кобальта) и величины зерен карбидов. Чем крупнее зерна карбидов, тем выше прочность. Твердые сплавы отличаются большой износостойкостью и теплостойкостью. Основными твердыми сплавами являются группы ВК (WC + Co), ТК (WC + TiC + Co), ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Наиболее распространенными сплавами группы ВК являются сплавы марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20, где число показывает содержание кобальта в процентах, остальное – карбиды вольфрама WC. Сплавы группы ТК марок Т30К6, Т14К8 – первое число показывает содержание карбидов титана в процентах, второе – содержание кобальта в процентах. Сплавы этой группы лучше противостоят изнашиванию, обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Используются на средних и высоких скоростях резания.

Сплавы с малым количеством кобальта обладают повышенной твердостью и износостойкостью, но минимальной прочностью, поэтому их используют для чистового точения (ВК3, Т30К4).

Сплавы с повышенным содержанием кобальта используют для чернового точения (ВК8, Т14К8).

Сплав ВК20 начинают использовать для армирования штампов, что повышает их износостойкость.

Износостойкость инструментов из твердых сплавов превышает износостойкость инструментов из быстрорежущих сталей в 10–20 раз и сохраняется до температур 800–1000 °С.

### *Алмаз как материал для изготовления инструментов*

80 % добываемых природных алмазов и все синтетические алмазы используются в качестве инструментальных материалов.

Основное количество алмазов используется в виде алмазного порошка для изготовления алмазно-абразивного инструмента – шлифовальных кругов, притиров, хонов, надфилей и др., для обработки особо твердых металлов и горных пород. Большое значение имеют заточные круги для твердосплавного инструмента, это увеличивает производительность труда и срок службы инструмента. Повышение стойкости твердосплавного инструмента обеспечивается высокой чистотой (отсутствие зазубрин, мелких трещин) лезвия инструмента.

Алмазный инструмент изготавливается в виде алмазосодержащих кругов с бакелитовой или металлической связкой.

Также изготавливают алмазные резцы (для обработки корпусов часов), фильеры (для волочения проволоки из высокотвердых и драгоценных металлов) и др.

### *Коррозионно-стойкие стали и сплавы*

Важнейшими коррозионно-стойкими техническими сплавами являются нержавеющие стали с повышенным содержанием хрома: хромистые и хромоникелевые.

*Хромистые стали.* Содержание хрома должно быть не менее 13 % (13–18 %).

Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Углерод в нержавеющих сталях является нежелательным, т. к. он обедняет раствор хромом, связывая его в карбиды, и способствует получению двухфазного состояния. Чем ниже содержание углерода, тем выше коррозионная стойкость нержавеющих сталей.

Различают стали ферритного класса 08X13, 12X17, 08X25T, 15X28. Стали с повышенным содержанием хрома не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и поэтому не могут быть подвергнуты закалке. Значительным недостатком ферритных хромистых сталей является повышенная хрупкость из-за крупнокристаллической структуры. Эти стали склонны к межкристаллитной коррозии (по границам зерен) из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого вводят небольшое количество титана. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Концентрация хрома в

твердом растворе у границ становится меньше 13 % и сталь приобретает отрицательный потенциал.

Из-за склонности к росту зерна ферритные стали требуют строгих режимов сварки и интенсивного охлаждения зоны сварного шва. Недостатком является и склонность к охрупчиванию при нагреве в интервале температур 450–500 °С.

Из ферритных сталей изготавливают оборудование азотнокислотных заводов (емкости, трубы).

Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2–3 % никеля. Стали 10X13H3, 12X17H2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах.

После закалки от температуры 1000 °С и отпуска при 700–750 °С предел текучести сталей составляет 1000 МПа.

Термическую обработку для ферритных сталей проводят для получения структуры более однородного твердого раствора, что увеличивает коррозионную стойкость.

*Стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13.* После закалки и отпуска при 180–250 °С стали 30X13, 40X13 имеют твердость 50–60 HRC и используются для изготовления режущего инструмента (хирургического), пружин для работы при температуре 400–450°, предметов домашнего обихода.

*Стали аустенитного класса* – высоколегированные хромоникелевые стали.

*Никель* – аустенитообразующий элемент, сильно понижающий критические точки превращения. После охлаждения на воздухе до комнатной температуры имеет структуру аустенита.

*Нержавеющие стали аустенитного класса 04X18H10, 12X18H9T* имеют более высокую коррозионную стойкость, лучшие технологические свойства по сравнению с хромистыми нержавеющими сталями, лучше свариваются. Они сохраняют прочность до более высоких температур, менее склонны к росту зерна при нагреве и не теряют пластичности при низких температурах.

*Хромоникелевые стали* коррозионностойки в окислительных средах. Основным элементом является хром, никель только повышает коррозионную стойкость.

Для большей гомогенности хромоникелевые стали подвергают закалке с температуры 1050–1100 °С в воде. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. Выделение их из аустенита

при закалке исключено, так как скорость охлаждения велика. Получают предел прочности  $\sigma_b = 500\text{--}600$  МПа, и высокие характеристики пластичности, относительное удлинение  $\delta = 35\text{--}45$  %.

Упрочняют аустенитные стали холодной пластической деформацией, что вызывает эффект наклепа. Предел текучести при этом может достигнуть значений 1000–1200 МПа, а предел прочности – 1200–1400 МПа.

Для уменьшения дефицитного никеля часть его заменяют марганцем (сталь 40X14Г14Н3Т) или азотом (сталь 10X20Н4АГ11).

*Аустенитно-ферритные стали* 12X21Н5Т, 08X22Н6Т являются заменителями хромоникелевых сталей с целью экономии никеля.

Свойства сталей зависят от соотношения ферритной и аустенитной фаз (оптимальные свойства получают при соотношении – Ф : А = 1 : 1). Термическая обработка сталей включает закалку от температуры 1100–1150 °С и отпуск-старение при температуре 500–750 °С.

Аустенитно-ферритные стали не подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением: трещины могут возникать только на аустенитных участках, но ферритные участки задерживают их развитие. При комнатных температурах аустенитно-ферритные стали имеют твердость и прочность выше, а пластичность и ударную вязкость ниже, чем стали аустенитного класса.

Кроме нержавеющей сталей в промышленности применяют коррозионно-стойкие сплавы – это сплавы на никелевой основе. Сплавы типа хастеллой содержат до 80 % никеля, другим элементом является молибден в количестве до 15–30 %. Сплавы являются коррозионно-стойкими в особо агрессивных средах (кипящая фосфорная или соляная кислота), обладают высокими механическими свойствами. После термической обработки – закалки и старения при температуре 800 °С – сплавы имеют предел прочности  $\sigma_b \approx 1200$  МПа и твердость НВ  $\approx 300$ . Недостатком является склонность к межкристаллической коррозии, поэтому содержание углерода в этих сплавах должно быть минимальным.

#### *Жаростойкость, жаростойкие стали и сплавы*

Жаростойкость (окалиностойкость) – это способность металлов и сплавов сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах в течение длительного времени.

Если изделие работает в окислительной газовой среде при температуре 500–550 °С без больших нагрузок, то достаточно, чтобы они были только жаростойкими (например, детали нагревательных печей).

Для повышения жаростойкости в состав стали вводят элементы, которые образуют с кислородом оксиды с плотным строением кристаллической решетки (хром, кремний, алюминий).

Степень легированности стали, для предотвращения окисления, зависит от температуры.

Чем выше содержание хрома, тем более окалиностойки стали (например, сталь 15X25T является окалиностойкой до температуры 1100–1150 °С).

Высокой жаростойкостью обладают сильхромы, сплавы на основе никеля – нихромы, стали 08X17T, 36X18H25C2, 15X6CЮ.

### *Жаропрочность, жаропрочные стали и сплавы*

Жаропрочность – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах.

Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочности, ползучесть.

Кратковременная прочность определяется с помощью испытаний на растяжение разрывных образцов. Образцы помещают в печь и испытывают при заданной температуре. Прочность зависит от продолжительности испытаний.

Ползучесть – свойство металла медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при постоянной температуре.

В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить перлитные, мартенситные и аустенитные жаропрочные стали, никелевые и кобальтовые жаропрочные сплавы, тугоплавкие металлы.

При температурах до 300 °С обычные конструкционные стали имеют высокую прочность, нет необходимости использовать высоколегированные стали.

Для работы в интервале температур 350–500 °С применяют легированные стали перлитного, ферритного и мартенситного классов.

Перлитные жаропрочные стали. К этой группе относятся котельные стали и сильхромы. Эти стали применяются для изготовления деталей котельных агрегатов, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания. Стали содержат относительно мало углерода. Легирование сталей хромом, молибденом и ванадием производится для повышения температуры рекристаллизации (марки 12X1МФ,

20X3MФ). Используются в закаленном и высокоотпущенном состоянии. Иногда закалку заменяют нормализацией. В результате этого образуются пластинчатые продукты превращения аустенита, которые обеспечивают более высокую жаропрочность. Предел ползучести этих сталей должен обеспечить остаточную деформацию в пределах 1 % за время 10000–100000 ч работы.

Перлитные стали обладают удовлетворительной свариваемостью, поэтому используются для сварных конструкций (например, трубы пароперегревателей).

Для деталей газовых турбин применяют сложнолегированные стали мартенситного класса 12X2MФСР, 12X2MФБ, 15X12ВНМФ. Увеличение содержания хрома повышает жаростойкость сталей. Хром, вольфрам, молибден и ванадий повышают температуру рекристаллизации, образуются карбиды, повышающие прочность после термической обработки. Термическая обработка состоит из закалки от температур выше 1000 °С в масле или на воздухе и высокого отпуска при температурах выше температуры эксплуатации.

Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – сильхромы: 40X10С2М, 40X9С2, X6С.

Жаропрочные свойства растут с увеличением степени легированности. Сильхромы подвергаются закалке от температуры около 1000°С и отпуску при температуре 720–780 °С.

При рабочих температурах 500–700 °С применяются стали аустенитного класса. Из этих сталей изготавливают клапаны двигателей, лопатки газовых турбин, сопловые аппараты реактивных двигателей и т. д.

Основными жаропрочными аустенитными сталями являются хромоникелевые стали, дополнительно легированные вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Стали содержат 15–20 % хрома и 10–20 % никеля. Обладают жаропрочностью и жаростойкостью, пластичны, хорошо свариваются, но затруднена обработка резанием и давлением, охрупчиваются в интервале температур около 600°С, из-за выделения по границам различных фаз.

По структуре стали подразделяются на две группы:

1. Аустенитные стали с гомогенной структурой 17X18Н9, 09X14Н19В2БР1, 12X18Н12Т. Содержание углерода в этих сталях минимальное. Для создания большей однородности аустенита стали подвергаются закалке с 1050–1100 °С в воде, затем для стабилизации структуры – отпуску при 750 °С.

2. Аустенитные стали с гетерогенной структурой 37X12H8Г8МФБ, 10X11H20ТЗР.

Термическая обработка сталей включает закалку с 1050–1100 °С. После закалки старение при температуре выше эксплуатационной (600–750 °С). В процессе выдержки при этих температурах в дисперсном виде выделяются карбиды, карбонитриды, вследствие чего прочность стали повышается.

Детали, работающие при температурах 700–900 °С, изготавливают из сплавов на основе никеля и кобальта (например, турбины реактивных двигателей).

Никелевые сплавы преимущественно применяют в деформированном виде. Они содержат более 55 % никеля и минимальное количество углерода (0,06–0,12 %). По жаропрочным свойствам превосходят лучшие жаропрочные стали.

По структуре никелевые сплавы разделяют на гомогенные (нихромы) и гетерогенные (нимоники).

*Нихромы.* Основой этих сплавов является никель, а основным легирующим элементом – хром (ХН60Ю, ХН78Т).

Нихромы не обладают высокой жаропрочностью, но они очень жаростойки. Их применяют для малонагруженных деталей, работающих в окислительных средах, в том числе и для нагревательных элементов.

Нимоники являются четвертными сплавами никель–хром (ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ). Используются только в термически обработанном состоянии. Термическая обработка состоит из закалки с 1050–1150 °С на воздухе и отпуска-старения при 600–800 °С.

Увеличение жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов достигается упрочнением твердого раствора введением кобальта, молибдена, вольфрама.

Основными материалами, которые могут работать при температурах выше 900 °С (до 2500 °С), являются сплавы на основе тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и др.

Температуры плавления основных тугоплавких металлов: вольфрам – 3400 °С, тантал – 3000 °С, молибден – 2640 °С, ниобий – 2415 °С, хром – 1900 °С.

Высокая жаропрочность таких металлов обусловлена большими силами межатомных связей в кристаллической решетке и высокими температурами рекристаллизации.

Наиболее часто применяют сплавы на основе молибдена. В качестве легирующих добавок в сплавы вводят титан, цирконий, ниобий. С целью защиты от окисления проводят силицирование, на поверхности сплавов образуется слой  $\text{MoSi}_2$  толщиной 0,03–0,04 мм. При температуре 1700 °С силицированные детали могут работать 30 ч.

Вольфрам – наиболее тугоплавкий металл. Его используют в качестве легирующего элемента в сталях и сплавах различного назначения, в электротехнике и электронике (нити накала, нагреватели в вакуумных приборах).

В качестве легирующих элементов к вольфраму добавляют молибден, рений, тантал. Сплавы вольфрама с рением сохраняют пластичность до –196 °С и имеют предел прочности 150 МПа при температуре 1800 °С.

Для сплавов на основе вольфрама характерна низкая жаростойкость, пленки образующихся оксидов превышают объем металла более, чем в три раза, поэтому они растрескиваются и отслаиваются. Изготавливают изделия, работающие в вакууме.

## Литература

1. Башнин, Ю. А. Технология термической обработки / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. – Москва : Metallurgy, 1986.
2. Геллер, Ю. А. Материаловедение / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – Москва : Metallurgy, 1989.
3. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва : Metallurgy, 1986.
4. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, А. И. Елагин. – Москва : Metallurgy, 1981.
5. Лахтин, Ю. М. Основы материаловедения / Ю. М. Лахтин. – Москва : Metallurgy, 1988.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : Машиностроение, 1990.
7. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва : Машиностроение, 1986.
8. Материаловедение и конструкционные материалы / Л. М. Пинчук [и др.]. – Минск : Высш. шк., 1989.
9. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов [и др.]. – Москва : Высш. шк., 2002.
10. Металловедение / А. И. Самохоцкий [и др.]. – Москва : Metallurgy, 1990.
11. Металловедение и термическая обработка стали : справ. – Москва : Metallurgy, 1983. – Т. 1–3.
12. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – Москва : Metallurgy, 1986.
13. Технология металлов и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1989.
14. Технология конструкционных материалов : учеб. для вузов / А. М. Дальский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1977. – 664 с.
15. Технология металлов и других конструкционных материалов / под ред. Н. П. Дубинина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1969. – 707 с.
16. Технология металлов и других конструкционных материалов / под общ. ред. А. М. Дмитриевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Высш. шк., 1973. – 528 с.
17. Технология металлов и материаловедение / Б. В. Кнорзов [и др.]. – Москва : Metallurgy, 1987. – 800 с.

18. Геллер, Ю. А. Материаловедение : учеб. пособие / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1989. – 455 с.

19. Материаловедение и конструкционные материалы : учеб. пособие / Л. С. Пинчук [и др.]. ; под ред. В. А. Белого. – Минск : Выш. шк., 1989. – 461 с.

## Содержание

Введение.....	3
1. Основы металловедения .....	4
1.1. Свойства металлов и сплавов и их строение .....	4
1.2. Процесс кристаллизации и аллотропия (полиморфизм) металлов.....	5
1.3. Основы пластичности и прочности металлов .....	8
1.4. Понятие твердости, вязкости, усталости, остаточных напряжений, наклепа, рекристаллизации и сверхпластичности....	11
1.5. Металлические сплавы .....	15
1.6. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.....	16
1.7. Диаграмма состояния системы железо–углерод Fe–C ( $Fe_3C$ )..	17
2. Основы термической обработки .....	19
2.1. Основные виды термической обработки, в том числе отжиг I рода .....	19
2.2. Отжиг II рода.....	21
2.3. Закалка и отпуск .....	22
2.4. Основы технологии термической обработки сталей .....	25
2.5. Старение и обработка холодом .....	26
2.6. Поверхностное упрочнение стальных изделий.....	28
2.7. Химико-термическая обработка стали .....	30
2.8. Термомеханическая обработка (ТМО) .....	33
3. Конструкционные и инструментальные материалы .....	34
3.1. Классификация и маркировка сталей .....	34
3.2. Классификация, маркировка и область применения чугуна....	36
3.3. Твердые сплавы и металлокерамические материалы.....	38
3.4. Цветные металлы и сплавы на их основе. Титан и его сплавы. Алюминий и его сплавы. Магний и его сплавы. Медь и ее сплавы .....	39
3.5. Абразивные инструментальные материалы .....	47
4. Свойства и область применения машиностроительных сталей .....	60
Литература .....	82

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Пучков Анатолий Андреевич**  
**Кульгейко Михаил Петрович**  
**Быстренков Владимир Михайлович**

# **ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Пособие**

**для студентов специальности 1-36 01 01**  
**«Технология машиностроения»**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 30.09.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 5,0.

Изд. № 150.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.