

**Федеральное агентство по образованию
Российской Федерации
ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И.Менделеева»**

Новомосковский институт (филиал)

Сафонов Б.П.

***МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Часть 1

**Учебное пособие для студентов заочного факультета
специальностей: 210200, 100400, 100700, 190800**

изд. 3-е, стереотипное

**Новомосковск
2008**

УДК 669.017 + 621.7

ББК 34

С 217

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Б.В.Жилин*
(НИ (филиал) ГОУ ВПО РХТУ им. Д.И.Менделеева)
кандидат технических наук, доцент *В.В.Воспенников*
(НИ (филиал) ГОУ ВПО РХТУ им. Д.И.Менделеева)

Сафонов Б.П.

С 217 Материаловедение и технология конструкционных материалов.
Часть 1. Учебное пособие для студентов заочного факультета. Изд. 3-е, стереотипное / ГОУ ВПО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал); Новомосковск, 2008. – 40 с.

В учебном пособии в сжатой форме рассмотрены вопросы: пластическая деформация и механические свойства металлов, теория сплавов, железоуглеродистые сплавы, номенклатура сталей и цветных сплавов, термическая обработка стали.

В учебном пособии рассмотрены также методические вопросы, связанные с выполнением студентами заочного факультета контрольной работы по курсу МиТКМ: построение кривой охлаждения железоуглеродистого сплава, определение содержания углерода в стали по микроструктуре, определение свойств доэвтектоидной стали по правилу Н. С. Курнакова, выбор режима термической обработки стального изделия, маркировка и применение сталей.

Учебное пособие ориентировано на студентов заочного факультета специальностей 210200, 100400, 100700, 190800.

Ил. 8. Табл. 17. Библиогр. список 5 назв.

УДК 669.017 + 621.7

ББК 34

© ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Новомосковский институт (филиал), 2008

Предисловие

В системе общинженерной подготовки специалистов, в формировании у них инженерного мышления материаловедческая и технологическая подготовка занимает одно из центральных мест.

Для студентов немеханического профиля знание конструкционных материалов, возможностей и особенностей тех или иных технологических методов их переработки в готовые изделия позволяет успешно выполнять конструкторские разработки в рамках курсового и дипломного проектирования.

В данном учебном пособии в сжатой форме рассмотрены вопросы: пластическая деформация и механические свойства металлов, теория сплавов, железоуглеродистые сплавы, номенклатура сталей и цветных сплавов, термическая обработка стали.

В учебном пособии рассмотрены также методические вопросы, связанные с выполнением студентами заочного факультета контрольной работы по курсу МиТКМ: построение кривой охлаждения железоуглеродистого сплава, определение содержания углерода в стали по микроструктуре, определение свойств дозвектоидной стали по правилу Н. С. Курнакова, выбор режима термической обработки стального изделия, маркировка и применение сталей.

Введение

В курсе МиТКМ изучаются в основном **конструкционные материалы**, т.е. материалы, применяемые для изготовления конструктивных элементов технических устройств, которые воспринимают силовую эксплуатационную нагрузку (сварные конструкции, силовые детали и упругие элементы).

Материаловедение – наука, изучающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов. Применяемые в технике материалы могут быть объединены в следующие группы: **металлические, неметаллические и композиционные**. В настоящее время в общем машиностроении наибольшее применение получили металлические материалы. Композиционные материалы находят все большее применение в специальном машиностроении.

Среди металлических материалов львиная доля (~ 90%) приходится на **железоуглеродистые сплавы (стали и чугуны)**. В машино- и приборостроении широко используются также **цветные металлы и сплавы** на их основе (**дуралюмины, силумины, бронзы, латуни и др.**). При этом следует помнить, что использование в том или ином случае цветного сплава должно быть обоснованным, поскольку цветные сплавы существенно дороже легированных и особенно углеродистых сталей.

1. Пластическая деформация, рекристаллизация и механические свойства металлов

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил. В зависимости от наличия остаточной деформации металла после снятия нагрузки различают **упругую** и **пластическую деформацию**. Пластическая деформация металла происходит или по схеме **скольжения** (Fe, Cu, Al, Mo и др.), или **двойникования** (Ti, Mg, Be, Zr и др.).

В результате увеличения приложенной нагрузки выше определенного уровня происходит **разрушение** тела, т.е. разделение его на части под действием приложенной нагрузки.

Разрушение бывает **хрупким** и **вязким**. Хрупкое разрушение происходит без предшествующей пластической деформации. Это наиболее опасный вид разрушения, т.к. хрупкое разрушение деталей происходит внезапно и часто приводит к аварийным отказам оборудования с катастрофическими последствиями.

Механическими свойствами называются свойства металла, определяемые либо пластическим деформированием (вдавливание индентора, изгиб и др.), либо разрушением (растяжение, ударный изгиб и др.) специального образца на специальном оборудовании (твердомер, пресс, разрывная машина, маятниковый копер и др.).

По результатам механических испытаний определяются характеристики **прочности, пластичности и вязкости металла** (таблица 1).

Таблица 1 Характеристики механических свойств металлов

Наименование (размерность)	Обозначение, формула для определения	Назначение, применимость
<i>ГОСТ 1497 Методы испытания на растяжение</i>		
Условный предел текучести (МПа, кгс/мм ²)	$S_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$	Для определения допускаемых напряжений конструкционных материалов, используемых в расчетах на прочность деталей машин
Предел прочности (МПа, кгс/мм ²)	$S_B = \frac{P_{\max}}{F_0}$	
Относительное удлинение (%)	$d = \frac{l_k - l_0}{l_0}$	Для оценки надежности конструкционных материалов
Относительное сужение , (%)	$y = \frac{F_0 - F_k}{F_0}$	
<i>ГОСТ 9454 Метод испытания на ударный изгиб</i>		

Наименование (размерность)	Обозначение, формула для определения	Назначение, применимость
Ударная вязкость (Дж/см ² , кгс/см ²)	$KCU = \frac{KU}{F_H}$	Для оценки надежности. Для определения порога хладноломкости конструкционных материалов
<i>ГОСТ 9012 Измерение твердости по Бринеллю</i>		
Твердость по Бринеллю (МПа, кгс/мм ²)	$HB = \frac{P}{F_{omn}}$	Приемосдаточная характеристика металла HB < 450
<i>ГОСТ 9013 Измерение твердости по Роквеллу</i>		
Твердость по Роквеллу	<i>HRB</i>	Для мягких материалов HRB 25-100
	<i>HRC</i>	Для термообработанных сталей HRC 20-67
	<i>HRA</i>	Для твердых сплавов HRA 70-85
<i>ГОСТ 2999 Метод измерения твердости алмазной пирамидой по Виккерсу</i>		
Твердость по Виккерсу (МПа, кгс/мм ²)	$HV = \frac{P}{F_{omn}}$	Для тонких образцов и упрочненных поверхностных слоев
<i>ГОСТ 2860 Испытания на усталость</i>		
Предел выносливости (МПа, кгс/мм ²)	$S_{-1} = S_{max}$ при базовом числе циклов нагружения	Для деталей, работающих при циклическом нагружении

Механические свойства находят широкое применение в инженерной практике при проектном расчете деталей технических устройств (зубчатые колеса, валы, обечайки, днища, фланцы и пр.).

Твердость является самой доступной характеристикой свойств металла. По твердости возможна оценка других механических свойств металла (таблица 2). При использовании формул таблицы 2 следует иметь в виду, что приведенные эмпирические формулы имеют применение для материалов, оговоренных в таблице.

Таблица 2 Формулы для оценки механических свойств сталей

Формула	Примечание
$S_B = 0,345HB$	Углеродистые и низколегированные стали
$S_{0,2} = 0,2HB$	$HB < 150$
$S_{0,2} = 0,367HB - 24$	$HB > 150$

$s_{-1} = 0,25s_B (1 - 1,35y)$	ψ – в относительных единицах
$s_{-1} = 0,1HB + 100$, МПа	Углеродистые стали
$s_{-1} = 0,1HB + 150$, МПа	Низколегированные стали типа 40X, 40XH и др.

Для кристаллов существует понятие **теоретической прочности**, под которой понимают предельное напряжение, предшествующее разрыву межатомных связей. Теоретическая прочность $\sigma_{теор}$ кристалла может быть рассчитана по формуле Я.И. Френкеля

$$s_{теор} \approx \frac{G}{2\rho} \quad (1)$$

где G – модуль сдвига металла.

Для железа имеем $G = 8470$ кгс/мм², тогда по формуле 1 теоретическая прочность железа составит $\sigma_{теор} = 1332$ кгс/мм². Техническое железо однако имеет $\sigma_{0,2} = 10$ кгс/мм². Т.е. реальная прочность кристалла меньше теоретически возможной более чем в 100 раз.

Это различие настолько значительно, что были поставлены под сомнение формула Френкеля и сами представления о теоретической прочности. Для объяснения этого расхождения в первой половине XX столетия была разработана (Тейлором и одновременно с ним Орованом и Полани) **теория дислокаций**, которая связывает прочность металла с его дислокационной структурой.

И.А. Одинг и А.А. Бочвар исследовали влияние плотности дислокаций на прочность кристаллов. Получено, что прочность металлов не является линейной функцией плотности дислокаций (рис. 1).

Как видно из рис. 1 минимальная прочность определяется некоторой критической плотностью дислокаций $\rho_{крит} = 10^6 \dots 10^8$ см⁻² и относится к отожженным металлам ($\sigma_{0,2} = 10^5 \dots 10^4$ Г). Повышение прочности металла может достигаться созданием металлов и сплавов с бездефектной структурой («усы» железа имеют $\sigma_B = 1300$ кгс/мм²) или повышением плотности дефектов (в том числе и дислокаций), затрудняющих движение дислокаций. Повышение прочности возможно также созданием **композиционных материалов**.

При увеличении количества дефектов (дислокаций) кристаллического строения свыше $\rho_{крит}$ (см. рис. 1) происходит упрочнение металла. Плотность дислокаций в деформированном металле не должна превышать $10^{12} \dots 10^{13}$ см⁻². При большей плотности дефектов в металле образуются трещины, приводящие к разрушению.

Во всех случаях упрочнения (наклеп, легирование, термическая и термомеханическая обработка) создаются условия для **торможения дислока-**

ций в результате увеличения их плотности (создание **дислокационных барьеров**), **измельчения блоков** (увеличение **малоугловых границ**), образования **дисперсных частиц второй фазы** (карбидов, нитридов и др. химических соединений).

При легировании и термической обработке упрочнение связано с образованием твердого раствора, гетерогенных структур различной дисперсности или метастабильных структур, например мартенсита.

Пластически деформированный металл запасает 5-10% энергии, затраченной на деформирование. При деформировании увеличиваются прочностные характеристики (НВ, $\sigma_{0,2}$, σ_B и др.) и понижаются пластические свойства (δ , ψ), а также вязкость (КСУ).

Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании степени деформации механические свойства изменяются незначительно (рис. 2).

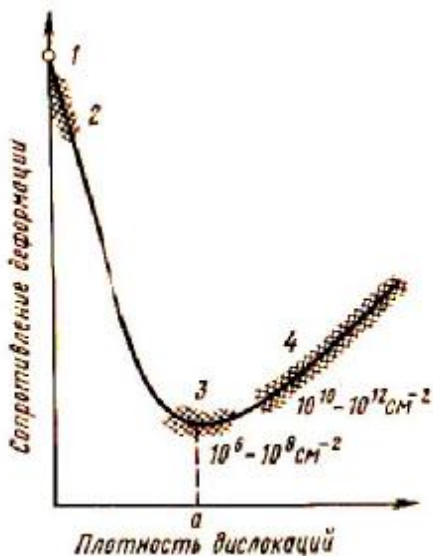
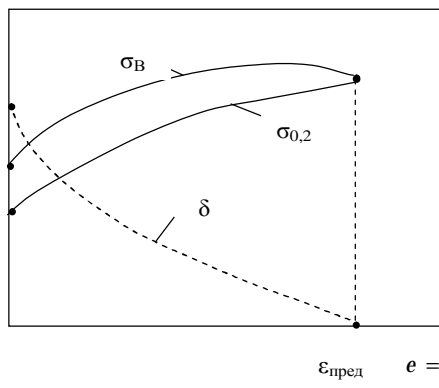


Рис. 2. Зависимость механических σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ свойств холоднодеформированного металла от степени деформации ϵ (схема)

Рис.1. Схема зависимости прочности от плотности дислокаций и других дефектов в металлах (И.А. Одинг, А.А. Бочвар): 1- теоретическая прочность; 2-4- реальная прочность (2- «усы»; 3- чистые отожженные металлы; 4- сплавы, упрочненные легированием, пластическим деформированием, термической или термомеханической обработкой)



$$e = \frac{\Delta l}{l}$$

При достижении предельной деформации $\sigma_{0,2}$ и σ_B сравниваются, а относительное удлинение становится равным нулю, дальнейшая деформация при этом приводит к разрушению металла.

Путем **деформационного упрочнения (наклепа)** HV и σ_B удается повысить в 1,5...3 раза, а $\sigma_{0,2}$ в 3-7 раз. При поверхностном пластическом деформировании (обдувка дробью, обкатка роликом и пр.) в поверхностном слое формируются **напряжения сжатия**, а под ним, на большом расстоянии от поверхности, появятся напряжения растяжения. **Сжимающие напряжения** в поверхностном слое замедляют зарождение усталостной трещины и тем самым увеличивают долговечность деталей, работающих при знакопеременных (**циклических**) напряжениях (валы, зубчатые колеса и др.)

Однако наклепанные металлы легче корродируют и склонны к **коррозионному растрескиванию**. Образование текстуры деформации вызывает также **анизотропию свойств металла**.

Несмотря на снижение пластичности, наклеп широко используют для повышения прочности деталей, изготовленных методами холодной обработки давлением. Снижение пластичности при наклепе улучшает обрабатываемость резанием вязких и пластичных материалов (латуней, сплавов алюминия и др.).

Неравновесная структура, созданная холодным деформированием, у большинства металлов устойчива при комнатной температуре (исключение составляют легкоплавкие металлы Pb, Sn и др.). При нагреве холоддеформированного металла он стремится вернуться в состояние до деформации.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на возврат и рекристаллизацию.

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла, т.е. размер и форма зерен при возврате не изменяется.

Рекристаллизация – это процесс зарождения и роста новых зерен с меньшим количеством дефектов строения; в результате рекристаллизации образуются новые, чаще всего равноосные зерна (рис. 3).

В зависимости от температуры нагрева и времени выдержки различают три стадии рекристаллизации: первичная, собирательная и вторичная.

Первичная рекристаллизация начинается с образования зародышей новых зерен и заканчивается полным замещением наклепанного металла новой поликристаллической структурой (рис. 3а-в).

Для начала первичной рекристаллизации необходимы два условия:

- предварительная деформация наклепанного металла должна быть больше критической

$$\epsilon > \epsilon_{\text{крит}}$$

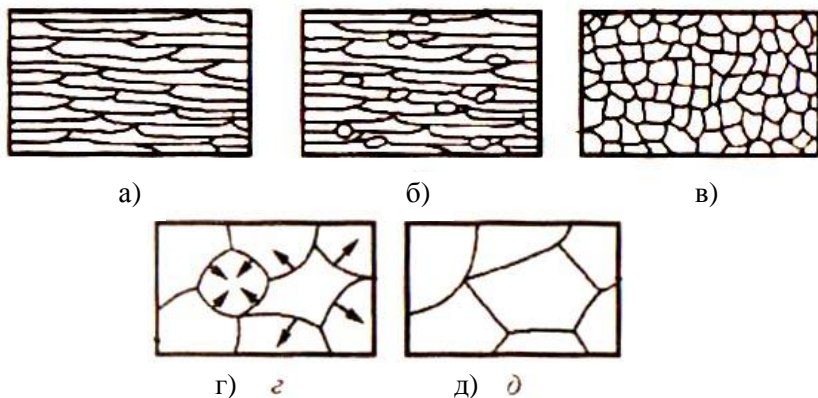


Рис.3. Схема изменения микроструктуры холоднодеформированного металла при нагреве:

- а – ориентированные по нагрузке зерна деформированного металла;
 б- начало первичной рекристаллизации; в- завершение первичной рекристаллизации; г- рост зерна; д- образование равновесной структуры

- температура нагрева должна превысить критическое значение

$$t > t_{\text{крит}}$$

Критическая температура $t_{\text{крит}}$ зависит от степени деформации металла ϵ ($\epsilon \uparrow$, $t_{\text{крит}} \downarrow$) и наличия в нем примесей ($\sum_{\text{примесей}} \uparrow$, $t_{\text{крит}} \uparrow$). $t_{\text{крит}}$ называется **температурным порогом рекристаллизации** $t_{\text{ПР}}$.

А.А. Бочвар получил формулу для определения температурного порога рекристаллизации $T_{\text{ПР}}$ для технически чистых металлов, подвергнутых значительной деформации

$$T_{\text{ПР}} = 0,4 \times T_{\text{пл}}, K \quad (2)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления деформированного металла в К.

Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации равен соответственно 100, 270 и 450⁰С. А для таких легкоплавких металлов, как свинец и олово температурный порог рекристаллизации лежит в области отрицательных температур ($t_{\text{ПР}} < 0^{\circ}C$).

При **собирающей** (рис. 3г) и **вторичной** (рис. 3д) рекристаллизации происходит рост зерен. Вторичной рекристаллизации соответствуют высокие температуры нагрева наклепанного металла.

Явление рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла (например, при

необходимости продолжить обработку давлением путем прокатки, протяжки, волочения и т.п.), его необходимо нагреть выше $t_{\text{ПР}}$. Такая термическая обработка металла называется **рекристаллизационным отжигом**.

При температуре обработки давлением выше $t_{\text{ПР}}$ упрочнение металла снимается тем быстрее, чем больше перегрев металла по отношению к $t_{\text{ПР}}$. При очень высокой температуре (**ковочные температуры**) рекристаллизация завершается в доли секунды.

Обработка металла давлением при температурах выше $t_{\text{ПР}}$, когда нет упрочнения металла, называется **горячей деформацией**. Обработка давлением при температуре ниже $t_{\text{ПР}}$ вызывает деформационное упрочнение (наклеп) металла и называется **холодной деформацией**.

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах носит название **полиморфизма**, или **аллотропии**. Различные кристаллические формы одного вещества называются **полиморфными**, или **аллотропическими модификациями**. Полиморфные модификации обозначаются греческими буквами **a, b, g, d** и т.д., которые в виде индексов добавляются к символу химического элемента. Самая низкотемпературная модификация имеет индекс **a**, следующая – **b**. Превращение одной модификации чистого металла в другую происходит при постоянной температуре и сопровождается или поглощением тепла ($a \rightarrow b$), или его выделением ($b \rightarrow a$).

Так, например, железо ниже 911°C имеет объемноцентрированную кристаллическую решетку и обозначается Fe_a , в интервале температур $911-1392^{\circ}\text{C}$ железо имеет гранецентрированную кристаллическую решетку и обозначается Fe_g . Выше 1392°C железо вновь имеет объемноцентрированную кристаллическую решетку, но обозначается уже Fe_d .

2. Теория сплавов

В технике подавляющая часть конструкционных материалов являются сплавами двух и более компонентов. Основные термины по теме «Теория сплавов» приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные термины

Термин	Определение, характеристика
Сплав	Сплав – вещество, полученное сплавлением двух и более компонентов. Классификация сплавов проводится по различным признакам (таблица 4).

Термин	Определение, характеристика
Фаза сплава	Фаза – обособленная часть сплава, отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую свойства сплава изменяются скачкообразно. Ф. в сплаве представляют собой: чистые компоненты (см фазы А, В на рис. 4а, 4г), твердые растворы (см. фазы α, β нарис. 4б, 4в) или химические соединения (см. фазу A_nB_m на рис. 4г).
Твердый раствор	Твердый раствор – однофазное вещество, состоящее из однотипных зерен постоянного состава, строения и свойств (см. фазы α, β на рис. 4б, 4в). Различают Т.р. : замещения и внедрения. Т.р. имеет кристаллическую решетку растворителя. Растворимость компонентов Т.р. увеличивается с ростом температуры.
Химическое соединение	Химическое соединение – однофазное вещество с ионным или металлическим типом связи. С неметаллами (Н) металлы (Ме) образуют Х.с. вида Me_nH_m (оксиды, сульфиды, карбиды и др.). Такие Х.с. являются фазами постоянного состава (см. фазу A_nB_m на рис. 4г). Между собой металлы образуют Х.с. переменного состава, называемые металлическими соединениями (FeCr, FeSb, NiSb и др.).
Механическая смесь	Механическая смесь двух компонентов образуется тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию друг с другом. М.с. , образующаяся из жидкой фазы при постоянной температуре называется эвтектикой , из твердой фазы – эвтектоидом . См. эвтектику $\Xi=(A+B)$ на рис. 4а; $\Xi=(\alpha+\beta)$ на рис. 4в; $\Xi_1=A+A_nB_m$ и $\Xi_2=B+A_nB_m$ на рис. 4г.
Критическая точка сплава	Критическая точка – температура, при которой в сплаве происходят фазовые превращения. В зависимости от характера превращения К.т. имеют собственные имена: ликвидус, солидус, сольвус и др. (таблица 5).
Диаграмма состояния сплава	Диаграмма состояния – графическое изображение фазового состава сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов (рис 4). Часть Д.с. , для которой фазовый состав сплава постоянен, называется фазовой областью. Д.с. позволяет проводить фазовый анализ сплавов определенного состава при заданной температуре (определение состава фаз, и количества фаз), а также прогнозировать свойства сплавов в зависимости от содержания компонентов.
Правило концентраций	Правило концентраций – составы фаз сплава характеризуются абсциссами соответствующих концов коноды (рис.5).

Термин	Определение, характеристика
Правило отрезков	Правило отрезков – отрезки коноды между точкой сплава и точками, определяющими состав фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз (рис.5).
Правило Курнакова	Правило Курнакова (рис. 6) характеризует взаимосвязь физико-механических свойств и состава сплава: в однофазной области зависимость «состав-свойство» имеет нелинейный характер ; в двухфазной области зависимость «состав-свойство» имеет линейный характер ; при концентрации компонентов, соответствующей химическому соединению , на зависимости «состав-свойство» имеет место сингулярная точка .
Правило Бочвара	Правило Бочвара (рис.7) характеризует взаимосвязь технологических свойств и состава сплава: эвтектические сплавы и чистые компоненты обладают хорошими литейными свойствами ; однофазные твердые растворы обладают хорошей технологической пластичностью ; сплавы, имеющие выделения вторичных фаз упрочняются по схеме «закалка+старение» .

Классификация сплавов проводится по числу компонентов, числу фаз, основе сплава и др. признакам (таблица 4).

Таблица 4

Классификация сплавов

Опорный признак	Наименование вида сплава
Число компонентов	Двойной
	Тройной и др.
Число фаз	Однофазный (фаза: твердый раствор, интерметаллид)
	Многофазный (фазы: чистый компонент, твердый раствор, химическое соединение)
Основа	Железный
	Алюминиевый
	Медный
	Никелевый и др.
Основной легирующий элемент	Хромистая сталь
	Бериллиевая бронза и др.
Назначение	Конструкционный
	Инструментальный
	Специальный
Основное эксплуатационное свойство	Антифрикционный
	Жаропрочный
	Жаростойкий
	Износостойкий
	Химически стойкий
	С особыми физическими свойствами (тепловые, маг-

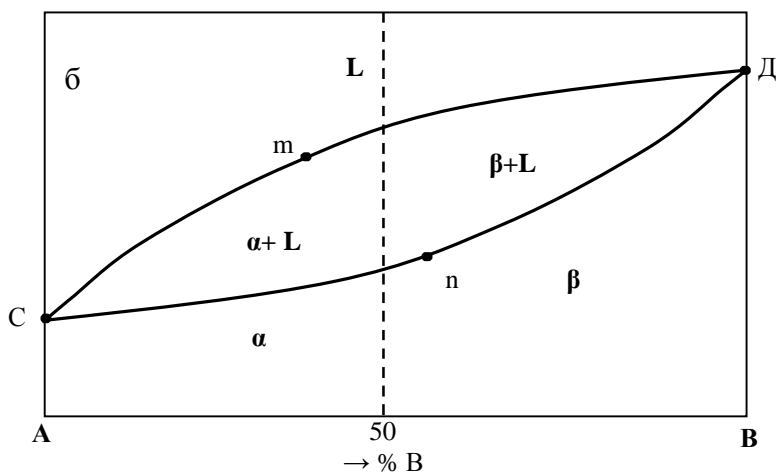
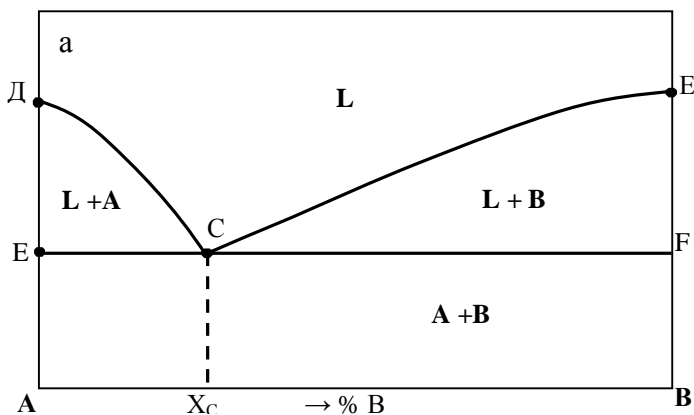
Опорный признак	Наименование вида сплава
	нитные, электрические)
Технология изготовления изделий	Литейный
	Деформируемый
	Спеченный
Технология упрочнения	Термически упрочняемые
	Термически неупрочняемые
	Химико-термическое упрочнение
	Деформационное упрочнение
	Другие виды упрочнения

В таблице 5 представлены описания фазовых превращений в критических точках сплавов.

Таблица 5 Критические точки сплавов

Название точки (обозначение)	Фазовое превращение при охлаждении (<i>нагревании</i>)	Примечания
Ликвидус $L \leftrightarrow TB$ (t_L)	Начало выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>конец расплавления твердой фазы</i>).	Для чистых компонентов и эвтектических сплавов точки ликвидус и солидус совпадают
Солидус $L \leftrightarrow TB$ (t_S)	Конец выпадения твердой фазы в жидком расплаве (<i>начало расплавления твердой фазы</i>).	
Сольвус (точка вторичной кристаллизации) $TB \leftrightarrow TB + TB_{II}$ (t_C)	Выпадение вторичной фазы в результате снижения растворимости компонентов сплава в твердом состоянии (<i>растворение одной из фаз в результате повышения растворимости компонентов сплава в твердом состоянии</i>).	Вторичная фаза представляет собой химическое соединение A_nB_m
Точка Кюри (точка магнитного превращения)	Приобретение ферромагнитных свойств веществом (<i>потеря ферромагнитных свойств твердым веществом</i>).	Не связано с перекристаллизацией. $Ni - 360 \text{ }^\circ\text{C}$ $Fe - 768 \text{ }^\circ\text{C}$ $Co - 1150 \text{ }^\circ\text{C}$

Название точки (обозначение)	Фазовое превращение при охлаждении (<i>нагревании</i>)	Примечания
Точка полиморфного превращения (точка перекристаллизации) $TB_{\alpha} \leftrightarrow TB_{\beta}$ (t_{ab})	Переход высокотемпературной аллотропической формы в низкотемпературную (<i>переход низкотемпературной аллотропической формы в высокотемпературную</i>)	Для сплавов перекристаллизация проходит в интервале температур



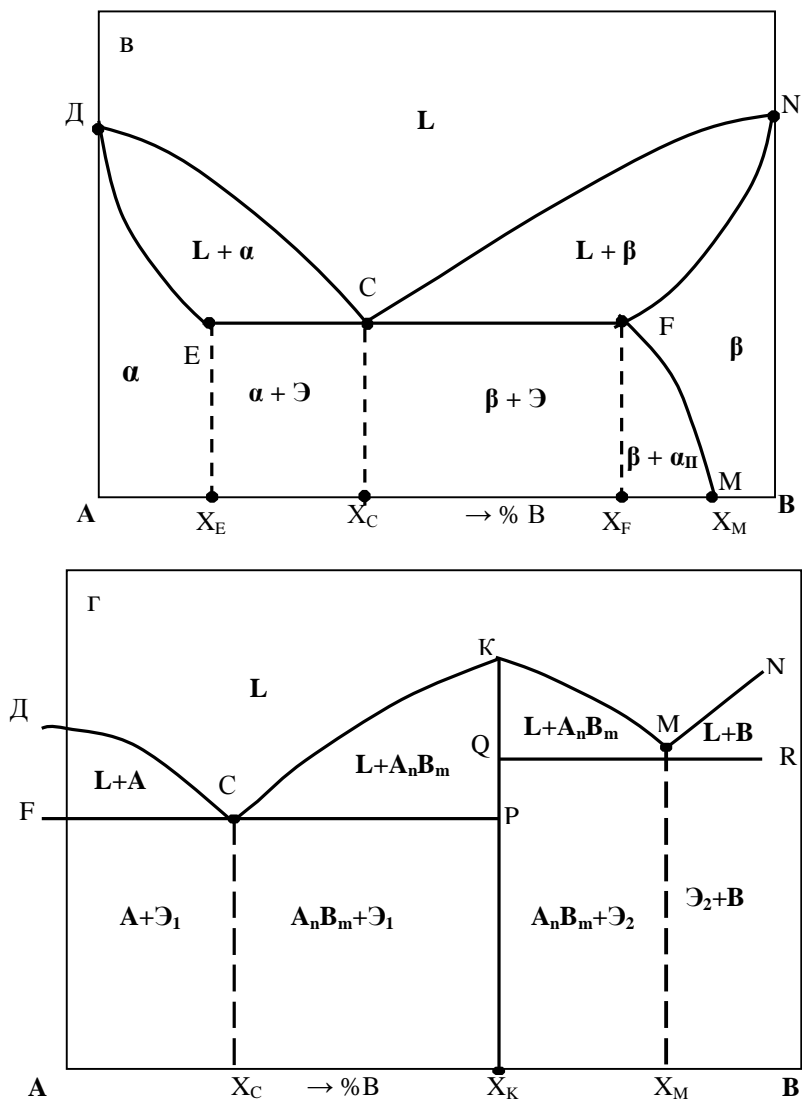


Рис. 4. Виды диаграмм состояния двойных сплавов: **а** – сплавы образуют механические смеси из чистых компонентов; **б** – сплавы образуют непрерывный ряд твердых растворов; **в** – сплавы с ограниченной растворимостью в твердом состоянии и эвтектическим превращением; **г** – сплавы образуют устойчивые химические соединения.

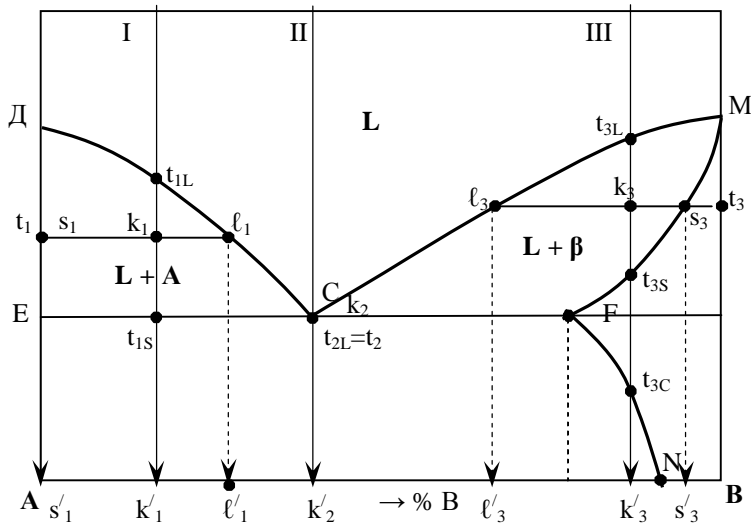


Рис. 5. Определение фазового состава сплава по диаграмме состояния

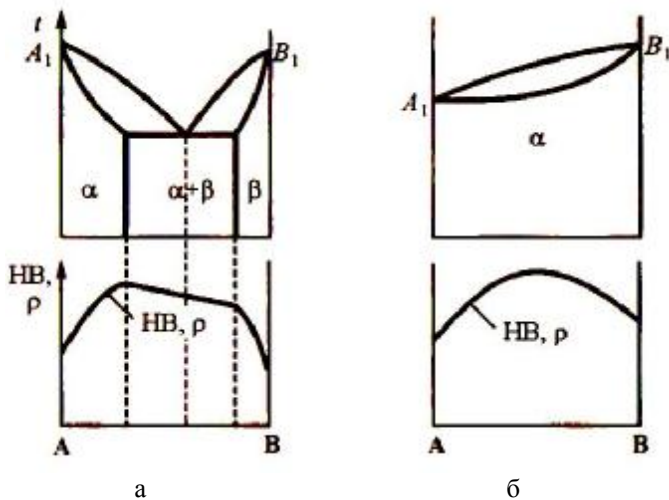


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая правило Н.С. Курнакова: **а** – сплавы с ограниченной растворимостью в твердом состоянии и эвтектическим превращением; **б** – сплавы образуют непрерывный ряд твердых растворов

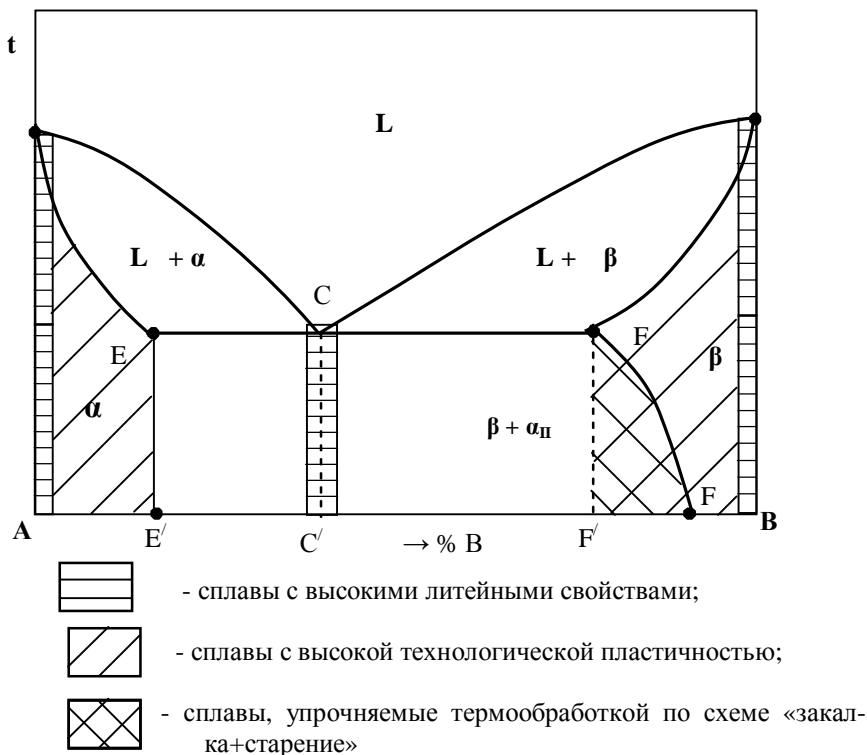


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая правило А.А. Бочвара

2. 1. Анализ фазового состава сплавов по диаграмме состояния (задача №2 контрольной работы)

Диаграмма состояния содержит информацию о фазах сплавов при концентрации компонентов $B=0\dots 100\%$ в диапазоне температур от комнатной до ликвидус $t = 20\dots t_L$. (см. рис 4). По диаграмме состояния можно анализировать компонентный состав фаз сплавов, их количественное соотношение и микроструктуру сплавов.

2.1.1. Определение состава фаз сплава (правило концентраций)

Рассмотрим систему А-В, диаграмма состояния которой представлена на рис. 5. Выделим три сплава: I, II, III. Доэвтектический сплав I имеет критические точки t_{1L}, t_{1S} . Эвтектический сплав II – $t_{2L} \equiv t_{2S}$. Заэвтектиче-

ский сплав III имеет критические точки t_{3L}, t_{3S}, t_{3C} . Названия и обозначения критических точек сплавов см. в таблице 5.

Сплав I рассматриваем при температуре t_1 , сплав II рассматриваем при эвтектической температуре t_2 , сплав III – при температуре t_3 . Через точки t_1, t_3 проводим изотермы. Пересечение изотерм с линиями сплавов обозначим k_1, k_2, k_3 .

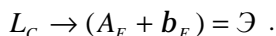
Отрезок изотермы, заключенный внутри фазовой области диаграммы состояния, называется *конодой*. Имеем две коноды: $s_1 k_1 l_1$ и $s_3 k_3 l_3$. Обращаем внимание, что конец коноды, лежащий на линии ликвидус обозначен буквой l (l_1, l_3 на рис.5), конец коноды, лежащий на линии солидус обозначен буквой s (s_1, s_3 на рис.5).

Правило концентраций – состав фаз сплава k_i характеризуется абсциссами соответствующих концов коноды.

На рис. 5 после построения коноды $s_1 k_1 l_1$ и $s_3 k_3 l_3$ выполнены следующие построения. Из точек l_i, s_i опущены перпендикуляры на ось концентраций (точки k'_i, l'_i, s'_i). Точка k'_i характеризует состав рассматриваемого сплава; l'_i – состав жидкой фазы сплава; s'_i – состав твердой фазы сплава.

Сплав I. Доэвтектический, жидкая фаза имеет состав, соответствующий точке l'_1 ; твердая фаза представляет собой кристаллы компонента A, состав твердой фазы характеризуется точкой s'_1 .

Сплав II. Эвтектический, эвтектика состоит из смеси кристаллов компонента A и твердого раствора $b = B(A)$. Состав эвтектики характеризуется точкой k'_2 . Эвтектика образуется по реакции



Сплав III. Заэвтектический, жидкая фаза имеет состав, соответствующий точке l'_3 ; твердая фаза представляет собой кристаллы β -твердого раствора, состав твердой фазы характеризуется точкой s'_3 .

2.1.2. Определение количественного соотношения фаз сплава (правило отрезков)

Правило отрезков – отрезки коноды между точкой сплава k_i и точками l_i и s_i , определяющими состав фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз

$$\frac{L}{TB} = \frac{k_i s_i}{k_i l_i}, \quad (3)$$

здесь TB – обобщенно обозначена твердая фаза сплава.

Поскольку рассматриваемые сплавы двухфазные, то для любой точки коноды имеем

$$L + TB = 1. \quad (4)$$

Решая совместно 3,4, получим выражения для определения соотношения фаз в сплаве k_i

$$L = \frac{k_i s_i}{l_i s_i} u TB = \frac{k_i l_i}{l_i s_i} \quad (5)$$

В числителе и знаменателе выражения (5) подставляются длины отрезков коноды в миллиметрах, взятые с диаграммы состояния (см. рис.5). Из выражения (5) количество фаз сплава определяется в относительных единицах. Если задаться массой сплава, например 1 кг, то, зная относительное содержание фаз, можно вычислить их абсолютное количество.

Сплав I. Количественное соотношение фаз определяем из системы (5)

$$L_1 = \frac{k_1 s_1}{l_1 s_1}; A = \frac{k_1 l_1}{l_1 s_1}.$$

Сплав II. Количественное соотношение фаз в эвтектике

$$A = \frac{CF}{EF}; b = \frac{EC}{EF}.$$

Сплав III. Количественное соотношение фаз определяем из системы(5)

$$L_3 = \frac{k_3 s_3}{l_3 s_3}; b = \frac{k_3 l_3}{l_3 s_3}.$$

2.2. Прогнозирование свойств сплава по диаграмме состояния

Впервые на связь между видом диаграммы состояния и физико-механическими свойствами сплавов указал Н.С.Курнаков в начале XX века. В современном материаловедении взаимосвязь состава сплавов и их физико-механических свойств называют **правилом Н.С.Курнакова**:

- В области однофазного твердого раствора (α , β) свойства сплава в зависимости от концентрации компонентов изменяются нелинейно (по закону цепной линии) (см. рис. ба).

Для твердых растворов такие свойства, как твердость $HВ$, удельное электросопротивление и др., всегда превосходят аналогичные свойства ис-

ходных компонентов. Прочность сплава может превышать прочность компонентов не более чем на 80%, а электросопротивление сплава может превышать аналогичный показатель компонентов до 2-3 раз.

- *В области двухфазных механических смесей ($\alpha+\beta$) свойства сплавов аддитивны к концентрации компонентов, т.е. изменяются линейно между значениями свойств сплавов, ограничивающих двухфазную область (см. рис. 6б).*

В сплавах, кристаллизующихся по диаграмме эвтектического типа, аддитивность свойств может быть нарушена неравновесностью структуры, связанной с особыми условиями образования эвтектики. Эвтектические сплавы, закристаллизовавшиеся быстро (например, отлитые в холодную металлическую форму), имеют более дисперсное (более мелкозернистое) строение эвтектики и существенно более высокую (иногда в два раза) твердость, чем такие же сплавы, закристаллизовавшиеся медленно.

- *Для сплавов, соответствующих химическому соединению, на диаграмме «состав-свойство» смеет место сингулярная точка, т.е. свойства сплава достигают экстремума.*

А.А.Бочвар исследовал технологические свойства сплавов. Обобщенная схема, характеризующая взаимосвязь фазового состава и технологических свойств сплавов, именуемая **правилом А.А.Бочвара**, представлена на рис. 7.

- *Склонность литейного сплава к ликвации (неоднородности состава по сечению слитка или отливки) определяется температурным интервалом кристаллизации (расстоянием по вертикали между линиями ликвидус и солидус).*

Чем больше температурный интервал кристаллизации, тем сильнее ликвируют сплавы (пример, оловянные бронзы); при малом температурном интервале кристаллизации сплавов ликвация мала (например, латуни).

- *Эвтектические сплавы и чистые компоненты обладают высокой жидкотекучестью и несклонны к образованию горячих трещин при сварке.*

Жидкотекучестью обладают сплавы в температурном интервале между линиями ликвидус-солидус. Наличием эвтектики-ледебурита в чугунах объясняются их высокие литейные свойства.

- *Сплавы в области однофазных твердых растворов обладают высокой технологической пластичностью (хорошо куются, прокатываются и т.п.).*

Горячая обработка давлением сплавов производится в твердом состоянии (ниже линии солидус) в температурных интервалах: для углеродистых сталей 1200-800 °С; для бронз 900-750 °С; для латуней 820-700 °С; для алюминиевых сплавов 450-350 °С.

- *Сплавы, имеющие выделение вторичных фаз термически упрочняются по схеме «закалка+старение».*

Термическая обработка такого типа применяется для упрочнения дуралюминов (Al-Cu сплавы) и др. сплавов, фазы которых не имеют полиморфных превращений.

3. Железоуглеродистые сплавы

Железоуглеродистые сплавы (стали и чугуны) являются основными конструкционными материалами современного машиностроения. На их долю приходится более 90% металлических материалов, потребляемых машиностроением.

3.1. Диаграмма состояния «железо-цементит»

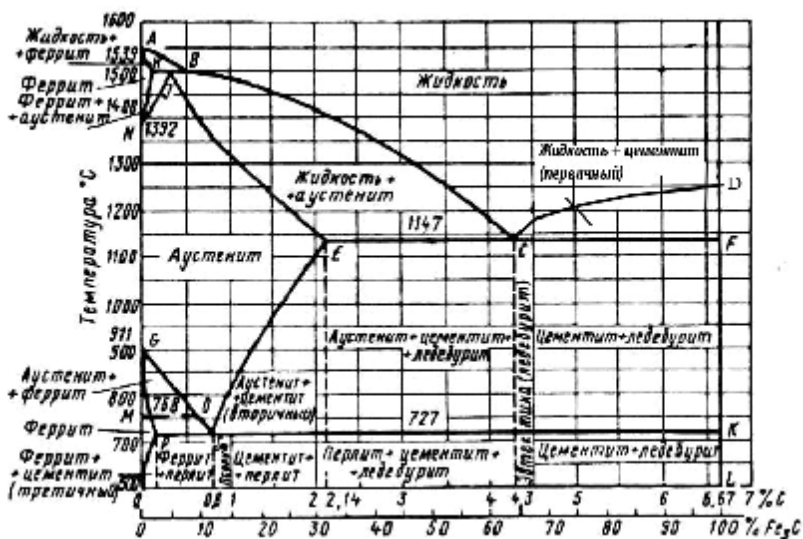


Рис.8. Диаграмма состояния «железо-цементит»

В таблице 6 представлено описание характерных точек диаграммы «Fe-Fe₃C».

Таблица 6 Характерные точки диаграммы «железо-цементит»

Обозначение	Координаты точки			Примечания
	t, °C	C, %	Fe ₃ C, %	
A	1539	0	0	Точка плавления чистого железа
H	1499	0,1	1,5	Предельная концентрация углерода в высокотемпературном феррите
J	1499	0,16	2,4	Концентрация углерода в аустените при перитектическом

Обозначение	Координаты точки			Примечания
	t, °C	C, %	Fe ₃ C, %	
				превращении
B	1499	0,51	7,6	Концентрация углерода в жидком сплаве при перитектическом превращении
N	1392	0	0	Точка высокотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
D	1260 1550	6,67	100	Точка плавления чистого цементита (данные разнятся)
E	1147	2,14	32,1	Предельная концентрация углерода в аустените
C	1147	4,3	64,5	Эвтектическая точка сплава
F	1147	6,67	100	Правый конец эвтектической линии ECF
G	911	0	0	Точка низкотемпературного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения железа
P	727	0,02	0,3	Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите
S	727	0,8	12,0	Эвтектоидная точка сплава
K	727	6,67	100	Правый конец эвтектоидной линии PSK
Q	500	0,006	0,09	Минимальная растворимость углерода в низкотемпературном феррите
L	500	6,67	100	Нижний конец вертикали цементита DFKL

Оси диаграммы состояния:

- ось абсцисс имеет двойную маркировку: в массовых долях углерода (0-6,67%); в массовых долях цементита (0-100%).
- ось ординат промаркирована в градусах Цельсия (600-1539°С), начало оси ординат диаграммы состояния со значением температуры 600 градусов связано с тем, что до 600°С в Fe-C сплавах не наблюдаются фазовые превращения.

Линии диаграммы состояния:

- ликвидус ABCD;
- солидус AHJECF;
- сольвус ES, PQ;
- перекристаллизация (полиморфные превращения) HN, JN, GS, GP;
- изотермические превращения HJB (перитектическое), ECF (эвтектическое), PSK (эвтектоидное).

В таблице 7 представлено описание фаз и структурных составляющих железоуглеродистых сплавов.

Таблица 7 Фазы и структурные составляющие Fe-C сплавов

Термин	Определение, характеристика
Феррит	Феррит – твердый раствор углерода в α -железе: $Fe_{\alpha}(C)$, Ф . Ф . существует в сплавах при температуре ниже $727^{\circ}C$. При $727^{\circ}C$ Ф . содержит 0,02% углерода, при $20^{\circ}C$ – 0,006% углерода.
Аустенит	Аустенит – твердый раствор углерода в γ -железе: $Fe_{\gamma}(C)$, А . А . существует в сплавах при температуре выше $727^{\circ}C$. При $727^{\circ}C$ А . содержит 0,8%С, при $1147^{\circ}C$ – 2,14%С.
Цементит	Цементит – карбид железа, химическое соединение: Fe_3C , Ц . Ц . содержит 6,67%С.
Ледебурит	Ледебурит – механическая смесь аустенита и цементита (эвтектика). Л . содержит 4,3%С. При температуре ниже $727^{\circ}C$ аустенит ледебурита распадается на перлит и цементит.
Перлит	Перлит – механическая смесь феррита и цементита (эвтектоид). П . содержит 0,8%С.

Область применения железоуглеродистых сплавов определяется структурой сплава, классификация сплавов *Fe-C* по структуре представлена в таблице 8.

Таблица 8 Структурная классификация железоуглеродистых сплавов

Содерж. С, %	Название сплава	Структура при комнатной температуре	Применение сплавов
0,006 – 0,02	Техническое железо	Ф+Ц_{III}	Сердечники трансформаторов
0,02 – 0,8	Дозэвтектоидная сталь	Ф+П	Детали машин и конструкций
0,8	Эвтектоидная сталь	П	Режущий и мерительный инструмент
0,8 – 2,14	Заэвтектоидная сталь	П+Ц_{II}	
2,14 – 4,3	Дозэвтектический чугуны	1. Ферритная – Ф+Г 2. Ферритно-перлитная	Детали машин, получаемые литьем
4,3	Эвтектический чугуны	Ф+П+Г 3. Перлитная – П+Г	
4,3 – 6,67	Заэвтектический чугуны	(П+Ц)+Ц_I	Исследовательские сплавы

Примечания:

1. Сокращения: **Ф**= $Fe_{\alpha}(C)$ – феррит; **П**=(**Ф**+**П**) – перлит; **Ц_I**, **Ц_{II}**, **Ц_{III}** – цементит (первичный, вторичный, третичный).

2. Структура конструкционных чугунов характеризуется структурой матрицы и формой графитных включений (пластинчатый, хлопьевидный и шаровидный гра-

Содерж. С, %	Название сплава	Структура при ком- натной температуре	Применение сплавов
фит).			

3.2. Построение кривой охлаждения железоуглеродистого сплава (тема №1 контрольной работы)

Построение выполняется в следующей последовательности:

- Изучить диаграмму состояния «железо-цементит», приведенную на рис. 8. Разобрать существо структурных превращений, происходящих при охлаждении в сплавах с различным содержанием углерода (например, 0,4; 0,8; 1,2; 2,5; 4,3; и 5%).
- На листе расположить диаграмму «железо-цементит» таким образом, чтобы справа от нее было место для построения кривой охлаждения. (при этом можно использовать диаграмму, приведенную на рис. 8).
- По варианту задания необходимо выбрать сплав, имеющий заданную концентрацию углерода. Построить сечение диаграммы вертикальной линией сплава, зафиксировав при этом точки пересечения линий диаграммы состояния с линией сплава. Эти точки являются критическими температурами исследуемого сплава.
- Справа от диаграммы «железо-цементит» на зарезервированном поле чертежа построить кривую охлаждения заданного сплава, опираясь на выявленные критические точки. Кривая охлаждения строится в координатах «температура – время». Ось абсцисс (ось времени) строится в произвольном масштабе. Оси ординат (ось температур) кривой охлаждения и диаграммы состояния строятся в одинаковом масштабе.
- При построении кривой охлаждения следует иметь в виду, что при достижении сплавом критической температуры на кривой охлаждения должно иметь место изменение хода зависимости «температура – время», которое выражается либо изменением угла наклона кривой охлаждения к оси абсцисс, либо наличием на ней горизонтальной площадки (при пересечении линией сплава изотерм на диаграмме состояния).
- Проверить правильность построения кривой охлаждения с помощью правила фаз.

Используемое для контроля правильности построения кривой охлаждения **правило фаз** (или **закон Гиббса**) имеет вид

$$C = K - \Phi + 1, \quad (6)$$

где C – число степеней свободы системы – это число факторов равновесия (концентрация, температура), которые могут изменяться не-

зависимо, но не изменяя числа фаз; K – число компонентов системы (для Fe-C сплавов $K=2$); Φ – число фаз в системе (определение фазы см. таблицу 3).

Для однокомпонентной системы (чистый металл) выражение (6) перепишется в виде

$$C^{(1)} = 2 - \Phi \quad (7)$$

Из (7) следует, что в однокомпонентной системе в равновесии могут находиться максимум 2 фазы, $\Phi_{\max}^{(1)} = 2$.

Для двухкомпонентной системы (двойной сплав) выражение (6) имеет вид

$$C^{(2)} = 3 - \Phi \quad (8)$$

Из (8) следует, что в двойной системе в равновесии могут находиться максимум 3 фазы, $\Phi_{\max}^{(2)} = 3$.

Для контроля правильности построения кривой охлаждения используется следующее. Если в системе в равновесии находится максимальное количество фаз ($\Phi_{\max}^{(i)}$), то число степеней свободы системы будет равно нулю, т.е.

$$\Phi = \Phi_{\max}^{(i)} \rightarrow C^{(i)} = 0. \quad (9)$$

При $C^{(i)} = 0$ рассматриваемая система является *инвариантной*, т.е. в этом случае в системе нельзя изменять внешние факторы (температура, концентрация) без того, чтобы это не вызвало изменение числа фаз в системе. Другими словами, в случае $C^{(i)} = 0$ сплав находится в изотермических условиях до тех пор, пока не уменьшится число фаз (для чистого металла, эвтектического сплава пока не закончится кристаллизация, т.е. пока не исчезнет жидкая фаза). На кривой охлаждения при этом будет иметь место *температурная остановка* (горизонтальная площадка).

При построении кривой охлаждения сплава его правильность следует контролировать проверкой числа степеней свободы по (7) или (8) в зависимости от фазового состава сплава в той или иной точке диаграммы состояния.

3.3. Определение содержания углерода в стали по микроструктуре (задача №2 контрольной работы)

Довзтектоидная сталь: структура Ф+П; содержание углерода 0,02-0,8%; маркируется по ГОСТ1050.

$$C = 0,8 \times \frac{П\%}{100}, \% \quad (10)$$

здесь $П$ – содержание перлита.

Заэвтектоидная сталь: структура П+Ц_{II} ; содержание углерода 0,8-2,14%; маркируется по ГОСТ1435.

$$C = 0,8 \times \frac{П\%}{100} + 6,67 \times \frac{Ц\%}{100}, \% \quad (11)$$

здесь П, Ц – содержание перлита и цементита, соответственно.

3.4. Определение механических свойств доэвтектоидной стали по правилу Н.С.Курнакова (задача №2 контрольной работы)

$$HB_X = 850 + 1731 \times (X - 0,02), \text{ МПа} \quad (11)$$

$$s_{BX} = 280 + 692 \times (X - 0,02), \text{ МПа} \quad (12)$$

$$d_X = 15 + 44,9 \times (0,8 - X), \% \quad (13)$$

$$y_X = 20 + 64,1 \times (0,8 - X), \% \quad (14)$$

здесь X – содержание углерода в стали, %.

4. Номенклатура сталей, чугунов и цветных сплавов

Стали являются основным конструкционным материалом современного машиностроения. В таблице 9 представлена классификация сплавов железа по составу, способу производства, качеству и назначению.

Таблица 9 Классификационная таблица сплавов железа

Количественный признак	Название сплавов в соответствии с классификационным признаком	Отражение в маркировке
<i>Содержание л. э.</i>	<i>Химический состав</i>	
Σ л.э=0	углеродистая сталь	1. Л. э. обозначаются буквами русского алфавита ; 2. Количество л. э. – после буквы в целых процентах.
Σ л.э<2,5 %	низколегированная сталь	
Σ л.э=2,5-10 %	среднелегированная сталь	
Σ л.э=10-50 %	Высоколегированная сталь	
Σ л.э>50 %	легированный сплав на железоникелевой или никелевой основе	
<i>Содержание кремния</i>	<i>Способ производства</i>	
Si<0,1%	сталь кипящая	кп
Si=0,1-0,17%	сталь полуспокойная	пс
Si=0,15-0,35%	сталь спокойная	сп
<i>Содержание серы и фосфора</i>	<i>Качество</i>	

Количественный признак	Название сплавов в соответствии с классификационным признаком	Отражение в маркировке
S=0,055-0,06 % P=0,05-0,07 %	сталь обыкновенного качества	
S = 0,035 % P = 0,035 %	сталь качественная	
S = 0,025 % P = 0,025 %	сталь высококачественная	А
S = 0,015 % P = 0,015 %	сталь особовысококачественная	Ш
<i>Содержание углерода</i>	<i>Назначение</i>	
C<0,2%	строительная - сталь для сварных конструкций, машиностроительная - цементуемая сталь	
0,3<C<0,5%	сталь для силовых деталей машин (улучшаемая)	
0,5<C<0,7%	сталь для упругих элементов машин (рессорно-пружинная сталь)	
0,7<C<2,5%	сталь для режущего, мерительного и деформирующего инструмента (инструментальная сталь)	
2,5<C<4,0%	чугун – литой или наплавочный материал для работы в условиях абразивного изнашивания	

Следует иметь в виду, что *для углеродистой, низко- и среднелегированной сталей область применения однозначно определяется содержанием в них углерода*. Для высоколегированной стали область применения помимо содержания углерода определяется количеством основных легирующих элементов. Например, при содержании в стали $Cr > 13\%$ сталь относится к группе коррозионностойких, $W > 6\%$ сталь обладает красностойкостью и т.д.

В России технические сплавы имеют *буквенно-цифровую маркировку*. В основу маркировки могут быть положены следующие принципы:

- *химический состав* сплава (основной принцип маркировки сталей и ряда цветных сплавов);
- *механические свойства* сплава (принцип маркировки чугунов и ряда других сплавов);
- *эксплуатационные свойства* сплава (принцип маркировки электротехнических сталей);

- **градация по маркам** (принцип маркировки сталей обыкновенного качества и ряда других сплавов)
- другие принципы.

При маркировке легированных сплавов *легирующие элементы* условно обозначаются *буквами русского алфавита* (таблица 10), количество легирующего элемента обозначается *числом* чаще всего *в целых процентах*, которое указывается сразу за соответствующей буквой (стали, литейные латуни и бронзы) или числа, характеризующие количество легирующих элементов в сплаве, группируются отдельно (деформируемые латуни и бронзы). *Схемы маркировки* технических сплавов представлены в таблицах 11,12.

Таблица 10 Условное обозначение легирующих элементов в маркировке технических сплавов

Элемент (хим. символ)	Буква русского алфавита	
	Стали	Цветные сплавы
Азот (N)	А (в середине марки)	-
Алюминий (Al)	Ю	основа¹, А
Бериллий (Be)	-	Б
Бор (B)	Р	-
Ванадий (V)	Ф	Вам
Вольфрам (W)	В	-
Железо (Fe)	основа²	Ж
Кадмий (Cd)	-	Кд
Кобальт (Co)	К	К (Ко)
Кремний (Si)	С	К (Кр)
Магний (Mg)	-	Мг
Марганец (Mn)	Г	Мц
Медь (Cu)	Д	основа³, М
Молибден (Mo)	М	-
Никель (Ni)	Н	Н
Ниобий (Nb)	Б	Нб
Олово (Sn)	-	основа⁴, О
Свинец (Pb)	С (автоматн. сталь)	основа⁵, С
Селен (Se)	Е	Ст
Сурьма (Sb)	-	Су
Серебро (Ag)	-	Ср
Титан (Ti)	Т	Ти
Фосфор (P)	П	Ф

Элемент (хим. символ)	Буква русского алфавита	
	Стали	Цветные сплавы
Хром (Cr)	Х	Х (Хр)
Цинк (Zn)	-	основа⁶, Ц
Цирконий (Zr)	Ц	ЦЭВ

Примечания: **жирным шрифтом** выделены часто употребляемые легирующие элементы. **Основа сплавов** 1–алюминиевые конструкционные сплавы, подшипниковые сплавы; 2–стали и чугуны; 3–бронзы, латуни; 4–оловянные баббиты; припои ПОС, ПОЦ; 5–свинцовые баббиты; 6–латуни, подшипниковые сплавы.

Таблица 11 Маркировка деформируемых сплавов

Группа сплавов	ГОСТ	Схема маркировки	Примеры
Сталь обыкновенного качества	380	Ст+№марки+раскисление	Ст3кп, Ст3сп, Ст3пс
Сталь строительная	27772	С+σ, МПа	С285
Сталь качественная конструкционная	1050	%С×100+раскисление	08, 08кп, 08пс
Сталь легированная конструкционная	4543	%С×100+ЛЭ+%ЛЭ+ категория качества ЛЭ – легирующие эл-ты	30ХГС 30ХГСА 30ХГС-Ш
Сталь нелегированная инструментальная	1435	У+%С×10+ категория качества	У7 У7А
Сталь легированная инструментальная	5950	%С×10+ЛЭ+%ЛЭ	9ХФ, 13Х
		ЛЭ+%ЛЭ	ХВГ
Сталь высоколегированная	5632	%С×100+ЛЭ+%ЛЭ	12Х18Н10Т
Сплав на Fe-Ni основе	5632	ХН+%Ni+ЛЭ Ni<50%	ХН35ВТ
Сплав на Ni основе	5632	Н+%Ni+ЛЭ ХН+%Ni+ЛЭ Ni>50%	Н70МВФ ХН65МВ
Сталь подшипниковая	801	ШХ+%Cr×10	ШХ15
Сталь быстрорежущая	19265	Р+%W+ЛЭ+%ЛЭ	Р18 Р6М5
Алюминиевые сплавы	4784	Элементный состав Al-Mn и др.	АМц
		Название Высокопрочный и др.	В95
		Название Дуралюмин и др.	Д16
		Название организации-	ВАД

Группа сплавов	ГОСТ	Схема маркировки	Примеры
		разработчика ВИАМ и др.	
Латунь	15527	Л+ЛЭ+%Cu+%ЛЭ Zn - остальное	ЛЖМц59-1-1
Бронза оловянная	5017	Бр+ЛЭ+%ЛЭ Cu – остальное	БрОФ2-0,25
Бронза безоловянная	18175	Бр+ЛЭ+%ЛЭ Cu – остальное	БрАЖН10-4-4
Медно-никелевые сплавы		МН+ЛЭ+%Ni+%ЛЭ Cu – остальное	МНЖ5-1
Титановые сплавы	19807 27265	Название организации разработчика ВТ – «ВИАМ титан» ОТ – «Опытный титан» ПТ – «Прометей титан»	ВТ1-00 ОТ4-1 ПТ-7Мсв

Таблица 12 Маркировка литейных сплавов

Группа сплавов	ГОСТ	Схема маркировки	Примеры
Сталь	977	%C×100+Л	20Л
		%C×100+ЛЭ+%ЛЭ+Л	20Х13Л
Серый чугун	1412	СЧ+σ _в кгс/мм ²	СЧ15
Высокопрочный чугун	7293	ВЧ+ σ _в кгс/мм ²	ВЧ40
Ковкий чугун	1215	КЧ+ σ _в кгс/мм ² +δ%	КЧ30-6
Алюминиевые сплавы	1583	А+ЛЭ+%ЛЭ	АК12
Латунь	17711	ЛЦ+%Zn+ЛЭ+%ЛЭ Cu – остальное	ЛЦ30А3
Бронза оловянная	613	Бр+ЛЭ+%ЛЭ Cu – остальное	БрО10Ф1
Бронза безоловянная	493		БрА10Ж3Мц2 БрА10Ж4Н4Л

Деформируемые сплавы (таблица 11) используются для изготовления **металлических полуфабрикатов** (листы, трубы, сортовой и фасонный прокат, поковки). **Литейные сплавы** (таблица 12) применяются для получения **отливок**.

К **специальным сплавам** относятся сплавы узкоспециализированного применения: подшипниковые, для нагревательных элементов и др. (таблица 13).

Таблица 13 Специальные сплавы

Название	Примеры маркировки	Применение
Твердые сплавы	ВК3, Т15К6, ВК8	Армирование режущего инструмента

Название	Примеры маркировки	Применение
Электротехнические медно-никелевые сплавы (реостатные)	МНМц43-0,5 МНМц40-1,5 МНМц3-12	Образцовые сопротивления
Конструкционные медно-никелевые сплавы	МН19 МНЦ15-20 МНА13-3	Коррозионностойкие детали оборудования
Контактные материалы	МГ3, МГ5 СГ3, СГ5	Для изготовления скользящих контактов
Жаростойкие сплавы с высоким удельным сопротивлением	X13Ю4, X20Н80, X15Н60	Нагревательные элементы
Магнитотвердые материалы (стали)	ЕХ, ЕХ3, ЕХ5К5	Постоянные магниты
Электротехническая сталь	3311, 3411 (Э, ЭА, Э11*)	Сердечники трансформаторов
Магнитомягкие материалы	45Н, 45НК	Радиотехнические детали
Инвары	Н36, Н48, Н31К6	Детали приборов с низким коэффициентом линейного расширения
Элинвар	Н35ХМВ	Детали приборов с низким температурным коэффициентом модуля упругости
Баббиты	Б88, Б16, БН, БКА	Антифрикционный слой вкладышей подшипников скольжения
Алюминиевые подшипниковые сплавы	АСМ; АН-2,5; АО9-1	
Цинковые подшипниковые сплавы	ЦАМ9-1,5; ЦАМ10-5	
Антифрикционные чугуны	АЧС-1, АЧК-1, АЧВ-1	Вкладыши подшипников скольжения
Железографитовые материалы	ЖГр-3-Д-3 ЖГр-1-20пф	Втулки подшипников скольжения
Припой	ПОС-61, ПОЦ-60, ПМЦ-36, ПСр-1,5	Паяные соединения
Примечание: * - устаревшее обозначение электротехнической стали		

В задаче №3 контрольной работы предлагается расшифровать марки 10 сталей и охарактеризовать область их применения.

При расшифровке марок стали необходимо воспользоваться схемами маркировок сталей, представленными в таблицах 11,12.

Эксплуатационные свойства – свойства стали, которые определяют ее применение при эксплуатации.

Основные эксплуатационные и технологические свойства, а также область применения некоторых сталей представлены в таблице 14.

Таблица 14 Основные свойства и применение сталей

Марка	Основные свойства	Область применения
-------	-------------------	--------------------

стали	Эксплуатация	Технология	
1	2	3	4
Ст3, Ст4, Ст3Г, Ст5	П	Свариваемость	Сварные конструкции
Ст6		Закаливаемость	Клепаные конструкции
08,10	П, Пл	Свариваемость, технологиче- ская пластич- ность	Детали, изготовливаемые холодной деформацией
15,20	П	Свариваемость	После нормализации: детали котлов; После цементации: валы, оси и т.д.
30,35,40, 45,50		Закаливаемость	Детали небольшого сечения
15Л-35Л		Жидкотекучесть	Отливки
15МХ, 12Х1МФ, 15ХМ	П, ТС	Свариваемость	Детали теплообменников
25Х1МФ, 25Х2МФ		Технологиче- ская пластич- ность	Запорная арматура, крепезж
09Г2С, 14Г2, 12ГС	П, ХС	Свариваемость	Металлоконструкции, корпуса аппаратов
10ХСНД	П, ХС, КорС		
25Г2С, 35ГС	П, ХС		Арматура
30Х-50ХН	П	Закаливаемость, прокаливаемость	Детали после улучшения
У7-У9	Т, В	Закаливаемость	Слесарный, кузнечный, штамповый инстру- мент
У10,У12	Т, И		Режущий и измери- тельный инструмент
9Х1-ХВГ			Режущий ручной инст- румент
Р18-Р6М5К5	КрС, И	Закаливаемость, прокаливаемость	Металлообрабатываю-

1	2	3	4
			щий машинный инструмент
20X13 (М)	Пл, ЖП, КорС	Свариваемость	Детали, работающие с ударными нагрузками
30X13, 40X13 (М)	И, КорС	Закаливаемость	Режущий и измерительный инструмент, пружины
20X23H13 (А +Ф)	КорС, ЖС	Свариваемость	Слабонагруженные детали при высокой температуре
20X25H20C2 (А)	КорС, ЖП, ЖС		Детали печей, работающие при температуре до 1100°С
12X18H9 (А)	ХС, ЖС, КорС		Трубы, сварные конструкции
12X18H12Т (А)	ХС, ЖП, ЖС, КорС, МККС		Детали, работающие при температурах: - 196 – 600°С
17X18H9 (А)	КорС		Детали и конструкции, свариваемые точечной сваркой
06X23H28М ЗДЗТ (А)	КорС, МККС		Сварные конструкции, работающие в серной кислоте до 80°С

Принятые сокращения:

Эксплуатационные свойства сталей: **П** – прочность, **Т** – твердость, **КрС** – красностойкость, **Пл** – пластичность, **В** – вязкость, **ТС** – теплостойкость, **ХС** – хладостойкость, **КорС** – коррозионная стойкость, **И** – износостойкость, **ЖП** – жаропрочность, **ЖС** – жаростойкость, **МККС** – стойкость против межкристаллитной коррозии.

структурные классы высоколегированных сталей: **М** – мартенситный, **А** – аустенитный, **А+Ф** – аустенитно-ферритный.

Для конструкционных сталей эксплуатационными свойствами являются **прочность, пластичность, вязкость**.

Если эксплуатация изделия сопряжена с низкими рабочими температурами ($t_{\text{раб}} < 0^{\circ}\text{C}$), то помимо прочности от конструкционной стали требуется **хладостойкость**. При повышенных рабочих температурах дополнительным свойством конструкционной стали является **теплостойкость** ($t_{\text{раб}} \leq 450^{\circ}\text{C}$) или **жаропрочность** ($t_{\text{раб}} > 0,3 \times t_{\text{пл}}$).

Присутствие химически активной среды предполагает наличие у конструкционной стали таких эксплуатационных свойств, как **коррозионная**

стойкость, жаростойкость, стойкость против межкристаллитной коррозии. В этом случае применяются высоколегированные стали и сплавы по ГОСТ5632 .

Для инструментальных сталей эксплуатационными свойствами являются свойства, обеспечивающие режущему инструменту эффективную работу. Эксплуатационными свойствами инструментальных сталей являются: **твердость, вязкость, износостойкость, красностойкость.**

Технологические свойства – свойства, характеризующие способность стали перерабатываться в готовые изделия. Набор технологических свойств стали определяет способ изготовления из нее будущего изделия и приводится в справочной литературе по сталям.

Для сталей, применяемых для изготовления сварных конструкций, определяющим технологическим свойством является **свариваемость**, для сталей, применяемых для получения отливок – **литейные свойства**, для сталей, используемых для изготовления режущего инструмента – это **закаливаемость и прокаливаемость**. Для конструкционных сталей, используемых для изготовления силовых деталей машин и механизмов основными технологическими свойствами являются: **температурный интервал горячей обработки давлением, обрабатываемость резанием, закаливаемость, прокаливаемость** и, частично, **свариваемость**.

5. Термическая обработка стали

Термическая обработка – термокинетическое воздействие на металл с целью получения требуемых свойств металла за счет изменения его внутреннего строения (микроструктуры).

Термическая обработка характеризуется режимом, который включает три параметра (технологические параметры термообработки): температура нагрева, время выдержки при температуре нагрева и скорость охлаждения. Некоторые виды термической обработки стали с указанием технологических параметров представлены в таблице 15.

Таблица 15 Виды термической обработки стали

Наименование	Технологические параметры		Назначение
	Температура, °С	Охлаждение	
Одинарная обработка			
Диффузионный отжиг (гомогенизация)	1000-1100	С печью	Устранение дендритной неоднородности (ликвации)
Отжиг I рода	Ниже A ₁		Снятие наклепа
Отжиг II рода	Ниже A ₃		Перекристаллизация, снятие внутренних напряжений
Нормализация	Выше	На воздухе	Измельчение

Наименование	Технологические параметры		Назначение
	Температура, °С	Охлаждение	
	A_3^* или $A_{ст}^{**}$		структуры
Закалка	$A_3 + 30-50$ $A_1^{***} + 30-50$	Скорость выше критической	Получение структуры мартенсита
Двойная обработка			
Закалка + низкий отпуск	150-200	На воздухе	Снятие закалочных напряжений, стабилизация размеров изделия
Закалка + средний отпуск	300-400		Повышение вязкости при сохранении упругости
Закалка + высокий отпуск (улучшение)	450-650	На воздухе или в воде (для некоторых легированных сталей)	Оптимальное сочетание прочности и вязкости
Примечание: A_3 – линия GS на рис. 8; $A_{ст}$ – линия ES на рис. 8; A_1 – линия PSK на рис. 8, $A_1=727^\circ\text{C}$.			

Нормализации и отжигу подвергаются отливки, поковки, сварные соединения. Двойной термообработке подвергаются конструкционные стали для силовых деталей и упругих элементов, а также инструментальные стали.

В таблице 16 указано оборудование для термической обработки стальных изделий.

Таблица 16 Оборудование для термической обработки

Наименование	Назначение
Нагревательная печь	Нагрев и выдержка изделия по заданному режиму при закалке и отпуске
Закалочная ванна	Охлаждение при закалке и высоком отпуске некоторых легированных сталей
Твердомер Роквелла	Контроль качества термической обработки изделия

5.1. Термическая обработка стальных изделий

Стальные изделия подвергаются двойной термической обработке: закалка+отпуск. Закалка изделия выполняется с целью получения структуры мартенсита. После отпуска металл изделия приобретает соответствующую структуру и свойства, оптимальные для изделий определенной группы.

В контрольной работе (тема №3) предлагается выбрать режим термической обработки стального изделия из следующих групп: силовая деталь, упругий элемент, режущий инструмент.

5.1.1. Режим закалки

Температура закалки выбирается таким образом, чтобы перевести сталь в аустенитное состояние (полная закалка) или аустенитоцементитное состояние (неполная закалка). Полная закалка применяется для конструкционных сталей, а неполная – для инструментальных.

Конструкционные стали $t_{зак} = t_{GS} + 30...50^{\circ}C$ (15)

Инструментальные стали $t_{зак} = t_{SK} + 30...50^{\circ}C$ (16)

Выдержка изделия в печи при температуре закалки зависит от размеров закаливаемого изделия.

$$t_{выд} = k \times d, \text{ мин} \quad (17)$$

где d , мм – линейный размер (диаметр, толщина) изделия.

$k = 1-1,5$ мин/мм – коэффициент (1 – для углеродистых сталей, 1,5 – для легированных сталей).

Скорость охлаждения при закалке обеспечивается соответствующим охладителем, выбор которого зависит от группы деталей и марки стали (таблица 17).

Таблица 17 Охладители при закалке стальных изделий

Группа деталей (марки стали)	Охладитель
Силовые детали (30, 35, 40, 45, 50)	вода
Упругие элементы (60, 65, У7-У10)	масло
Режущий и мерительный инструмент, ходовые винты (У7-У12)	вода

5.1.2. Режим отпуска

Температура отпуска определяется видом отпуска (см. таблицу 15.)

- **низкий отпуск** применяется для режущего инструмента и изделий после химико-термической обработки; структура металла после низкого отпуска – мартенсит отпуска;
- **средний отпуск** применяется для упругих элементов машин; структура металла после среднего отпуска – троостит отпуска;
- **высокий отпуск** применяется для силовых деталей машин, структура металла после высокого отпуска – сорбит отпуска.

Выдержка изделия в печи при температуре отпуска

- **низкий отпуск** 1...6 часов;
- **средний и высокий отпуск** 1 час.

Охлаждение после отпуска – см. таблицу 15.

Библиографический список

1. Сафонов Б.П., Марценко К.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие / РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский ин-т, Новомосковск, 2004. – 194 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия. 1977. – 647 с.
4. Марочник сталей и сплавов / В.Г.Сорокин, А.В.Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г.Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
5. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1994. – 496 с.

Оглавление

	Предисловие.....	3
	Введение.....	3
1.	Пластическая деформация, рекристаллизация и механические свойства металлов.....	4
2.	Теория сплавов.....	10
2.1.	Анализ фазового состава сплавов по диаграмме состояния (задача №1 контрольной работы)	17
2.1.1.	Определение состава фаз сплава (правило концентраций).....	17
2.1.2.	Определение количественного соотношения фаз сплава (правило отрезков).....	18
2.2.	Прогнозирование свойств сплава по диаграмме состояния.....	19
3.	Железоуглеродистые сплавы.....	21
3.1.	Диаграмма состояния «железо-цементит».....	21
3.2.	Построение кривой охлаждения железоуглеродистого сплава (тема №1 контрольной работы).....	24
3.3.	Определение содержания углерода в стали по микроструктуре (задача №2 контрольной работы).....	25
3.4.	Определение механических свойств доэвтектоидной стали по правилу Н.С. Курнакова (задача №2 контрольной работы).....	26
4.	Номенклатура сталей, чугунов и цветных сплавов.....	26
5.	Термическая обработка стали.....	34
5.1.	Термическая обработка стальных изделий.....	35
5.1.1.	Режим закалки.....	36
5.1.2.	Режим отпуска.....	36
	Библиографический список.....	37

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.
Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9.
Адрес института: 301650 Новомосковск, Тульская обл., ул. Дружбы, 8