

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 6-05-0722-05
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»
очной формы обучения*

Часть 1



Могилев 2026

УДК 669.01
ББК 30.3
МЗ4

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «26» января 2026 г.,
протокол № 11

Составитель канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Содержатся основные теоретические положения и методические рекомендации к выполнению лабораторных работ по курсу «Материаловедение и композиционные материалы» для студентов специальности 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной формы обучения.

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Часть 1

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов и сплавов.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Макроскопический метод исследования металлов и сплавов	8
3 Лабораторная работа № 3. Микроскопический метод исследования металлов и сплавов.....	15
4 Лабораторная работа № 4. Анализ диаграмм состояния двойных сплавов.....	20
5 Лабораторная работа № 5. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии	26
6 Лабораторная работа № 6. Закалка стали	30
7 Лабораторная работа № 7. Отпуск закаленной стали	35
8 Лабораторная работа № 8. Изучение зависимости между структурой и свойствами стали после различных видов термической обработки.....	39
Список литературы.....	47

Часть 1

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

1 К работе с учебным оборудованием допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторной работы.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами технической эксплуатации соответствующего учебного оборудования.

4 Запрещается выполнять лабораторные работы на оборудовании и установках с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током.

5 Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования.

6 В лаборатории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

7 **Перед началом работы** необходимо провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе, убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки.

8 Проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов и расходных материалов.

9 Обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

10 **При выполнении лабораторной работы** запрещается включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя, вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки, перемещать приборы во время работы.

11 Во избежание удара электротоком необходимо отключать печное оборудование перед загрузкой и выгрузкой образцов.

12 Для загрузки и выгрузки образцов из печного пространства использовать специальные перчатки и клещи.

13 Не допускать контакта раскаленной заготовки с телом, одеждой, мебелью и полом.

14 **По окончании работы** необходимо отключить от электросети оборудование и приборы.

15 Убрать рабочее место.

16 В случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов и сплавов

Цель работы: ознакомление с основными методами измерения твердости; приобретение навыков в работе с соответствующими приборами.

Оборудование и инструмент: твердомер Бринелля (ТБ-3000), твердомер Роквелла (ТР 5014), твердомер Виккерса (ИТ 5010-01).

Твердостью называют свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое.

Измерение твердости вследствие быстроты и простоты процесса и возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое применение для контроля качества изделий. Наибольшее применение нашли методы по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, схема реализации которых приведена на рисунке 1.1.

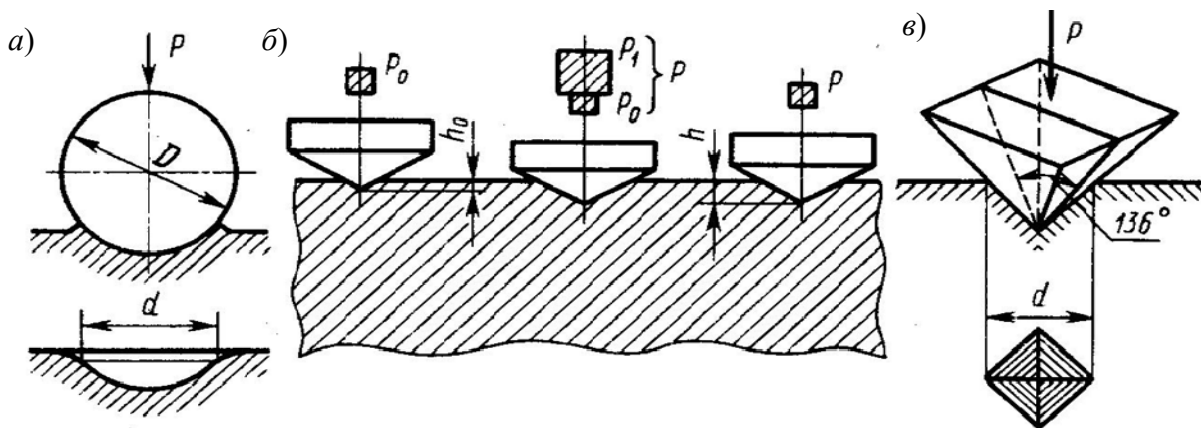


Рисунок 1.1 – Схема определения твердости по Бринеллю (а), Роквеллу (б), Виккерсу (в)

Определение твердости по Бринеллю.

Сущность метода заключается во вдавливании стального шарика диаметром D в изделие под действием нагрузки P и измерении диаметра отпечатка d после снятия нагрузки (см. рисунок 1.1, а).

Твердость определяют как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка по формуле

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)},$$

где F – прилагаемая нагрузка, Н;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Толщина образца должна превышать глубину отпечатка в 10 раз. Минимальная толщина испытуемого образца – 0,1 мм. При этом испытания проводятся шариком диаметром 1,0 мм при нагрузке 49,03 Н. Обычно определение твердости осуществляется шариком диаметром 10,0 мм при нагрузке 29420 Н и продолжительностью выдержки под нагрузкой 10 с. В этом случае твердость обозначается цифрами, характеризующими ее величину, и буквами НВ, например: 170 НВ (Н-hard – твердость, В – метод Бринелля). При нестандартных условиях испытаний после букв НВ указываются условия испытания в следующем порядке: D , F и время выдержки под нагрузкой (в секундах), например: 190 НВ 5/7350/20.

Между временным сопротивлением σ_s и числом твердости НВ существует зависимость для стали и алюминиевых сплавов $\sigma_s \approx 0,33 \text{ НВ}$, для медных сплавов $\sigma_s \approx 0,45 \text{ НВ}$.

Метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 НВ, а для цветных металлов – более 200 НВ. При использовании вместо стального шарика твердосплавного предельное значение твердости не должно превышать 650 ед. В этом случае в обозначение твердости вводится дополнительно буква W, например: 570 HBW.

Определение твердости по Роквеллу.

Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом с углом у вершины 120° (шкалы А и С) или со стальным шариком диаметром 1,58 мм (шкала В) в испытуемый образец под действием последовательно прилагаемых предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок и измерений остаточного увеличения глубины внедрения наконечника e ($e = (h - h_0) / 0,002$) после снятия основной нагрузки в единицах измерения 0,002 мм. При испытании с использованием шкалы А нагрузка составляет 588 Н, шкалы С – 1470 Н, шкалы В – 980 Н.

Схема определения твердости по Роквеллу приведена на рисунке 1.1, б. Под предварительной нагрузкой P_0 индикатор прибора вдавливается в образец на глубину h_0 . Затем на испытуемый образец подается полная нагрузка $P = P_0 + P_1$, и глубина погружения наконечника возрастает. После снятия нагрузки прибор показывает число твердости по Роквеллу HR (Н-hard – твердость, R – метод Роквелла). Твердость является величиной, обратной глубине вдавливания. Единица твердости по Роквеллу – безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

Числа твердости определяются по формулам

$$\text{HRC (A)} = 100 - e; \text{HRB} = 180 - e.$$

Шкала А используется для измерения твердости очень твердых материалов ($> 67 \text{ HRC}$), а также для тонких и твердых поверхностных слоев (0,5...1,0 мм). По шкале В определяют твердость сравнительно мягких (незакаленных) материалов ($< 400 \text{ НВ}$). Шкала С используется для испытания материалов, имеющих высокую твердость (после закалки) ($> 450 \text{ НВ}$).

Пределы измерения твердости по шкале А – 70...85 ед., шкале В – 25...100 ед., шкале С – 22...65 ед. Условная запись твердости для разных шкал – HRA, HRB,

HRC. Например, 60 HRC (твердость 60 ед. по шкале C). В настоящее время применяется обозначение HRCэ – это твердость, воспроизводимая государственным специальным эталоном.

Твердость по Виккерсу.

Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды (угол при вершине 136°), в образец под действием нагрузки P и измерении диагонали отпечатка d (в миллиметрах), оставшегося после снятия нагрузки (см. рисунок 1.1, в). Нагрузка может изменяться в пределах 9,8...980 Н.

Твердость по Виккерсу определяется по формуле

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2}.$$

Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка.

В стандартных условиях испытаний (при нагрузке 294 Н, времени выдержки 15 с) обозначение твердости по Виккерсу выглядит как, например, 430 HV. Метод Роквелла, по сравнению с другими методами, имеет преимущество, которое заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла фиксируется индикатором, при этом отпадает необходимость в измерении размеров отпечатка и расчетах.

Вместе с тем необходимо запомнить следующие приближенные соотношения: $1 \text{ HRC} \approx 10 \text{ HB}$ и $1 \text{ HB} \approx 1 \text{ HV}$, которые позволяют оперативно определять пределы прочности для типовых изделий. Например, требуется определить σ_s стали вала редуктора после его улучшения, т. е. с твердостью $\approx 30 \text{ HRC}$. Если учесть, что $30 \text{ HRC} \approx 300 \text{ HB}$, то $\sigma_s \approx 300/3 \approx 100 \text{ кгс/мм}^2$.

Методы HB и HRB применяются для мягких материалов, HRC – для твердых, HRA – для сверхтвердых материалов (например, изделий из карбида вольфрама) и тонких твердых покрытий. Метод Виккерса является универсальным.

Твердость типовых изделий из углеродистых сталей указана в таблице 1.1. Если твердость указанных изделий не соответствует рекомендуемым значениям, можно сделать вывод о браке термической обработки или особых условиях их эксплуатации.

Задание

1 Зарисовать схемы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу. Записать формулы определения твердости и условные записи твердости для разных методов.

2 Записать области применения различных методов.

3 Усвоить значения твердостей типовых изделий из углеродистых сталей.

Таблица 1.1 – Твердость типовых изделий из углеродистых сталей

Изделие	Рекомендуемая твердость, HRC
Ответственные детали машин (валы, оси, шатуны, тяги ...)	25
Упругие элементы (пружины, рессоры)	40
Инструменты, подвергаемые ударным нагрузкам (зубила, топоры, молотки...)	50
Ножи общего назначения	52...58
Металлорежущий инструмент (сверла, фрезы, метчики, резцы, пилы)	60...65
Алмаз (эталон)	100

Контрольные вопросы

- 1 Укажите области применения различных методов.
- 2 Какие твердости у типовых изделий?
- 3 На каком приборе следует определять твердость материала, из которого изготовлены консервные банки, гаечные ключи, ножи, лезвия безопасных бритв, медная фольга?

2 Лабораторная работа № 2. Макроскопический метод исследования металлов и сплавов

Цель работы: ознакомление с методикой проведения макроанализа; изучение макрошлифов, поверхностей изломов; приобретение навыков зарисовки макроструктур; выявление дефектов и причин разрушения металлов.

Оборудование и инструмент: шлифовально-полировальная машина FORCIPOLE IV с автоматической головкой FORCIMAT, стереоскопический микроскоп CM0665.

Изучение строения металлов и сплавов невооруженным глазом, а также при помощи лупы микроскопа с увеличением 40 крат носит название макроанализа. Строение металлов, изучаемое при его помощи, называется макроструктурой. Макроанализ дает представление об общем строении металла, позволяет оценить его качество после различных видов обработки: литья, обработки давлением и пр. С его помощью можно определить:

- вид излома – вязкий, хрупкий, нафталинистый, усталостный и др.;
- нарушения сплошности металла – усадочная рыхлость, центральная пористость, свищи, дефекты сварки (непровары, газовые пузыри) и др.;
- различные поверхностные дефекты заготовок;
- дендритное строение, зону транскристаллизации, размеры и ориентацию зерен в металле;

– химическую неоднородность литого металла (ликвацию) и присутствие в нем грубых инородных включений, волокнистую структуру деформированного металла;

– неоднородность металла, вызванную термической или химико-термической обработкой и др.

Макроанализ излома металла.

По виду излома устанавливают размеры зерна, характер и причины разрушения изделия, неоднородность структуры, обусловленную термической и химико-термической обработкой (толщину цементованного, закаленного, обезуглероженного слоя) и другие особенности строения. Существует связь между наблюдаемой на изломе величиной зерна и свойствами металла. Особенно резко величина зерна влияет на ударную вязкость. Величина зерна зависит от многих факторов. При ускоренном охлаждении жидкого металла или при введении в жидкий металл специальных присадок-модификаторов структура получается мелкозернистой.

При последующем высокотемпературном и длительном нагреве металла зерна могут увеличиваться до значительных размеров. Причиной такого роста зерен является стремление системы уменьшить запас свободной поверхностной энергии, при этом происходит слияние отдельных мелких зерен в более крупные.

Пластическая деформация (прокатка, ковка, штамповка), термическая обработка (отжиг, нормализация, закалка) могут вернуть сплаву мелкозернистое строение, измельчить крупное зерно.

Хрупкий излом имеет кристаллическое строение. В нем обычно можно видеть форму и размер зерен металла. Такой излом проходит или по границам зерен (межкристаллический), или по зернам (транскристаллический). Его разновидностями являются нафталинистый, камневидный изломы (рисунки 2.1 и 2.2). Хрупкий излом характеризуется чётко выраженными границами зёрен без следов их пластической деформации.

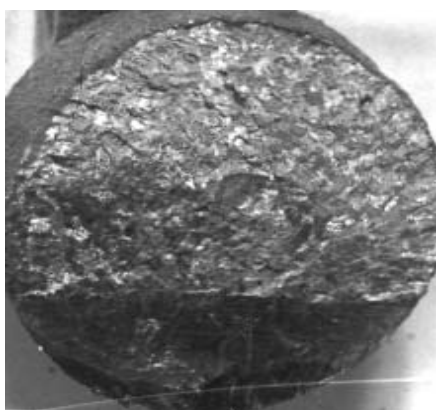


Рисунок 2.1 – Нафталинистый излом

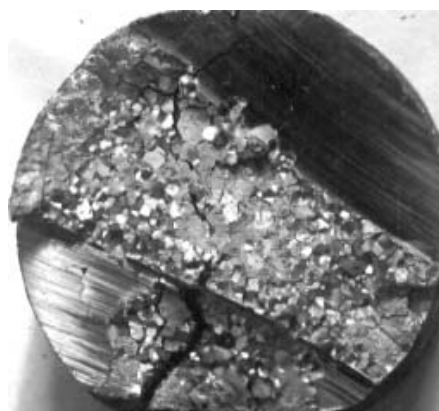


Рисунок 2.2 – Камневидный излом

Вязкий излом имеет волокнистое строение. Из-за большой степени пластической деформации форма и размеры зерен не различаются (рисунок 2.3).

Характер излома, полученного в результате разрушения деталей машин,

может указать, произошло ли их разрушение мгновенно или процесс разрушения развивался постепенно (часы, сутки, месяцы).

При постепенном развитии процесса разрушения образуется характерный излом, называемый *усталостным*. Процесс разрушения в этом случае обычно начинается у поверхности детали и постепенно распространяется вглубь, давая сглаженную поверхность в местах зарождения трещин.

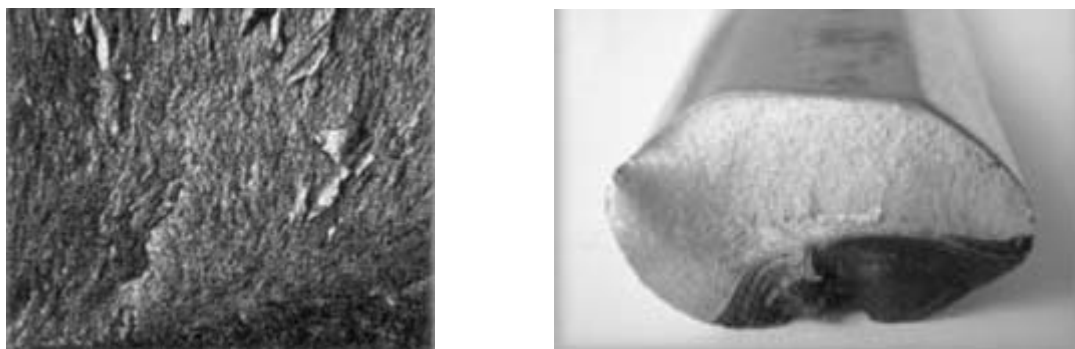


Рисунок 2.3 – Внешний вид вязкого излома

Сглаженная поверхность получается в результате длительного контакта (трения) двух поверхностей образовавшейся микротрещины. Усталостная зона начинается от так называемого очага разрушения, каким могут выступать микронесплошность, шлаковое включение и пр.

Когда сечение детали значительно ослабевает в результате роста трещины, происходит мгновенное разрушение детали с кристаллическим строением второй части излома. Таким образом, усталостный излом имеет две зоны разрушения: усталостную с мелкозернистым, фарфоровидным с отдельными участками блестящей гладкой поверхности и зону обычного разрушения.

Если деталь работала без перегрузок, а металл обладал высокой пластичностью, то зона медленного разрушения значительно больше зоны мгновенного разрушения. Если работа детали сопровождалась временными перегрузками или металл имел высокую твердость и низкую вязкость, то зона медленного разрушения занимает малую площадь в сечении излома, а зона мгновенного излома – большую.

Макроанализ шлифов.

Образцы (*темплеты*) для макроанализа вырезают из наиболее характерных участков заготовок. Например, при исследовании разрушенных изделий макрошлиф должен выявлять те дефекты, которые явились причиной разрушения.

Обработка образцов заключается в шлифовании их с охлаждением на станках с помощью шлифовальной бумаги. Ряд дефектов макроструктуры уже может быть рассмотрен на полученном макрошлифе, но часто требуются дополнительные меры для их выявления. Они делятся на три основные группы:

1) *метод глубокого травления*, позволяющий выявить трещины различного типа, обезуглероженный или цементованный слой, дендритную структуру и т. д.;

2) *метод поверхностного травления*, позволяющий выявить отдельные детали структуры (размеры зерна, направление роста кристаллов, неоднородность структуры), макроструктуры сварного шва и др. В состав реактивов входят различные кислоты, соли и другие вещества;

3) *метод отпечатков*, позволяющий получить изображение макроструктуры на фотобумаге или фотопленке. При этом материал с нанесённым на него реактивом прижимается к поверхности шлифа, реактив реагирует с определенными структурными составляющими, в результате чего происходит характерное окрашивание определенных участков. Этим методом определяют в сталях количество, размер и форму зернистых включений, распределение оксидных включений, фосфора.

Дефекты макроструктуры.

Центральная пористость (усадочная) в непрерывно-литой заготовке (рисунки 2.4).

Пористость по оси – мелкие пустоты, не заварившиеся при горячей обработке давлением слитка (рисунок 2.5).

Причины возникновения: не обеспечивается достаточное поступление жидкого металла в объемы, где заканчивается затвердевание.

Предупреждение: оптимальная температура металла при разливке, соблюдение скорости разливки.

Примечание – Если усадочные поры не вскрыты, то при горячей деформации они завариваются.

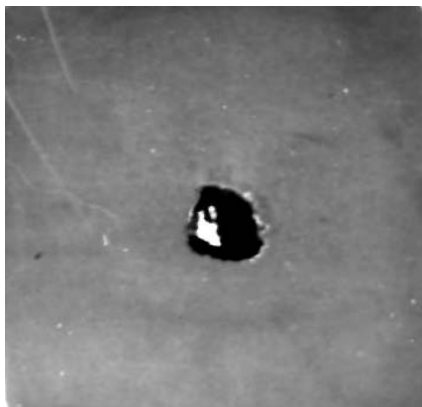


Рисунок 2.4 – Единичная пора



Рисунок 2.5 – Пористость по оси

Усадочная раковина – полость, возникающая в слитке вследствие усадки стали (см. на стенде образцы 1 и 2).

Пористость по сечению – мелкие травящиеся точки, расположенные по всему сечению макрошлифа.

Причины возникновения: недостаточное раскисление стали, при быстром затвердевании из расплава не полностью удалились газы.

Пустоты различной величины и формы образуются вследствие раскрытия термических трещин и называются скворечниками.

Ковочные трещины. Неверный режим ковки может вызвать появление ко-

вочных трещин, которые появляются внутри заготовки около осевой зоны в виде трещин по диагоналям (ковочного креста) либо нескольких трещин, направленных от оси заготовки в стороны.

Осевые интеркристаллитные трещины, в отличие от ковочных, более прямолинейные и широкие. В изломе межкристаллитные трещины имеют вид грубых окисленных расслоений. Вследствие чрезмерного повышения температуры, вызывающего диффузию кислорода вдоль границ зерен, возникает явление пережога. Пережог выглядит в виде сильно разветвленных трещин, часто расположенных в виде сетки (рисунок 2.6). В процессе горячей пластической деформации при пережоге может произойти разрушение по границам зерен.

Внутренние трещины от напряжений обусловлены чрезмерно высокими внутренними напряжениями, возникающими в процессе формирования заготовки.

Диагональные трещины в отливках (рисунок 2.7) возникают вследствие неравномерного охлаждения слитка в кристаллизаторе. Трещины, расположенные перпендикулярно к поверхности заготовки, возникают из-за резкого охлаждения или из-за напряжений, возникающих при деформации поверхности заготовки. Трещины, не выходящие на поверхность заготовки, в дальнейшем завариваются при горячей деформации, т. к. границы их не окислены.

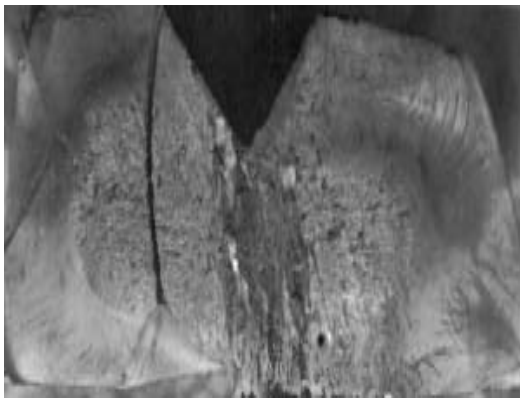


Рисунок 2.6 – Пережог

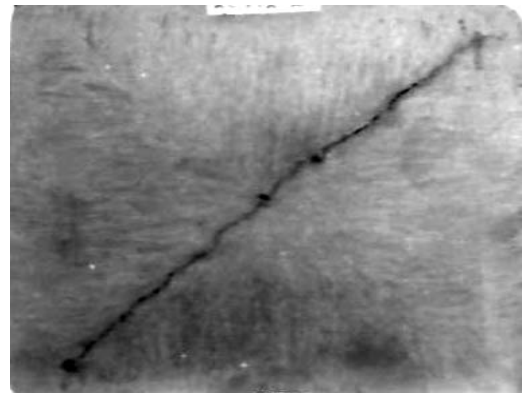


Рисунок 2.7 – Диагональные трещины

Меры предупреждения: регламентировать содержание вредных примесей в металле, соблюдать температурный интервал разливки, оптимизировать процесс ОМД.

Флокены – тонкие извилистые трещины длиной до 30 мм, образующиеся в стали при повышенном содержании водорода (рисунок 2.8). В изломе флокены выявляются в виде округлых пятен светлого оттенка. Такая сталь не пригодна для применения. Появление флокенов связано с растворением в стали водорода, который при быстром охлаждении выделяется из раствора и создает значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию трещин. При последующей горячей деформации в заготовке могут образоваться скворечники от флокенов (рисунок 2.9).

Инородные металлические или неметаллические включения – кусочки различного рода нерастворившихся ферросплавов, утеплительных засыпок,

шлака или случайно попавших в слиток частичек окисленного металла.

В прокате обнаруживаются в виде волосовин (рисунок 2.10), неправильных по форме полостей, заполненных неметаллическими включениями (рисунок 2.11), расслоений (рисунок 2.12). Чем острее форма включения, тем большая опасность возникновения в этих местах высоких напряжений, поэтому эти места могут явиться началом возникновения трещин усталости.

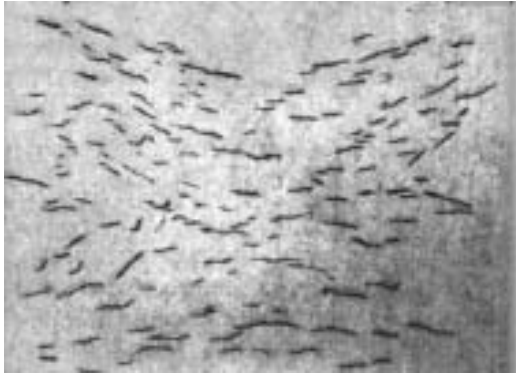


Рисунок 2.8 – Флокены

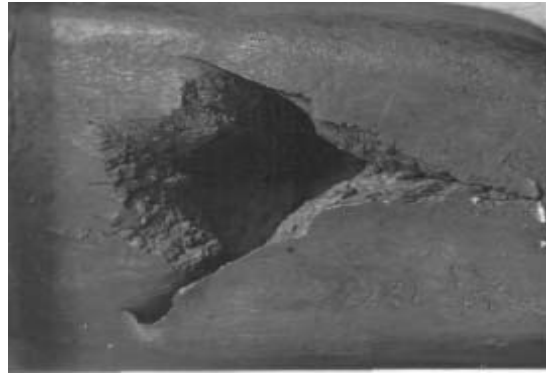


Рисунок 2.9 – Скворечник



Рисунок 2.10 – Волосовины

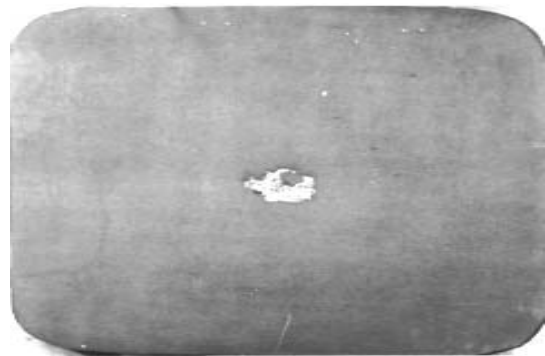


Рисунок 2.11 – Включения шамота

Ликвация – неоднородность участков металла по химическому составу и структуре. *Ликвационный квадрат* представляет собой контуры ликвации, определяемые конфигурацией слитка (рисунки 2.13 и 2.14).

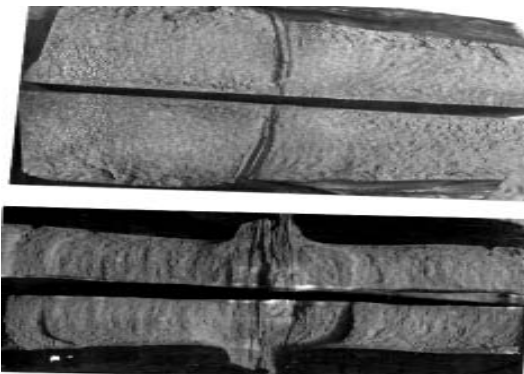


Рисунок 2.12 – Расслоения



Рисунок 2.13 – Ликвация

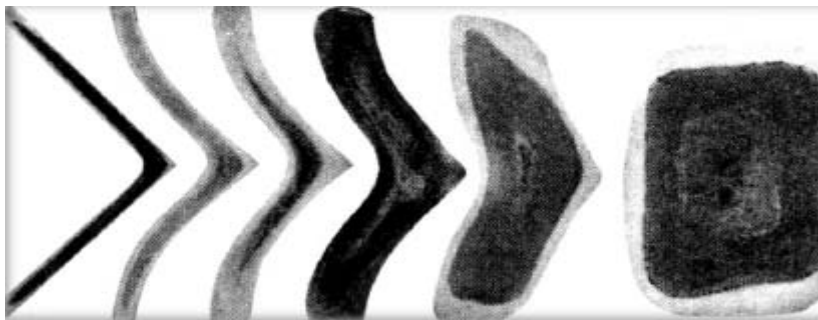


Рисунок 2.14 – Наследование прокатом распределения серы в слитке

Дефекты поверхности.

1 *Трещины от напряжений* обусловлены искажением профиля, высокой скоростью разливки металла, высоким содержанием вредных примесей, неравномерным затвердеванием, трением слитка в кристаллизаторе и другими причинами, вызывающими высокие напряжения.

2 *Поры* возникают из-за избыточной влажности, газовыделения формы или смазки кристаллизатора, недостаточной раскисленности стали.

3 *Загрязнения на поверхности заготовки, вкатанные металлические и неметаллические частицы* – скопления неметаллических включений в виде пристывших, прикатанных кусочков шлака, металла или инородных частиц (см. образец 4), попавших в металл.

4 *Отслоения* возникают на поверхности проката из-за наличия газовых пузырей, неметаллических включений, усадочной раковины и т. д.

5 *Рябизна* – углубления от вдавленной окалины, образовавшиеся при ковке, прокатке или правке металла (см. образец 5).

6 *Закат* – прикатанный продольный выступ металла с одной или двух диаметрально противоположных сторон, образовавшийся в результате вдавливания уса, подреза (см. образец 6).

Дефекты формы.

1 *Раздутие (выпуклость) заготовки* возникает из-за деформации корки заготовки под действием статического давления жидкого металла при недостаточном охлаждении в кристаллизаторе (см. образец 7).

2 *Отклонения от формы* – овал (вместо окружности), не квадратность (см. образец 7) и др.

3 *Усы* – продольные выступы на поверхности профилей проката, возникающие из-за неправильной калибровки, выработка калибра, низкой температуры деформируемого металла (см. образец 8).

В сварных соединениях могут иметь место следующие дефекты: горячие трещины (см. образец 9), холодные трещины, зоны несплавления, непровары (см. образец 10), подрезы, наплывы, прожоги и др.

Задание

1 Изучить основные виды макродефектов заготовок и готовых изделий.

2 Для выданного образца: зарисовать дефект и определить его вид (дать описание); установить причину возникновения дефекта; дать рекомендации для

устранения дефекта; описать влияние дефекта на эксплуатационные характеристики металлоизделий.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите причины возникновения типовых дефектов.
- 2 Как влияют типовые дефекты на эксплуатационные свойства изделий?

3 Лабораторная работа № 3. Микроскопический метод исследования металлов и сплавов

Цель работы: ознакомление с процессом приготовления микрошлифов; изучение устройства металлографического микроскопа; проведение микроанализа сплавов.

Оборудование: микроскринер МС ЛабоМет-1, шлифовально-полировальная машина FORCIPOL IV с автоматической головкой FORCIMAT.

Микроскопический метод исследования металлов и сплавов (микроанализ) изучает структуру металла при помощи микроскопа на специально приготовленных образцах. Для микроанализа вырезают образец, изготавливают из него шлиф, полируют рабочую поверхность, производят травление поверхности специальными реактивами и исследуют структуру при помощи микроскопа.

Вырезанный образец устанавливается в держатель автоматической головки FORCIMAT (рисунок 3.1) и обрабатывается шлифовальной бумагой с постепенным снижением зернистости до полного удаления рисок.

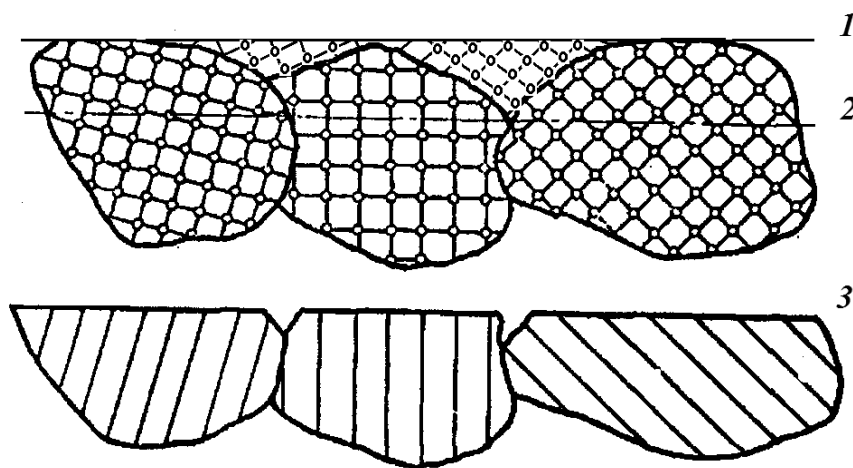


Рисунок 3.1 – Шлифовально-полировальная машина FORCIPOL IV с автоматической головкой FORCIMAT

Полировка ведется на кругах, обтянутых сукном, на которое периодически наносится водная взвесь оксида хрома. При исследовании зеркальной поверхности металла под микроскопом можно обнаружить на светлом поле отдельные

темные точки и линии, представляющие собой неметаллические включения или дефекты поверхности (раковины, микротрещины, следы обработки).

Для выявления микроструктуры образец подвергают травлению, которое позволяет определить число, размеры, форму, соотношение структурных составляющих. Перед травлением поверхность обезжиривается спиртом, а затем погружается в реактив для выявления микроструктуры. Травление заключается во взаимодействии металла с химически активными растворами щелочей, солей, кислот в спирте. Так как структура поверхности неоднородна, то различные ее составляющие имеют различный электродный потенциал, и при погружении в реактив поверхность представляет собой комплекс микрогальванических элементов. Участки поверхности с низким потенциалом играют роль анодов и будут растворяться. Наиболее интенсивно протравливаются границы зерен металла, которые обогащены различными примесями, а это способствует образованию микрогальванических элементов. В результате на границах зерен образуются углубления и поверхность микрошлифа будет иметь сложный микрорельеф, характеризующий строение металла (рисунок 3.2).



1 – поверхность образца; 2 – поверхность микрошлифа; 3 – поверхность микрошлифа после травления

Рисунок 3.2 – Поверхностный слой микрошлифа после травления

Обычно железоуглеродистые сплавы травят в 4–5-процентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте, при этом выявляются форма, размер и распределение фаз и структурных составляющих сплава (феррита, цементита, перлита).

Для микроанализа структуры металлов используется микроскринер на базе микроскопа ЛабоМет-1, который может использоваться для исследования строения непрозрачных предметов (металлов, пластмасс, металлокерамики и т. д.).

Оптическая схема микроскопа.

Лучи от источника света 1 (рисунок 3.3) проходят через коллектор 2, теплофильтр 3, осветительную линзу 4, диафрагму 5, отражаются от полупрозрачной пластины 6 и направляются через объектив 7 на объект исследования 8.

Лучи, отраженные от поверхности объекта, снова проходят через объектив, который совместно с линзой 9 проецирует изображение объекта на окуляры 10. С помощью призмы 11 изменяется направление оптической оси микроскопа. Призменный блок 12 бинокулярной насадки разделяет пучок лучей и обеспечивает возможность бинокулярного наблюдения объекта. При работе в поляризованном свете дополнительно используют анализатор 13 и поляризатор 14. Для повышения контрастности применяют светофильтр 15.

В состав микроскопа (рисунок 3.4) входят осветитель отраженного света 9, штатив с механизмами фокусировок 4, револьверное устройство 14, предметный столик 16, тринокулярная насадка 1 и блок питания осветителя. Грубая фокусировка (перемещение штатива по вертикали) производится вращением рукоятки 3, точная фокусировка – вращением рукоятки 5.

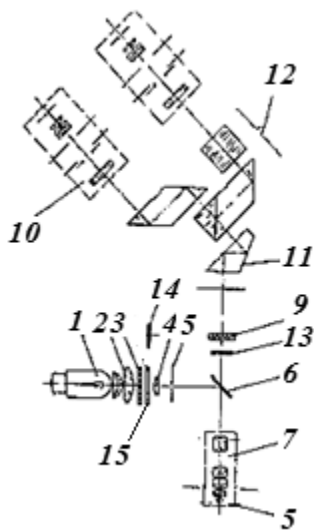


Рисунок 3.3 – Оптическая схема микроскопа

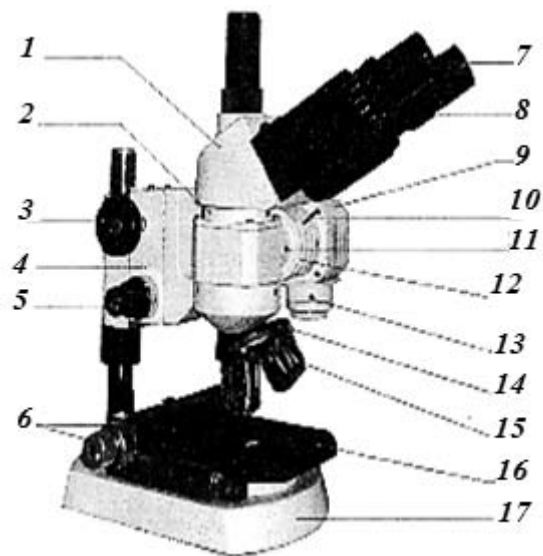


Рисунок 3.4 – Общий вид микроскопа ЛабоМет-1

Револьверное устройство обеспечивает установку в рабочее положение четырех сменных объективов 15, имеющих увеличение $V = 4 (\times 64)$, $V = 10 (\times 160)$, $V = 20 (\times 320)$, $V = 40 (\times 640)$. Предметный столик позволяет перемещать объект в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью рукояток 6.

Объектив представляет собой систему линз, обращенных к рассматриваемому объекту.

Окуляр – это система линз, обращенных к глазу наблюдателя. Окуляры дают мнимое увеличенное изображение, полученное объективом.

Общее увеличение, которое дают микроскопу совместно объектив и окуляр при визуальном наблюдении, определяется как

$$U = U_{об} U_{ок},$$

где $U_{об}$ – увеличение объектива микроскопа (маркируется на объективе);
 $U_{ок}$ – увеличение окуляра (маркируется на окуляре).

Микроанализ позволяет проводить измерения величины зерна, глубины слоя, число и соотношение фаз. При определении конкретных размеров используются объекты-микрометры.

Объект-микрометр – стеклянная или металлическая пластинка, на которую нанесена шкала длиной в 1 мм с ценой деления 10 мкм (0,01 мм).

На дисплее микроскринера (рисунок 3.5) размещены деления (вертикальные и горизонтальные). Для определения цены деления дисплея объект-микрометр устанавливается вместо шлифа на предметный столик и совмещаются шкалы объект-микрометра и линии на дисплее. После совмещения совпадающих участков шкал проводится вычисление цены деления дисплея по формуле

$$Ц_{дис} = Ц_{об} \cdot T_{дис} / A_{ок},$$

где $Ц_{об}$ – цена деления объект-микрометра, равная 0,01 мм;

$T_{дис}$ – число делений на дисплее, совпавших с числом делений окуляра-микрометра $A_{ок}$.

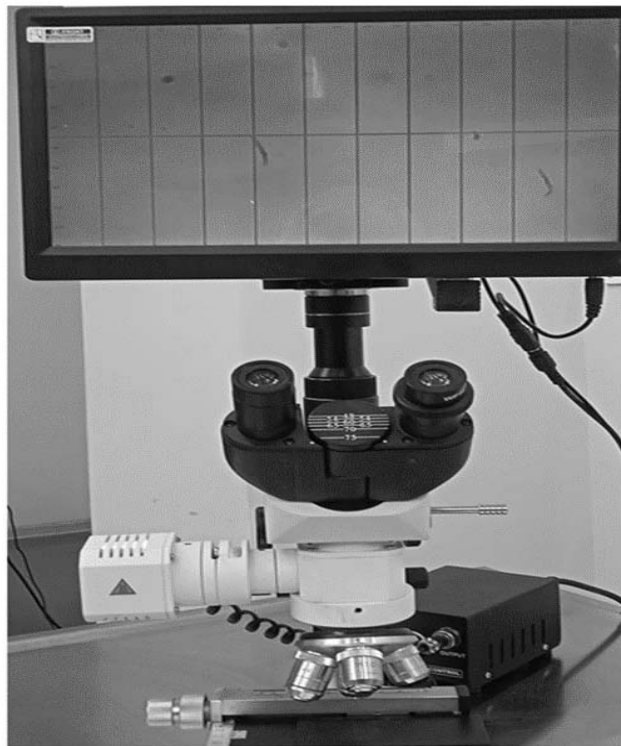


Рисунок 3.5 – Общий вид микроскринера

Зная цену деления дисплея микроскринера, можно измерить интересующий микрообъект, помещая его на предметный столик.

Например, средняя величина зерна d_z исследуемого металла или сплава может быть вычислена следующим образом:

$$d_z = Ц_{дис} \cdot N_{дис} / n_z,$$

где $Ц_{дис}$ – цена деления на дисплее микроскринера, мм;

$N_{дис}$ – число делений на дисплее микроскринера, в границах которых подсчитывалось количество зерен;

n_z – среднее число зерен, уместившихся на отрезке длиной $C_{дис} \cdot N_{дис}$ при горизонтальном и вертикальном положениях шкал дисплея.

Считая приближенно средний размер зерна равным среднему диаметру зерна, площадь зерна определяется по формуле

$$S_{cp} = (\pi \cdot d_{cp}^2)/4.$$

Рассчитав площадь зерна, определяют его номер согласно таблице 3.1. Чем меньше размер зерна, тем выше комплекс механических свойств образца (при снижении размеров зерна от № 1 до 14 прочность любого сплава возрастает в 7–8 раз). Это объясняется тем, что границы зерен являются препятствиями для движения дислокаций.

Таблица 3.1 – Зависимость между номером зерна и его площадью

Номер зерна	Площадь зерна, мкм ²		
	наименьшая	средняя	наибольшая
1	40 000	64 000	80 000
2	20 000	32 000	40 000
3	10 000	16 000	20 000
4	5 000	8 000	10 000
5	2 500	4 000	5 000
6	1 250	2 000	2 500
7	625	1 000	1 250
8	312	500	625
9	156	250	312
10	78	125	156
11	38	62	78
12	19	31	38
13	10	16	20
14	5	8	10
Примечание – Зерна № 1–4 считаются крупными, а свыше № 6 – мелкими			

Задание

- 1 Изучить процесс приготовления микрошлифов и их травления.
- 2 Изучить устройство микроскринера. Зарисовать оптическую схему микроскопа.
- 3 Зарисовать структуру микрошлифа и определить номер зерна.

Контрольные вопросы

- 1 Изложите методику приготовления и травления шлифов.
- 2 Как определяют цену деления на дисплее и размер зерна сплава?
- 3 Причина повышения свойства сплава при измельчении зерен.

4 Лабораторная работа № 4. Анализ диаграмм состояния двойных сплавов

Цель работы: изучение основных типов диаграмм состояния двойных систем; приобретение практических навыков изучения превращений, протекающих при кристаллизации сплавов; анализ полученных данных и определение возможности их использования на практике.

По диаграмме состояния сплава (ДСС) можно представить полную картину образования сплава, процессы перекристаллизации в твердом состоянии, оценить технологические свойства сплава, определить, какую термическую обработку может воспринимать сплав.

ДСС (рисунок 4.1) показывает графически, как с изменением химического состава и температуры изменяются структура, количество и состав фаз, находящихся в равновесии. *Фаза* – это однородная часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую все свойства изменяются скачком.

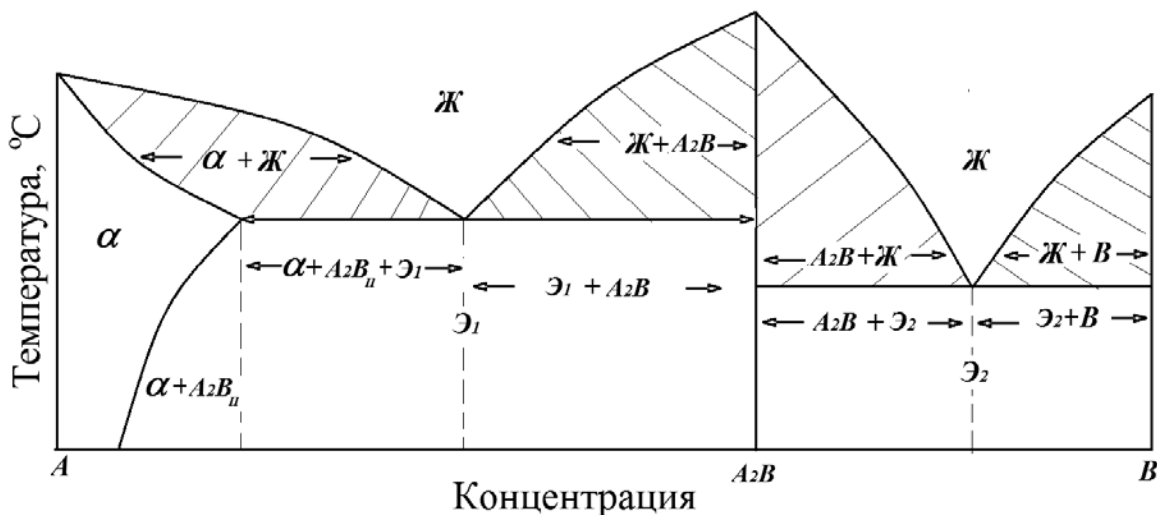


Рисунок 4.1 – Диаграмма состояния для компонентов A и B

Любая точка ДСС показывает:

- химический состав сплава;
- температуру сплава;
- фазовый и структурный состав сплава.

В качестве примера на рисунке 4.1 приведена ДСС для металлов A и B . По оси ординат располагается температура, по оси абсцисс – концентрация компонента B . Из диаграммы видно, что выше заштрихованных областей (выше линии ликвидуса) сплавы находятся в жидком состоянии (лат. Liquidus – жидкий); ниже заштрихованных областей (ниже линии солидуса) сплавы находятся в твердом состоянии (лат. Solidus – твердый). В заштрихованных областях присутствуют две фазы (жидкая и кристаллы твердой фазы).

Два металла A и B (компоненты) могут образовывать в рассматриваемой системе фазы, указанные на рисунке 4.1:

- химическое соединение определенного состава, которое может быть выражено формулой A_mB_n , где m и n – простые целые числа, например A_2B ;
- твердые растворы α , β , γ , ..., ω , например α -твердый раствор на основе компонента A ;
- механические смеси фаз.

Предельная растворимость компонента B в компоненте A определяется вертикальной штриховой линией.

Из диаграммы видно, что с понижением температуры растворимость компонента B в α -твердом растворе уменьшается.

На горизонтальных линиях происходят *эвтектические превращения*: жидкий раствор превращается в механическую смесь – эвтектику (от греч. εὐτηκτος – легкоплавкий). Например, первая эвтектика $\mathcal{E}_1$ состоит из кристаллов тех фаз, которые находятся на концах горизонтальной кривой (кристаллов α -твердого раствора и кристаллов химического соединения A_2B).

Эвтектические сплавы являются более легкоплавкими, чем все остальные сплавы, и обладают *наилучшими литейными свойствами*, но очень низкой пластичностью.

В отличие от них *однофазные твердые растворы* всегда отличаются *высокой пластичностью* (что позволяет производить обработку давлением без нагрева) и низкими литейными свойствами. В технологическом смысле сплавы с эвтектикой и однофазными твердыми растворами являются антиподами.

Алгоритм анализа диаграмм состояния сплавов.

1 Под *наклонным* участком линии солидус находится только одна фаза – α -твердый раствор (рисунок 4.2).

2 Если имеется *эвтектика*, необходимо из самой низкотемпературной точки опустить перпендикуляр и указать состав эвтектики (ее состав смотри на концах прямой эвтектического превращения, смесь зерен α и B).

3 Под *горизонтальной прямой* линии солидус находится механическая смесь фаз, состав этой смеси смотри на «боковых стенках», ограничивающих эту область (под левым участком прямой – смесь зерен $\alpha + B_{II} + \mathcal{E}$, под правым участком прямой – смесь зерен $\mathcal{E} + B$).

4 Если имеется *линия понижения растворимости*, то необходимо из ее вершины опустить перпендикуляр и указать состав выделяющейся *вторичной фазы*. Состав появляющейся под линией понижения растворимости вторичной фазы смотри на противоположном конце прямой эвтектического превращения (из пересыщенного α -твердого раствора выделяются кристаллы B_{II}).

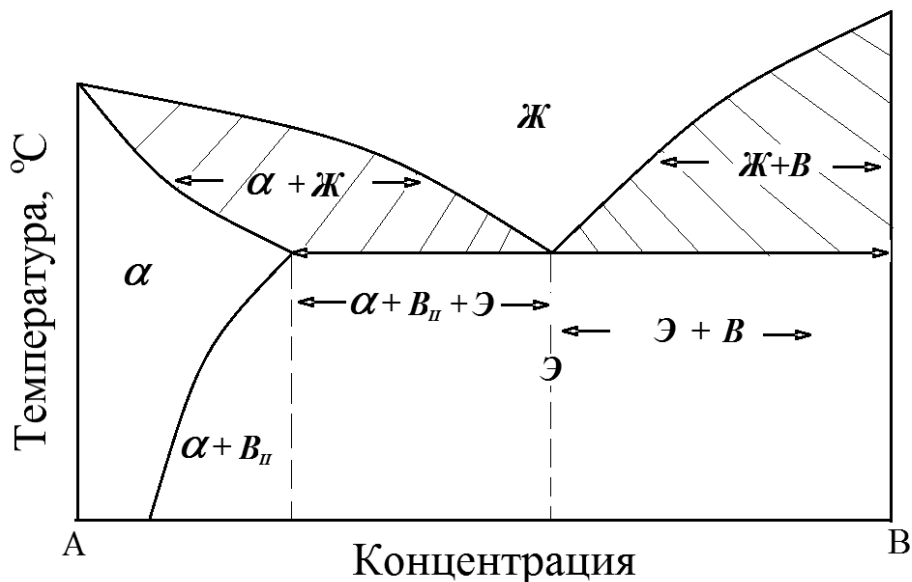


Рисунок 4.2 – Пример анализа диаграммы состояния сплава

Вторичная фаза, в отличие от первичной, образуется в пересыщенном *твердом растворе* (а не жидком) и поэтому имеет высокую степень дисперсности (ее размеры могут быть в 1000 раз меньше размеров зерен твердого раствора). Появляющаяся в объеме зерен твердого раствора высокодисперсная вторичная фаза является препятствием для скольжения слоев металла и приводит к упрочнению сплава в 3–4 раза.

Явление упрочнения сплава, происходящее в процессе распада пересыщенного твердого раствора, называется *старением*. Оно характерно для упрочняемых термообработкой алюминиевых, медных и никелевых сплавов (Д1, АК8, В95, Бр.Б2, Бр.Х и т. д.).

Исходя из диаграмм состояния можно определить технологические свойства сплавов:

- сплавы, состоящие из однофазных твердых растворов, можно подвергать *холодной штамповке* (вследствие высокой пластичности);
- сплавы, содержащие твердый раствор и вторичную фазу, можно подвергать *горячей штамповке* (при нагреве вторичная фаза растворяется, и сплав становится высокопластичным однофазным твердым раствором);
- сплавы, содержащие *твердый раствор и вторичную фазу*, можно подвергать *закалке и старению* (термообработке, повышающей прочностные свойства в 3–4 раза);
- сплавы, включающие в себя *эвтектику*, используют только в качестве литейных («то, что льется, то не гнется, и наоборот»).

Задание

1 Дать определение понятию «фаза», записать характерные свойства эвтектики и однофазных твердых растворов.

2 Начертить заданную преподавателем диаграмму состояния (рисунок 4.3, варианты 1–18).

- 3 Записать алгоритм анализа диаграмм состояния сплавов.
- 4 Провести фазовый анализ всех областей заданной диаграммы.
- 5 Исходя из указанной диаграммы определить характерные технологические свойства для сплавов разной концентрации.

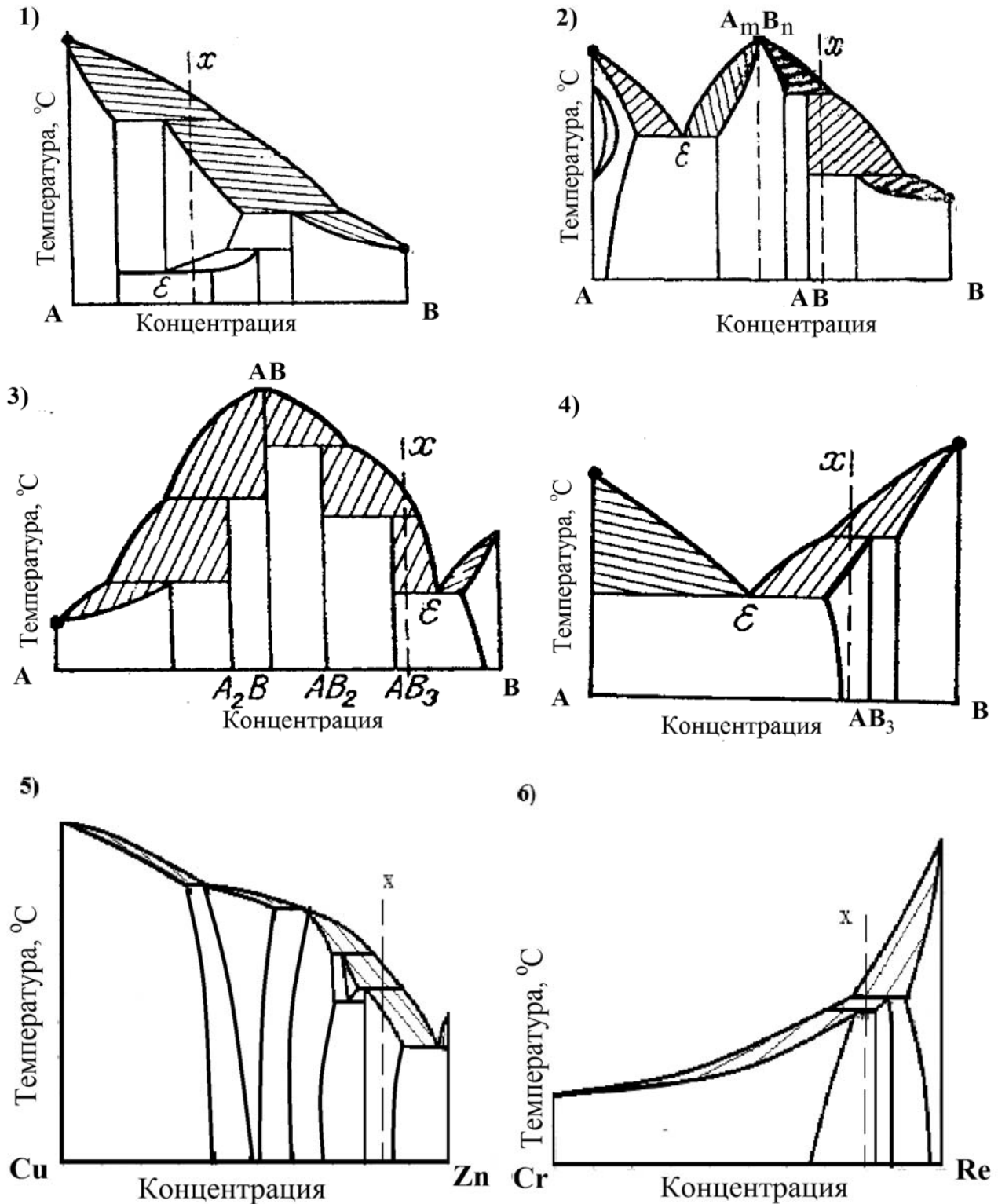
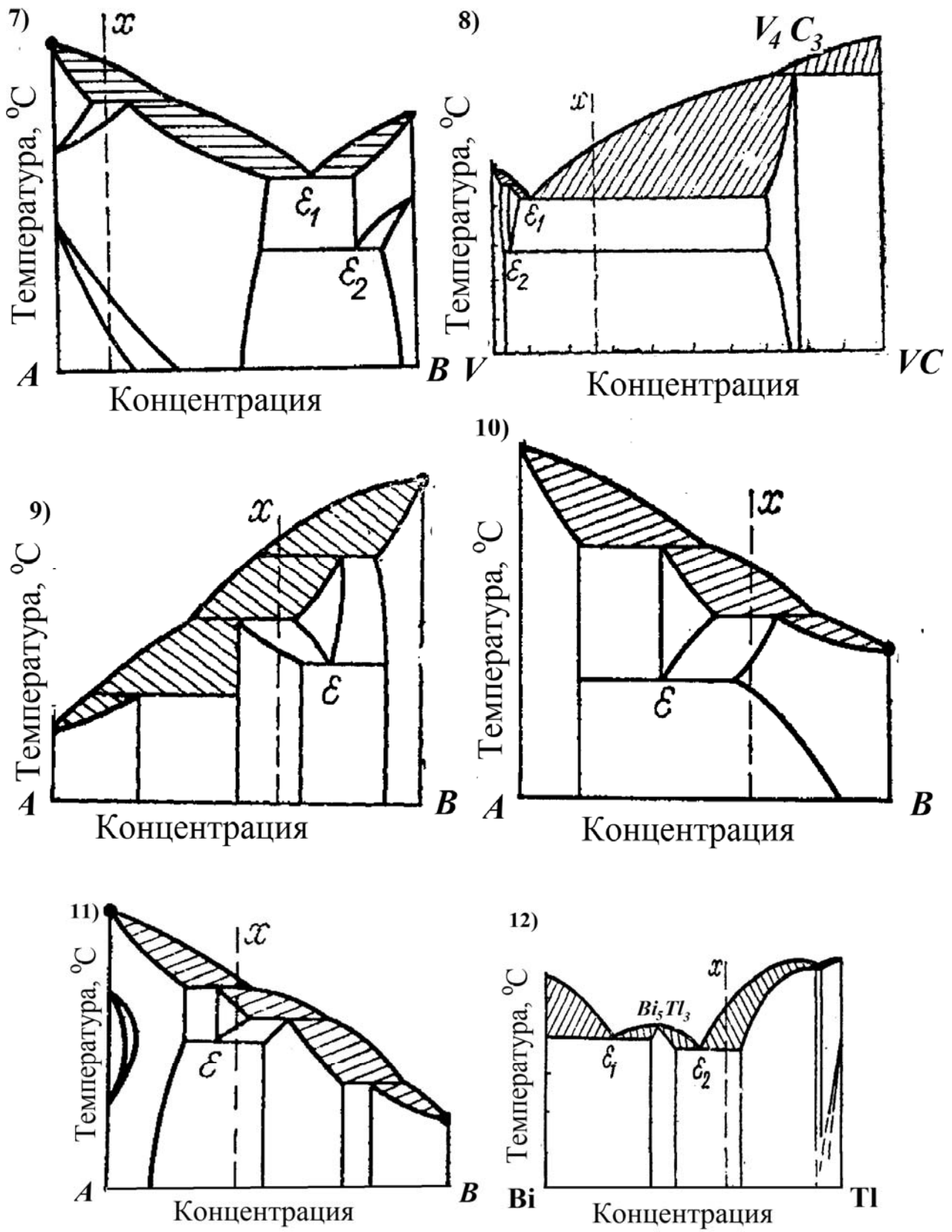
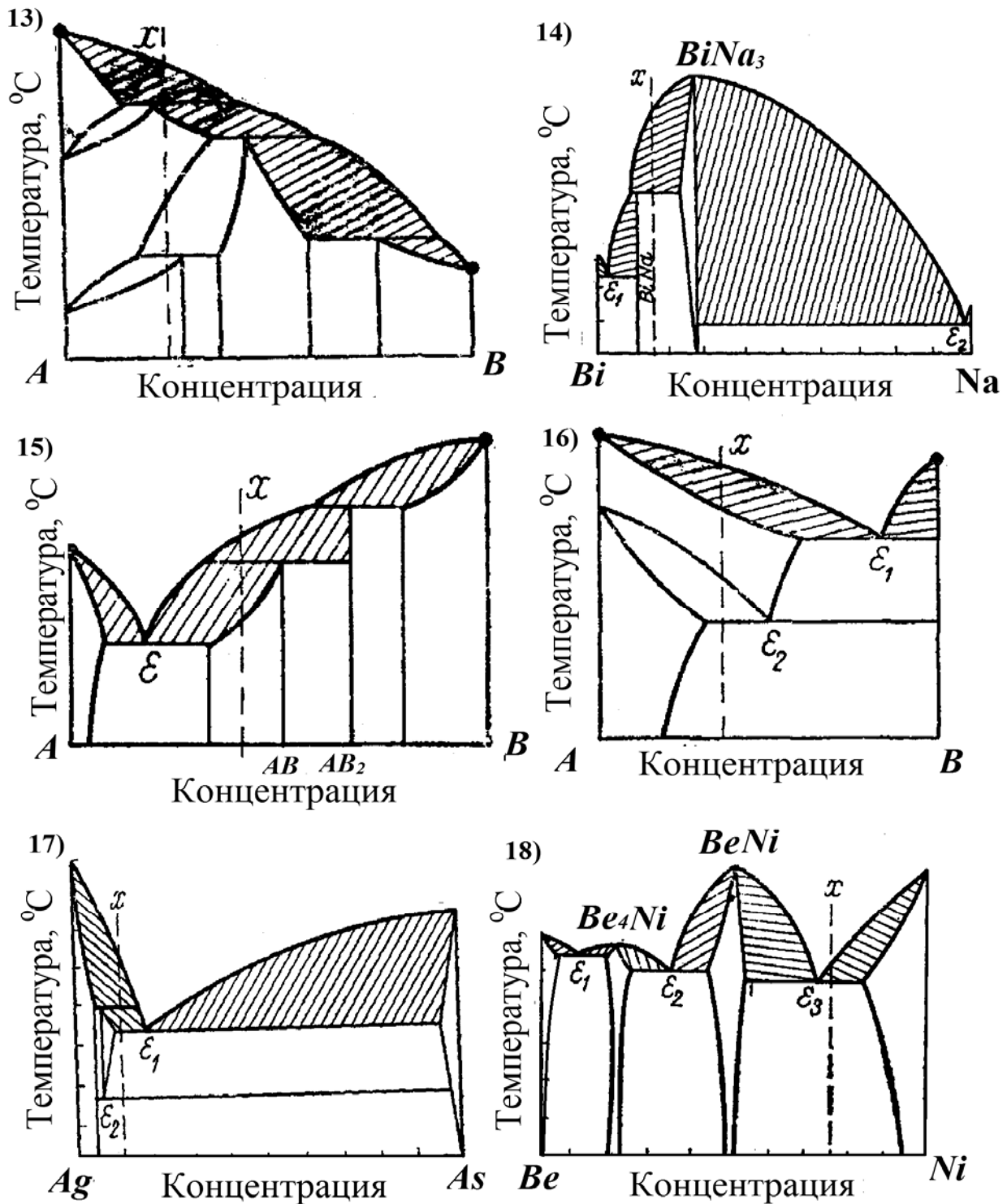


Рисунок 4.3 – Варианты диаграмм состояния сплавов



Продолжение рисунка 4.3



Окончание рисунка 4.3

Контрольные вопросы

- 1 Какие сплавы обладают высокими литейными свойствами, а какие высокой пластичностью?
- 2 Укажите механизм повышения прочности при старении сплавов.
- 3 Проведите фазовый анализ в любой из указанных диаграмм состояния.

5 Лабораторная работа № 5. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии

Цель работы: изучение диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов; анализ превращений, происходящих в сплавах при изменении температуры и концентрации; установление зависимости между структурой и свойствами стали.

Оборудование: микроскопинер МС ЛабоМет-1.

Под *равновесным* понимается такое состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это имеет место только при очень малых скоростях изменения температуры. Равновесное состояние соответствует минимальному значению свободной энергии и не подвергается самопроизвольному изменению во времени. Превращения, протекающие в сталях в равновесном состоянии, описываются диаграммой «железо – цементит», представленной на рисунке 5.1.

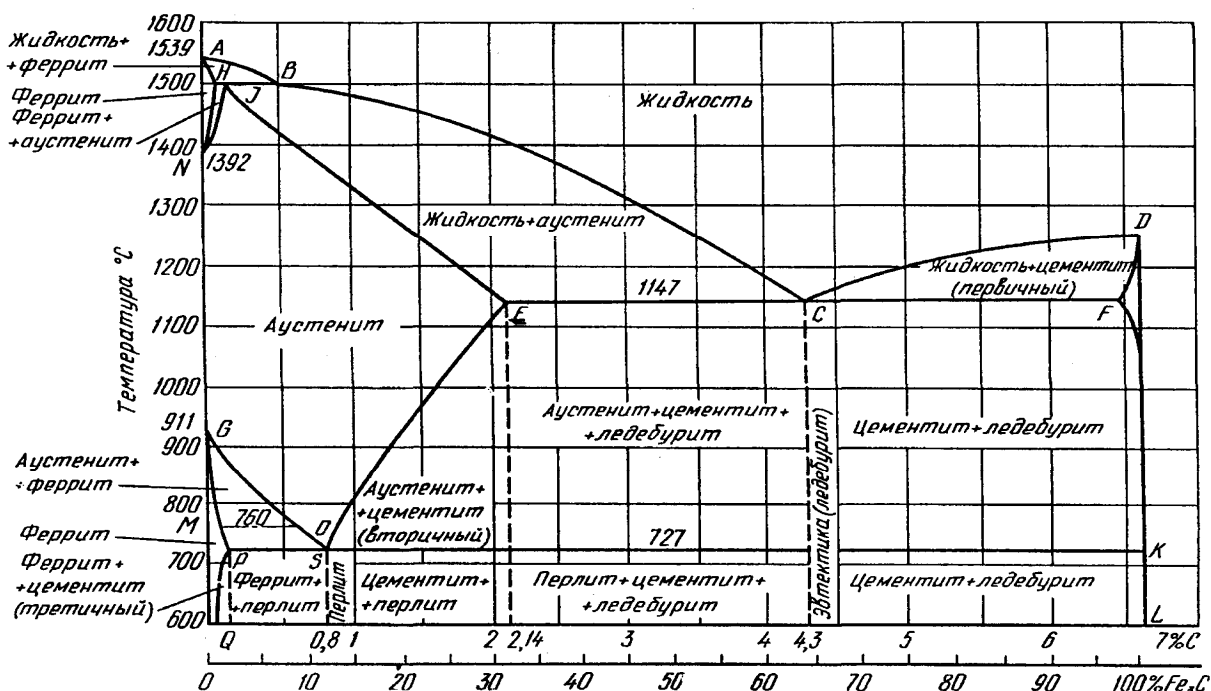


Рисунок 5.1 – Диаграмма «железо – цементит»

В железоуглеродистых сплавах могут присутствовать следующие твердые фазы: феррит, аустенит, цементит.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в α -железе, имеющем объемно-центрированную кубическую решетку. На диаграмме «железо – цементит» существуют две области феррита – высокотемпературная область ANH и низкотемпературная область GPQ. Максимальная растворимость в высокотемпературной области составляет 0,10 % (точка H), в низкотемпературной обла-

сти – 0,02 % (точка P). Содержание углерода при комнатной температуре – 0,01 %. Феррит мягок и пластичен ($\sigma_B = 200...300$ МПа, $\delta = 20\%...50\%$, 80...100 НВ).

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе, имеющем гранцентрированную кубическую решетку. На диаграмме «железо – цементит» аустенит занимает область $NJESG$. Максимальная растворимость углерода в аустените – 2,14 % (точка E). По механическим свойствам аустенит близок к ферриту. Горячую обработку давлением проводят в области существования аустенита (однофазный твердый раствор характеризуется высокой пластичностью).

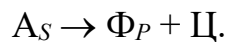
Цементит – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа, химическая формула которого Fe_3C . Содержание углерода в цементите равно 6,67 %. Цементит обладает высокой твердостью (≈ 62 HRC) и хрупкостью. Он имеет сложную ромбическую решетку.

Сплавы, содержащие углерод от 0,1 % (точка H) до 0,5 % (точка B), претерпевают при температуре 1499 °С (линия HJB) *перитектическое превращение*, заключающееся в том, что жидкий раствор, имеющий при этой температуре концентрацию, соответствующую точке B (0,5 % С), взаимодействуя с выделившимися из него кристаллами феррита концентрации точки H (0,1 % С), образует новую фазу – кристаллы аустенита концентрации точки J (0,16 % С):



При дальнейшем снижении температуры феррит, оставшийся после перитектического превращения, перекристаллизовывается в аустенит. В сталях с содержанием углерода больше 0,16 % оставшаяся жидкость затвердевает с образованием аустенита. Ниже линий NJ и JE сплавы имеют однородную аустенитную структуру.

При температуре 727 °С (линия PSK) сплавы претерпевают *эвтектоидное превращение*. При эвтектоидном превращении аустенит, с концентрацией углерода, соответствующей точке S (0,8 % С), распадается с образованием *эвтектоидной смеси* – перлита (феррита состава точки P (0,02 % С) и цементита):



Эвтектоидная смесь феррита и цементита, образующаяся в результате эвтектоидного распада аустенита, называется *перлитом*.

В сплавах с содержанием углерода менее 0,8 % (точка S) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита феррита, которое протекает в интервале температур, ограниченных линиями GS и PS . При этом в оставшемся аустените концентрация углерода изменяется по линии GS . В сплавах с содержанием углерода более 0,8 % (точка S) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита цементита. Выделение цементита протекает в интервале температур, ограниченных линиями ES и SK . В этом случае концентрация углерода в оставшемся аустените изменяется по линии ES .

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на три группы: *техническое железо, стали, чугуны*.

Техническое железо – это сплавы с содержанием углерода менее 0,02 % (точка *P*). Как следует из диаграммы «железо – цементит», техническое железо имеет структуру феррита (рисунок 5.2, *а*). Предельная растворимость углерода в феррите ограничивается линией *GPQ*. По свойствам техническое железо подобно ферриту.

Стали – это сплавы с содержанием углерода от 0,02 % (точка *P*) до 2,14 % (точка *E*). В структуре стали по мере увеличения содержания углерода возрастает доля цементита и уменьшается доля феррита. Это приводит к повышению твердости и прочности стали и снижению ее пластичности, изменению физических и технологических свойств. В зависимости от содержания углерода стали по своей структуре делятся на *доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные*.

Доэвтектоидные стали содержат от 0,02 % углерода (точка *P*) до 0,8 % углерода (точка *S*). Они имеют структуру феррита (светлые зерна) и перлита (темные зерна) (рисунок 5.2, *б, в*). С увеличением содержания углерода прямо пропорционально увеличивается содержание перлита. При концентрации углерода в стали 0,8 % количество перлита равно 100 %. Зная площадь, занимаемую перлитом, можно определить содержание углерода в углеродистой стали:

$$C = 0,8 \cdot P / 100,$$

где *P* – площадь, занимаемая перлитом.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода (точка *S*) и состоит из перлита (рисунок 5.2, *г*).

Заэвтектоидная сталь содержит от 0,8 % углерода (точка *S*) до 2,14 % углерода (точка *E*). Ее структура состоит из перлита и цементита (рисунок 5.2, *д*).

Таким образом, структура и свойства стали определяются количеством углерода в ней. Доэвтектоидные стали, содержащие до 0,8 % углерода, являются *конструкционными*, предназначенными для изготовления деталей машин (машиностроительные стали), конструкций и сооружений (строительные стали). Свойства углеродистых сталей и область их применения зависят от содержания в них вредных примесей – серы и фосфора. Чем меньше их в стали, тем выше ее качество.

Стали *обыкновенного качества*, наиболее дешевые, являются конструкционными сталями общего назначения и содержат до $\approx 0,07$ % фосфора и серы. По гарантируемым свойствам они подразделяются на три группы – А, Б, В. В сталях группы А гарантируются механические свойства, группы Б – химический состав, группы В – механические свойства и химический состав. Сталь группы А маркируется буквами Ст и номером 0, 1, 2, ..., 6, например Ст1. В сталях группы Б перед буквами Ст ставится буква Б, например БСт2. В сталях группы В перед буквами Ст ставится буква В, например ВСт3. С увеличением условного номера повышается содержание углерода в стали, что приводит к увеличению прочностных свойств, к снижению пластичности и свариваемости.

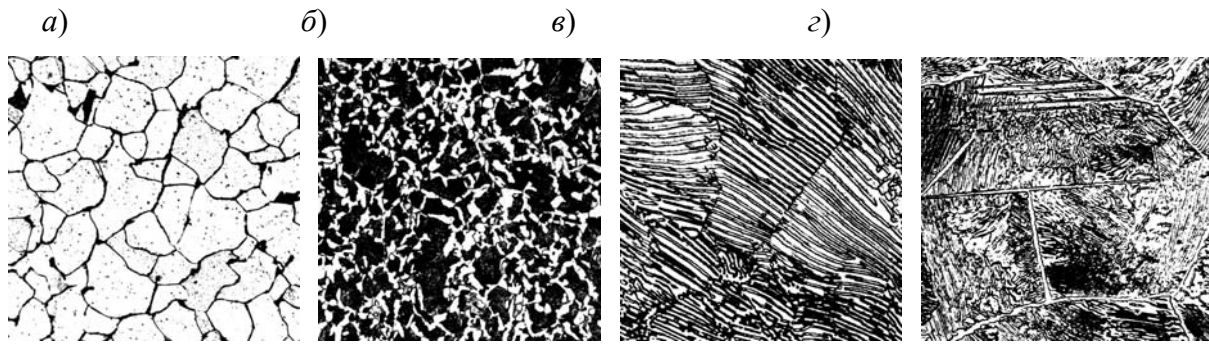


Рисунок 5.2 – Микроструктура технического железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в) и заэвтектоидной (г) сталей

Стали группы А применяются для изготовления рядового проката (швеллеров, уголков, листов, прутков и др.), используемого для клепанных и болтовых конструкций, а также для малонагруженных деталей машин, *не подвергаемых нагреву в процессе обработки*.

Стали группы Б применяются для изготовления изделий, *подвергаемых нагреву* (горячей обработке давлением, сварке, термической обработке).

Стали группы В применяются для изготовления *сварных конструкций*, подвергаемых расчетам на прочность.

В конце марки стали ставятся буквы «кп», «пс», «сп». Буквы «кп» показывают, что сталь кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная.

Качественная конструкционная сталь, по сравнению со сталью общего назначения, содержит вдвое меньше серы и фосфора и отличается более высокими механическими свойствами. Она маркируется цифрами, например 08, 10, ..., 80, показывающими содержание углерода в сотых долях процента.

Низкоуглеродистые стали, содержащие углерода до 0,25 %, обладают низкой прочностью, но высокой пластичностью и применяются:

- 1) для изготовления изделий листовой *холодной штамповкой* (05кп...10);
- 2) для деталей, *упрочняемых цементацией*;
- 3) для *сварных соединений* (сталь 08, сталь 20).

Среднеуглеродистые стали марок 30...50 предназначаются для *ответственных деталей* высокой прочности с вязкой сердцевиной (зубчатые колеса, шатуны, коленчатые валы, распределительные валы, винты, оси, втулки, рычаги и др.). Как правило, детали из этих сталей подвергаются улучшению (закалке и высокому отпуску).

Высокоуглеродистые стали 55...85 применяются для *пружин, рессор*, а также деталей высокой прочности: валков прокатных станов (сталь 60), крановых колес (сталь 75), дисков муфт сцепления (сталь 85) и др. Детали из этих сталей подвергаются упрочнению методами термической обработки.

Для изготовления различных инструментов применяется *углеродистая инструментальная сталь*, содержащая углерода от 0,7 % до 1,3 %. Эта сталь производится следующих марок: У7...У13 (качественная) или У7А...У13А (высококачественная). Здесь «У» означает «углеродистая инструментальная сталь», число после «У» – содержание углерода в десятых долях процента

(например, У12 содержит углерода 1,2 %). В зависимости от содержания углерода назначают области применения этих сталей:

1) стали марок У7 и У8 вязче других, т. к. не имеют в структуре цементита, и они идут на изготовление *ударных инструментов* – молотков, зубил, топоров, кернеров, стамесок, долот, штампов и т. д.;

2) стали У9...У11 имеют несколько меньшую вязкость и немного большую твердость (т. к. в их структуре содержится небольшое количество цементита) и используются для изготовления *резцов, сверл, метчиков, лерок*;

3) стали У12 и У13 обладают низкой вязкостью и высокой твердостью и используются для изготовления *инструмента, не испытывающего ударных нагрузок* (напильников, бритв, рашпилей и т. п.).

Задание

1 Зарисовать диаграмму «железо – цементит».

2 Дать определение фазам и структурным составляющим в сталях (доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной).

3 Определить содержание углерода в образце доэвтектоидной стали.

4 Изучить и зарисовать микроструктуру предложенных шлифов; указать фазы и расставить структурные составляющие.

5 Указать марки сталей, применяемых для изготовления различных изделий согласно заданию преподавателя.

Контрольные вопросы

1 Дайте определение фазам, присутствующим в сталях, и укажите содержание углерода в них.

2 Дайте классификацию углеродистых сталей по качеству, содержанию углерода и назначению.

3 Изучите маркировку сталей и укажите области применения перечисленных сталей: Ст2, БСт3, ВСт4, Ст6; 08кп, 10...80; У7...У13.

6 Лабораторная работа № 6. Закалка стали

Цель работы: изучение основ теории и технологии закалки сталей.

Оборудование и инструмент: печь SNOL 05/1250, заготовки стали 40 для закалки, закалочные емкости, твердомер Роквелла ТР 5014.

Закалкой называется вид термической обработки, который заключается в нагреве стали на 30 °С...50 °С выше температур критических точек A_{c1} или A_{c3} (рисунки 6.1 и 6.2), выдержке при этих температурах (для завершения фазовых превращений) и последующем охлаждении со скоростью выше критической V_k (рисунок 6.3). Под *критической скоростью закалки* понимается минимальная

скорость охлаждения, обеспечивающая бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит.

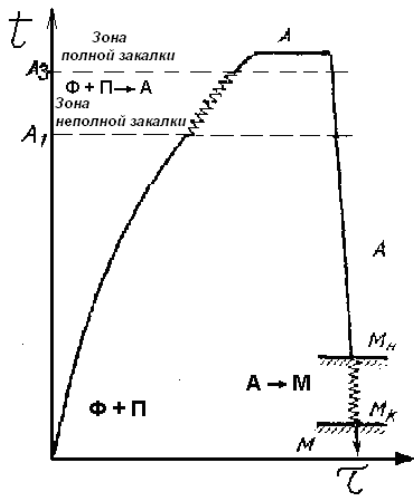


Рисунок 6.1 – Температурный режим закалки стали

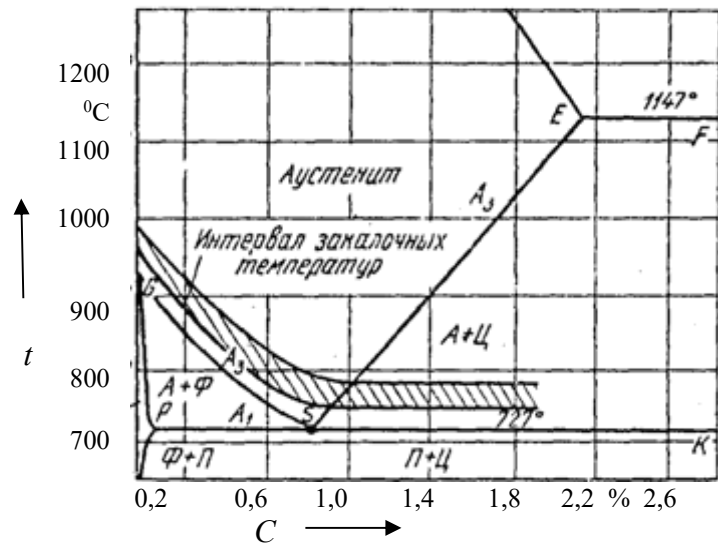


Рисунок 6.2 – Зоны нагрева

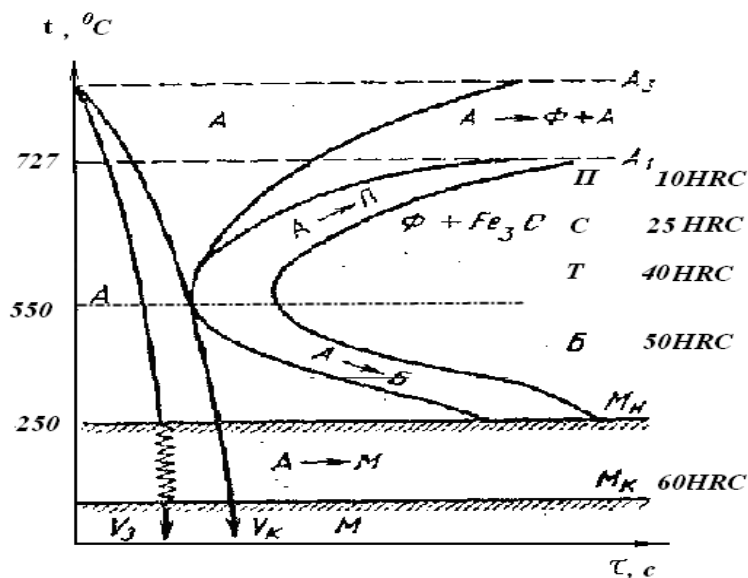


Рисунок 6.3 – Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита

Целью закалки является повышение твердости, прочности и долговечности механизмов машин и инструмента.

В зависимости от температуры нагрева закалку подразделяют на *полную* и *неполную*. В первом случае сталь нагревается выше температур $A_{с3}$ или $A_{сm}$ в область аустенита; во втором – выше температуры $A_{с1}$, но ниже $A_{с3}$ или $A_{сm}$ в область, где наряду с аустенитом в доэвтектоидной стали присутствует феррит, а в заэвтектоидной – цементит (см. рисунок 6.2).

Все доэвтектоидные стали ($< 0,8 \% \text{ C}$) должны подвергаться полной закалке. Нагрев осуществляется на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c3} (см. рисунок 6.2, линия GS). При этом сталь с исходной структурой феррита и перлита при нагреве переходит в аустенитное состояние. При последующем охлаждении со скоростью выше критической (см. рисунок 6.3) аустенит превращается в закалочную структуру – мартенсит. Такой нагрев является оптимальным, т. к. обеспечивает мелкое зерно аустенита при нагреве и мелкоиглочатый мартенсит с вязким изломом после охлаждения.

В случае охлаждения аустенита со скоростями, меньшими критической, вместо мартенсита в интервале температур $720\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются феррито-цементитные смеси (см. рисунок 6.3), получившие название перлит, сорбит, троостит (П, С, Т). По мере увеличения скорости охлаждения дисперсность смеси возрастает, что приводит к повышению твердости и прочности. Наиболее грубой смесью является перлит, максимальной дисперсностью обладает троостит. Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше точки A_{c3} приводит к перегреву (укрупнению зерна аустенита), а последующее быстрое охлаждение приводит к получению крупноиглочатого мартенсита, что ухудшает вязкость стали. Перегрев стали, кроме того, способствует обезуглероживанию поверхности и образованию трещин при закалке.

Нагрев доэвтектоидной стали в область межкритических температур (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}) не обеспечит растворения исходного феррита в аустените. Аустенит при закалке превратится в мартенсит, а оставшийся феррит снизит прочностные свойства стали, поэтому такой нагрев для доэвтектоидной стали является недостаточным (неполная закалка).

Заэвтектоидные стали ($> 0,8 \% \text{ C}$) подвергаются неполной закалке, т. е. нагреваются до температуры на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$). При таком нагреве из перлита образуется аустенит, а избыточный цементит сохраняется. После охлаждения со скоростью выше критической аустенит превращается в структуру закаленной стали – мартенсит, а цементит без изменения сохраняется в мартенситной основе и обеспечивает большую твердость и износостойкость инструментальных сталей. Таким образом, для заэвтектоидных сталей оптимальной будет неполная закалка.

Нагрев выше точки A_{cm} (линия SE) приводит к образованию высокоуглеродистого аустенита (вследствие растворения в нем цементита), обеспечивающего после охлаждения крупноиглочатый (вследствие перегрева) мартенсит и большее количество остаточного аустенита в связи с тем, что в высокоуглеродистом аустените конец мартенситного превращения (рисунок 6.4, точка M_k) сдвигается в область отрицательных температур.

В соответствии с этой схемой *после закалки сталей с содержанием углерода более $0,5 \%$ в структуре всегда будет присутствовать остаточный аустенит* (см. точку пересечения линий конца мартенситного превращения и температуры охлаждающей жидкости). Остаточный аустенит ухудшает свойства закаленной стали.

Нагрев под закалку производится в печах периодического и непрерывного действия. Для предотвращения обезуглероживания и окисления поверхностно-

го слоя заготовок применяются ванны, в которых изделие нагревается в расплавленных солях или металлах.

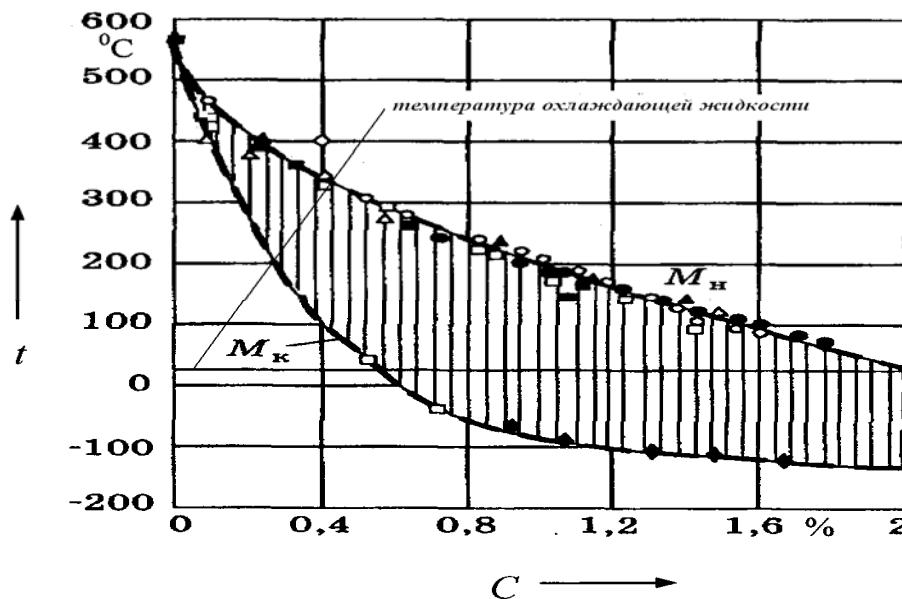


Рисунок 6.4 – Изменение температурного интервала мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода в аустените

Скорость охлаждения регулируется видом охлаждающей среды, в качестве которой наиболее часто применяются минеральное масло, вода, водные растворы солей, кислот, щелочей. Для углеродистых сталей необходимая скорость достигается при охлаждении в воде (в водных растворах), для легированных – в масле или на воздухе.

Мартенситное превращение носит бездиффузионный характер, т. е. не сопровождается диффузионным перераспределением углерода и железа в решетке. При мартенситном превращении происходит лишь переход кубической гранецентрированной решетки аустенита (γ -твердого раствора) в тетрагональную объемно-центрированную решетку α -твердого раствора. Особенность мартенситного превращения состоит в том, что весь углерод, находящийся в аустените (γ -твердом растворе), переходит в α -твердый раствор. Пересыщение углеродом α -твердого раствора вызывает искажение ОЦК решетки Fe_α , т. е. приводит к образованию тетрагональной ($c/a > 1$) кристаллической решетки. Поэтому структура закаленной стали – *мартенсит* – представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе.

Особенностью мартенсита является его высокая твердость и прочность. В сталях с содержанием 0,6 %...0,7 % C твердость мартенсита достигает ~60 HRC. Высокая твердость мартенсита объясняется большими внутренними напряжениями в растянутой решетке Fe_α , созданием микро- и субмикроскопической неоднородности строения с равномерным ее распределением по объему, т. е. большим числом нарушений кристаллического строения.

Внутренние напряжения, возникающие при закалке.

Поверхности раздела кристаллитов мартенсита представляют собой труд-

нопреодолимые препятствия для скольжения дислокаций при деформации кристалла. Перемещению дислокаций тормозят находящиеся в решетке мартенсита атомы углерода, создающие статические искажения решетки (напряжения III рода). Все это определяет высокую твердость структуры закаленной стали – мартенсита. С увеличением содержания углерода в мартенсите наряду с повышением твердости возрастает и хрупкость.

Мартенситное превращение, происходящее при закалке стали, приводит к увеличению удельного объема, что является одной из основных причин возникновения больших внутренних (*структурных*) напряжений II рода, вызывающих деформацию изделий или даже появление трещин. Перепад температур по сечению закаливаемого материала приводит к образованию *термических* внутренних напряжений (I рода). Эти напряжения, возникающие при закалке (структурные и термические), тем больше, чем выше температура закалки и скорость охлаждения в мартенситном интервале температур ($M_n - M_k$).

Задание

1 Начертить стальной участок диаграммы состояния «Fe–Fe₃C» и нанести на него температурные интервалы нагрева стали под закалку.

2 Начертить диаграмму изотермического распада аустенита и нанести на нее скорости охлаждения, обеспечивающие получение структуры мартенсита и феррито-цементитных смесей.

3 Описать фазовые превращения при полной и неполной закалках сталей, записать образующиеся при этом структуры в таблицу 6.1 и обосновать выбор режима их термической обработки.

4 Произвести полную и неполную закалку стали 40, измерить твердость и занести данные в таблицу 6.2, указав структуры закаленной стали.

Таблица 6.1 – Влияние вида закалки на микроструктуру стали

Марка стали	Структура после полной закалки	Структура после неполной закалки
20		
30		
45		
60		
70		
80		
У7		
У8		
У9		
У13		

Таблица 6.2 – Влияние условий термообработки на твердость и структуру стали 40

Условия закалки		Твердость	Структура
Температура, °С	Среда		
полная закалка	Масло		
	Вода		
неполная закалка	Масло		
	Вода		
Без термической обработки			

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определения закалке, полной и неполной, укажите области их применения, опишите превращения и укажите образующиеся при этом структуры.
- 2 Дайте определение мартенситу, укажите его особенности.
- 3 Что происходит при охлаждения аустенита со скоростью, меньшей $V_{кр}$?
- 4 От чего зависит количество $A_{ост}$ в закаленной стали?

7 Лабораторная работа № 7. Отпуск закаленной стали

Цель работы: изучение теории и технологии отпуска закаленной стали; ознакомление с превращениями, происходящими при отпуске и назначениями различных видов отпуска.

Оборудование и инструмент: печи SNOL 02/1250, стальные заготовки для отпуска, твердомер Роквелла ТР 5014.

Отпуском называется вид термической обработки, заключающийся в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки A_1 , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с заданной скоростью.

Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой снимаются внутренние закалочные напряжения (термические и структурные) и формируется требуемый комплекс механических свойств.

После закалки сталь имеет структуру мартенсита с некоторым количеством аустенита остаточного. Эти фазы при комнатной температуре являются метастабильными (неустойчивыми) и сохраняются только по той причине, что в этих условиях отсутствует диффузионная подвижность атомов железа и углерода. Повышение температуры, активизирующее диффузию, приводит к распаду этих фаз, конечным продуктом которого в равновесных условиях должна являться феррито-цементитная смесь. Степень распада мартенсита и аустенита остаточного при отпуске определяется температурой обработки. При этом в зависимости от температуры нагрева в процессе отпуска имеют место четыре превращения.

Первое превращение при отпуске – при температурах от 80 °С до 250 °С происходит распад мартенсита (пересыщенного углеродом α -твердого раствора), обусловленный выделением части углерода из решетки мартенсита и образованием ε -карбидов с гексагональной решеткой (Fe_xC). Пластинки ε -карбидов когерентно связаны с решеткой α -твердого раствора (мартенсита). Образующаяся после первого превращения при отпуске структура, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе (но степень пересыщения меньше, чем непосредственно после закалки) и когерентно связанные с ним дисперсные выделения ε -карбидов, называется *отпущенным мартенситом* (рисунок 7.1).

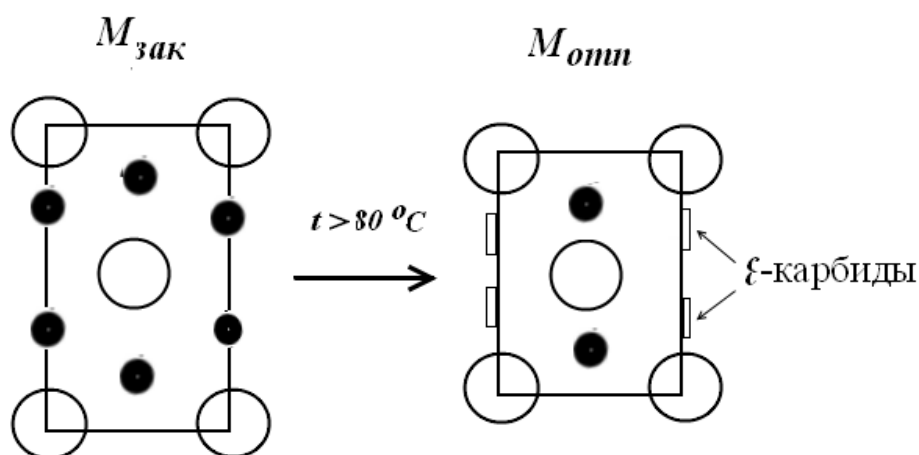


Рисунок 7.1 – Схема образования мартенсита отпуска при нагреве

Уменьшение количества растворенного углерода снижает тетрагональность решетки мартенсита. Снижение внутренних напряжений приводит к повышению вязкости материала. Твердость, прочность и износостойкость при этом практически не изменяются. Низкотемпературный отпуск предназначен для инструментальных сталей, а также для деталей машин, прошедших цементацию, нитроцементацию.

Структура «мартенсит отпуска» характерна для инструментов, подвергаемых ударным нагрузкам, например, клеймам, зубилам, топорам, молоткам, вырубным пуансонам. Эти инструменты изготавливают из доэвтектоидных сталей У7, 6ХС, 7ХС, отсутствие цементита в которых обеспечивает достаточную вязкость.

Второе превращение при отпуске – превращение аустенита остаточного в мартенсит отпущенный. При температурах отпуска 150 °С...250 °С остаточный аустенит обедняется углеродом и легирующими элементами. В результате этого температуры точек M_n и M_s повышаются (рисунок 7.2). Например, при закалке стали У12 температура конца мартенситного превращения составляет минус 100 °С, что приводит к образованию большого количества остаточного аустенита (около 50 %).

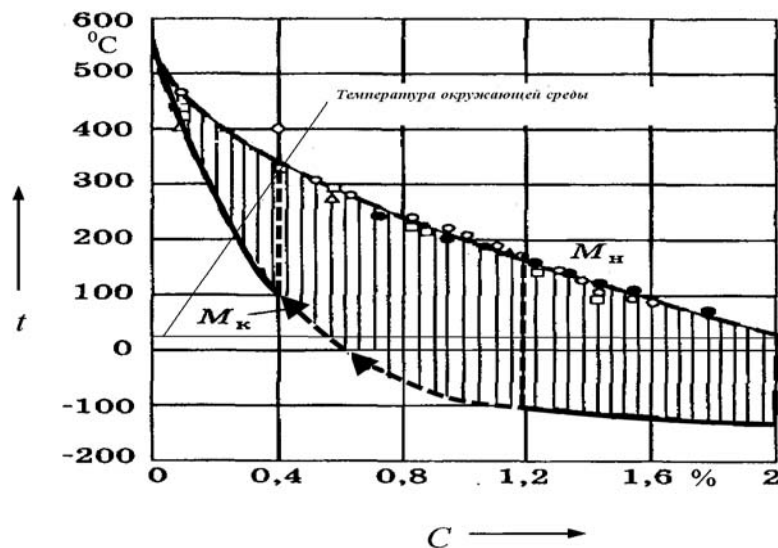


Рисунок 7.2 — Изменение температуры окончания мартенситного превращения в стали У12 при снижении содержания углерода в остаточном аустените

В процессе нагрева при отпуске аустенит остаточный стали У12 обедняется углеродом до 0,4 %, что приводит к повышению температуры конца мартенситного превращения от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно рисунку 7.2).

При извлечении заготовки из печи температура ее снижается от $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к превращению аустенита в мартенсит закалочный. В процессе дальнейшего снижения температуры (до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) завершается первое превращение при отпуске и образуется мартенсит отпуска. Таким образом, продуктом распада остаточного аустенита является гетерогенная смесь, состоящая из мартенсита отпуска и цементита (Fe_3C).

Третье превращение — превращение мартенсита отпуска в тонкую феррито-цементитную смесь. В процессе нагрева закаленной стали до температур выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ из пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе (*мартенсита*) выходит весь избыточный углерод и он превращается в феррит, а покинувший решетку мартенсита углерод образует тонкие пластинки цементита, которые не имеют когерентной связи с решеткой мартенсита. Это приводит к снижению внутренних напряжений и вызывает значительное уменьшение твердости и прочности ($\approx 40\text{ HRC}$).

К концу третьего превращения образуется дисперсная (тонкая) феррито-карбидная смесь, называемая *трооститом отпуска*. Характерной особенностью этой структуры является *высокий предел упругости*, что обуславливает использование ее при изготовлении упругих элементов: пружин, рессор.

Четвертое превращение — коагуляция и сфероидизация карбидов. Повышение температуры отпуска до $500\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ не вызывает фазовых превращений, но вследствие развития диффузионных процессов реализуется стремление системы к снижению свободной энергии из-за уменьшения поверхностной энергии в процессе объединения групп мелких зерен в более крупные. Поэтому при этих температурах основными процессами являются начавшиеся на стадии третьего превращения коагуляция и сфероидизация карбидов. Образующаяся

структура представляет собой более грубую (крупную), чем после третьего превращения, феррито-карбидную смесь *зернистого типа*, называемую *сорбитом отпуска*. Укрупнение зерен приводит к снижению прочностных свойств (до 25 HRC), но округление формы зерен обуславливает снижение напряжений, возникающих в процессе нагрузок, повышение ударной вязкости, что, в совокупности, приводит к *повышению надежности* изделий от внезапного хрупкого разрушения. Сорбит отпуска используют для изготовления *ответственных деталей машин*, работающих в тяжелых условиях нагружения (знакопеременных нагрузках и сложных напряженных состояниях), например: валов, осей, полуосей, шатунов, коленчатых валов и пр.

Перлит, сорбит и троостит являются механической смесью феррита и цементита, но размер зерен каждый раз уменьшается ориентировочно в 5 раз при переходе от перлита к сорбиту и от сорбита к трооститу.

Виды отпуска.

В зависимости от температуры различают три разновидности отпуска: низкий, средний и высокий.

Низким отпуском называют нагрев закаленной стали до температур, не превышающих 200 °С. Такой отпуск практически не вызывает снижения твердости закаленной стали; образующаяся структура – отпущенный мартенсит (плюс цементит вторичный в заэвтектоидных сталях). Такой отпуск рекомендуется при термической обработке инструментальных сталей и цементированных деталей.

Средним отпуском называют нагрев закаленной стали до 350 °С...450 °С. Такой отпуск вызывает снижение твердости до 40 HRC; образующаяся структура – троостит отпуска. Этот вид отпуска рекомендуется при термической обработке рессор и пружин.

Высоким отпуском называют нагрев закаленной стали до 500 °С...600 °С. Такой отпуск вызывает значительное снижение твердости закаленной стали (до 25 HRC), но повышение вязкости; образующаяся структура – сорбит отпуска.

Сорбит отпуска обеспечивает хорошее сочетание свойств – достаточной прочности, вязкости и пластичности. Поэтому закалка стали с последующим высоким отпуском носит название термического *улучшения*. Эта обработка рекомендуется для всех среднеуглеродистых (*улучшаемых*) конструкционных сталей, применяемых для изготовления ответственных деталей машин.

Задание

- 1 Изучить и описать основные превращения при отпуске.
- 2 Определить твердость образцов после отпуска, результаты экспериментов свести в таблицу 7.1 и сделать соответствующие выводы.

Таблица 7.1 – Влияние температуры отпуска на твердость и микроструктуру стали 40

Температура отпуска, °С	Твердость, HRC	Микроструктура
Без отпуска		
200		
400		
600		

Контрольные вопросы

1 Укажите виды отпуска и область их применения.

2 Изложите сущность и механизм четырех превращений, протекающих в процессе отпуска закаленной стали, укажите образующиеся при этом структуры, их свойства и области применения.

8 Лабораторная работа № 8. Изучение зависимости между структурой и свойствами стали после различных видов термической обработки

Цель работы: изучение методики назначения режимов термической обработки и основных фазовых превращений, протекающих в сталях при отжиге, нормализации, закалке и отпуске.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1.

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств. При термической обработке стали протекают фазовые превращения. Они вызваны тем, что вследствие изменившихся условий (температуры) новое состояние оказывается более устойчивым, чем старое, т. к. обладает меньшим запасом свободной энергии. Превращения, протекающие при медленном охлаждении, близкие к равновесным, описываются диаграммой «железо – цементит». Участок диаграммы «железо–цементит», необходимый для назначения термической обработки стали, представлен на рисунке 8.1.

Критические точки обозначаются буквой «А» (от фр. Arret – остановка). Точка A_1 лежит на линии PSK и соответствует превращению «аустенит – перлит».

Точка A_3 лежит на линии GSE и соответствует началу выделения (или окончанию растворения) феррита в доэвтектоидных сталях или цементита вторичного в заэвтектоидных сталях. Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, после буквы «А» ставят буквы «с – calor» и «r – refrigeratio», соответственно, Ac_1 , Ar_1 , Ac_3 , Ar_3 . Точку Ac_3 для заэвтектоидной стали часто обозначают как точку Ac_m .

Основными видами термической обработки стали являются *отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск*.

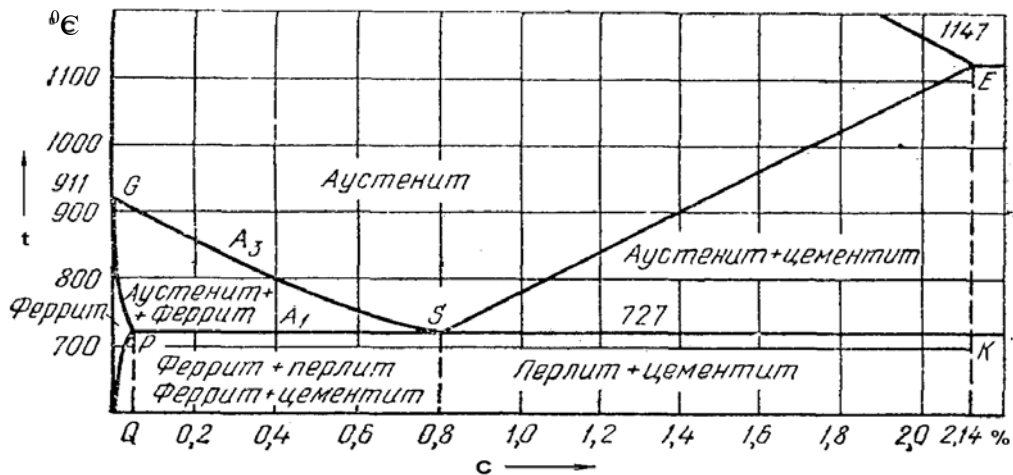


Рисунок 8.1 – «Стальной» участок диаграммы «железо – цементит»

Отжиг первого рода.

Отличительная особенность отжига первого рода состоит в том, что его проведение не обусловлено фазовыми превращениями. Основными параметрами отжига первого рода являются температура нагрева и время выдержки при этой температуре.

Скорости нагрева и охлаждения при этом имеют второстепенное значение. Отжиг первого рода устраняет отклонения от равновесного состояния, имеющиеся в стали после литья, обработки давлением, сварки и других технологических операциях.

Различают *гомогенизационный, рекристаллизационный и отжиг для снятия внутренних напряжений*.

Гомогенизационный отжиг.

Предназначен для устранения дендритной ликвации в литой стали. При этом сталь подвергается длительной выдержке (до 48 ч) при 1000 °С. При высокой температуре подвижность атомов в кристаллической решетке высокая и с течением времени за счет процессов диффузии происходит постепенное выравнивание химического состава. Однако усреднение химического состава происходит в пределах одного зерна, т. е. устраняется в основном дендритная ликвация. После гомогенизации металл обладает повышенной пластичностью и легко поддается пластической деформации.

Рекристаллизационный отжиг.

Холодная пластическая деформация вызывает изменение структуры металла и его свойств. Сдвиговая деформация вызывает увеличение плотности дефектов кристаллической решетки (дислокаций). Все эти процессы ведут к тому, что прочность металла постепенно увеличивается, пластичность падает, т. е. возникает наклеп (нагартовка). Дальнейшая деформация такого металла невозможна, т. к. происходит его разрушение. Для снятия эффекта упрочнения применяют рекристаллизационный отжиг, т. е. нагрев металла до температур

выше начала рекристаллизации, выдержку с последующим медленным охлаждением. Температура отжига на $100\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры рекристаллизации, определяемой из выражения $T_{\text{рек}} = 0,4 \cdot T_{\text{пл}}$.

Продолжительность такого отжига зависит от размеров детали и в среднем составляет от 0,5 до 2 ч. В процессе рекристаллизационного отжига происходит растворение старых вытянутых зерен, образование зародышей новых зерен и последующий рост этих зародышей. Постепенно старые деформированные зерна исчезают, количество дислокаций в кристаллической решетке уменьшается, наклеп устраняется, и металл возвращается в исходное состояние.

Рекристаллизационный отжиг может применяться как предварительная, промежуточная, так и как окончательная термообработка. Как предварительная термообработка он применяется перед холодной деформацией, если исходное состояние металла неравновесное и имеет какую-то степень упрочнения. Как промежуточная операция рекристаллизационный отжиг применяется между операциями холодной деформации, если суммарная степень деформации слишком велика и запасов пластичности металла не хватает. Как окончательный вид отжига его применяют в том случае, если потребитель требует поставки полуфабрикатов в максимально пластичном состоянии.

Отжиг для снятия внутренних напряжений.

Внутренние напряжения в металле могут возникать в результате различных видов обработки. Это могут быть *термические* напряжения, образовавшиеся в результате неравномерного нагрева или различной скорости охлаждения отдельных частей детали (после горячей деформации, литья, сварки, обработки резанием). Это могут *структурные* напряжения, появившиеся в результате структурных превращений, происходящих внутри детали в различных местах с различной скоростью. Внутренние напряжения в металле могут достигать большой величины и, складываясь с рабочими, могут превышать предел прочности и приводить к разрушению. Этот отжиг проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации: $t_{\text{отж}} = 0,2 \dots 0,3 T_{\text{пл}}$. Повышенная диффузия облегчает скольжение дислокаций и, под действием внутренних напряжений, происходит их перераспределение, т. е. из мест с повышенным уровнем внутренних напряжений дислокации перемещаются в области с пониженным уровнем. Происходит разрядка внутренних напряжений, увеличение температуры резко увеличивает скорость разрядки, и продолжительность отжига составляет несколько часов.

Отжиг второго рода.

В процессе отжига второго рода сталь нагревается на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше критических точек A_{c1} или A_{c3} с последующим медленным охлаждением, как правило, вместе с печью. На диаграмме изотермического превращения аустенита (рисунок 8.2) скорость охлаждения при отжиге соответствует кривой I_1 .

Отжиг приводит к снижению твердости, повышению пластичности и получению однородной мелкозернистой структуры. Для доэвтектоидных сталей, как правило, проводится *полный отжиг*, для заэвтектоидных – *неполный*.

На структуру стали оказывает влияние температура отжига. Отжиг при температурах, значительно превышающих A_{c3} , приводит к перегреву стали. У пере-

гретой стали величина, форма и расположение зерен будут иными. Так, при нагреве стали 45 до 1000 °С (нормальный отжиг проводится при 860 °С) зерна аустенита вырастают до значительных размеров. В результате этого при охлаждении образуются крупные зерна перлита, а феррит выделяется в виде крупных пластин внутри перлита по определенным кристаллографическим плоскостям (рисунок 8.3). Такая структура носит название *видманштетовой*. Сталь с видманштетовой структурой имеет низкую ударную вязкость.

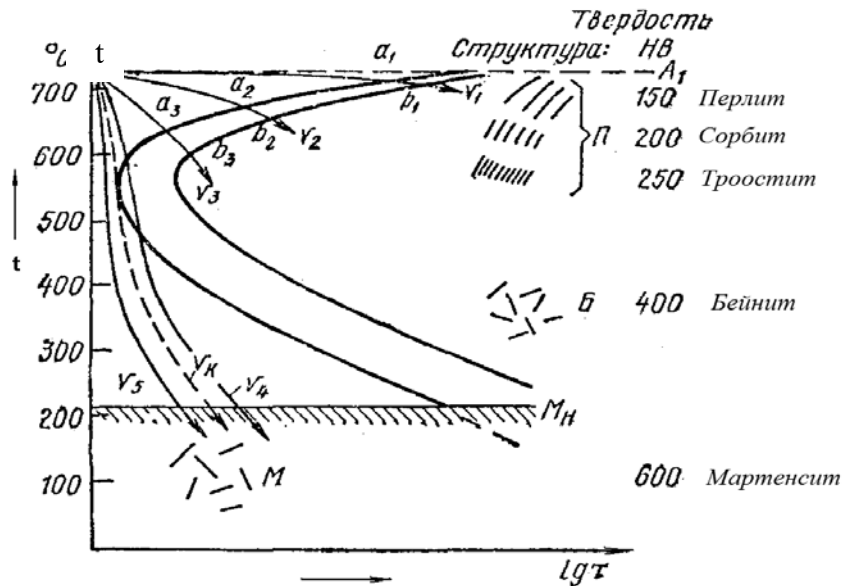
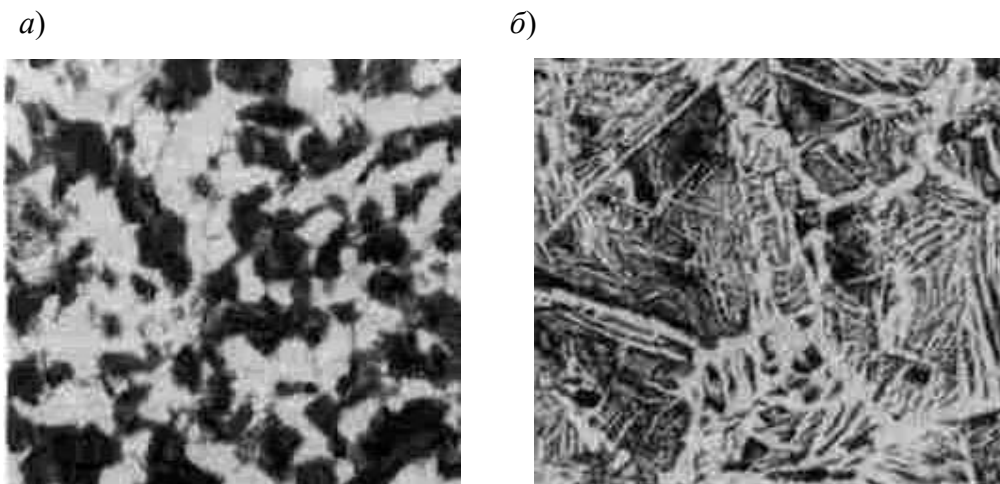


Рисунок 8.2 – Изотермическое превращение аустенита эвтектоидной стали



а – при 860 °С (правильный режим); б – при 1000 °С (перегрев)

Рисунок 8.3 – Микроструктура стали 45 после отжига

Перегретую крупнозернистую сталь можно исправить путем нормального отжига. Видманштетова структура характерна также для литой стали, для сварных швов, для кованой стали, если ковка закончилась при высокой температуре.

В процессе неполного отжига заэвтектоидных сталей нагрев проводится на 30 °С ...50 °С выше A_{c1} . Не растворившиеся при нагреве частицы цементита

вторичного являются центрами кристаллизации для цементита, образующегося при последующем охлаждении ниже точки A_{c1} в результате эвтектоидного распада аустенита. В этом случае цементит принимает зернистую форму. Такой отжиг часто называют *сфероидизирующим*.

В результате сфероидизирующего отжига образуется зернистый перлит (рисунок 8.4). Изменение формы включений цементита позволяет повышать вязкость стали; облегчает процесс обработки резанием. Такая структура стали является идеальной перед закалкой.

Разновидностью отжига является *нормализация*. Особенностью нормализации является то, что охлаждение проводится на воздухе. После нормализации среднеуглеродистые стали имеют тот же фазовый состав, что и после отжига, однако дисперсность фаз в этом случае выше в 5 раз, вместо перлита образуется структура, близкая к сорбиту (рисунки 8.5 и 8.6).

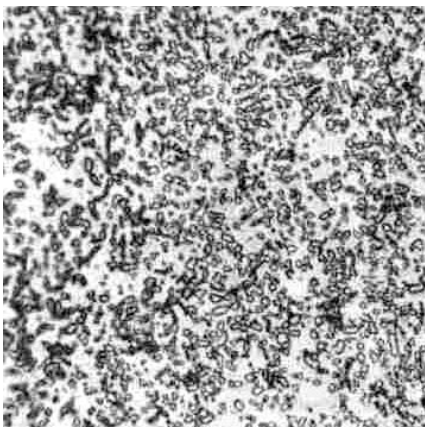


Рисунок 8.4 – Микроструктура зернистого перлита заэвтектоидной стали

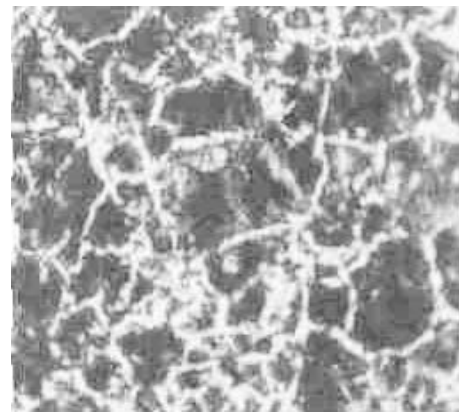
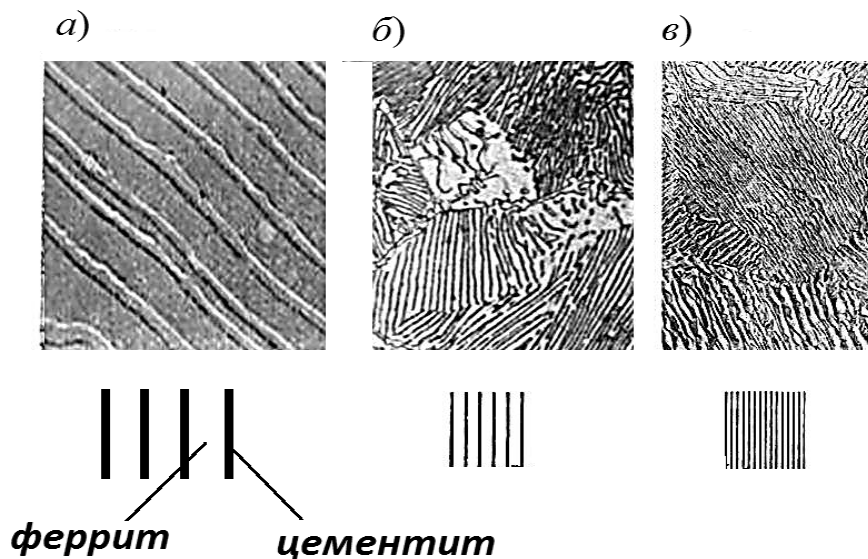


Рисунок 8.5 – Микроструктура стали 45 после нормализации (цементит в форме пластин)



a – перлит (15 HRC); $б$ – сорбит (25 HRC); $в$ – троостит (40 HRC)

Рисунок 8.6 – Различие ферритно-цементитных структур

Это приводит к повышению твердости и прочности материала, но не повышает вязкость и пластичность, в отличие от *сорбита отпуска*, у которого цементит имеет округлую форму, а не пластинчатую (см. рисунки 8.5 и 8.7).

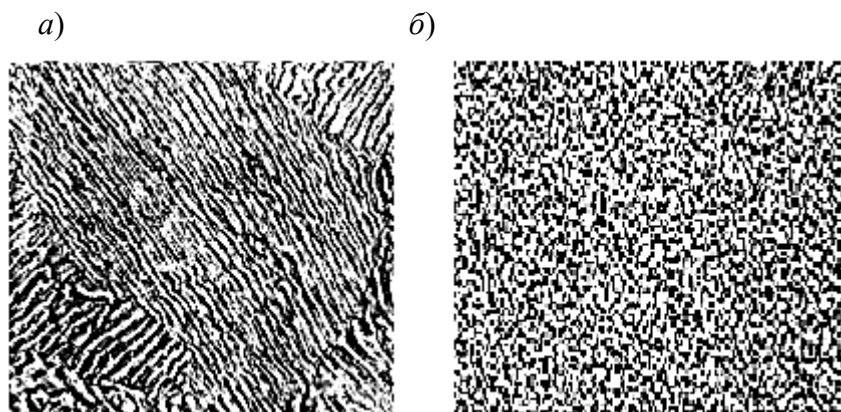


Рисунок 8.7 – Отличие сорбита, получаемого нормализацией (а), от сорбита отпуска (б), образующегося в результате улучшения

Нормализация является более дешевой термической обработкой, чем отжиг или улучшение.

Для низкоуглеродистых сталей ($C < 0,3 \%$) разница в структуре и свойствах материалов, подвергнутых отжигу и нормализации, невелика. Эти стали рекомендуется подвергать не отжигу, а нормализации.

Для среднеуглеродистых сталей различие в свойствах нормализованной и отожженной сталей более значительно. Для этих сталей нормализация часто заменяет более дорогую операцию – улучшение, состоящую в двойной обработке, включающей закалку и высокий отпуск. Однако пластинчатая форма зерен цементита, образующегося в результате нормализации, не обеспечивает высокую пластичность и ударную вязкость, в отличие от круглых зерен сорбита отпуска (см. рисунок 8.7).

Закалкой называется такой вид термической обработки, который заключается в нагреве на $30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше точки A_{c3} или A_{c1} , выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической V_k . При охлаждении со скоростью выше критической, аустенит переохлаждается ниже температуры точки M_n , при которой атомы железа и углерода практически теряют диффузионную подвижность, и происходит бездиффузионная перестройка гранецентрированной решетки аустенита в тетрагональную объёмно-центрированную решетку мартенсита. При этом весь углерод остается в твердом растворе $\text{Fe}_\gamma(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha(\text{C})$. Таким образом, *мартенсит* является пересыщенным твердым раствором углерода в α -железе. Он имеет игольчатое строение. Размер игл мартенсита определяется величиной исходного зерна аустенита. Чем больше зерно аустенита, тем крупнее размер игл образовавшегося мартенсита (рисунок 8.8). При нормальной закалке образуется мелкоигльчатый мартенсит. Высокая твердость и прочность мартенсита объясняется искажением решетки вследствие образования пересыщенного твердого раствора.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку. В случае нагрева под неполную закалку (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}) доэвтектоидная сталь имеет структуру аустенита и феррита, а заэвтектоидная – аустенита и цементита вторичного. Количество избыточных фаз (феррита или цементита) зависит от температуры закалки. Чем ближе температура нагрева к точке A_{c3} , тем меньше в структуре закаленной стали избыточных фаз. При увеличении содержания углерода в аустените снижаются температуры начала и конца мартенситного превращения (рисунок 8.9, линии M_n , M_k).

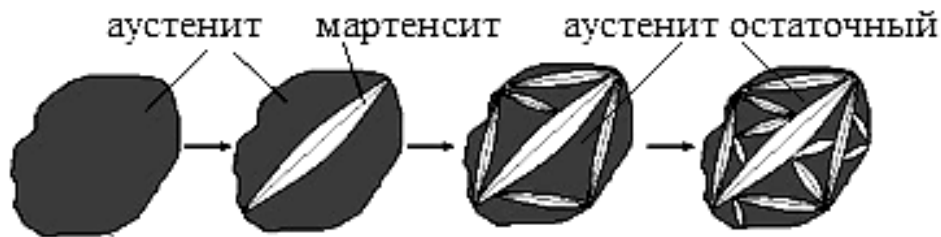


Рисунок 8.8 – Схема образования зерен мартенсита из аустенита

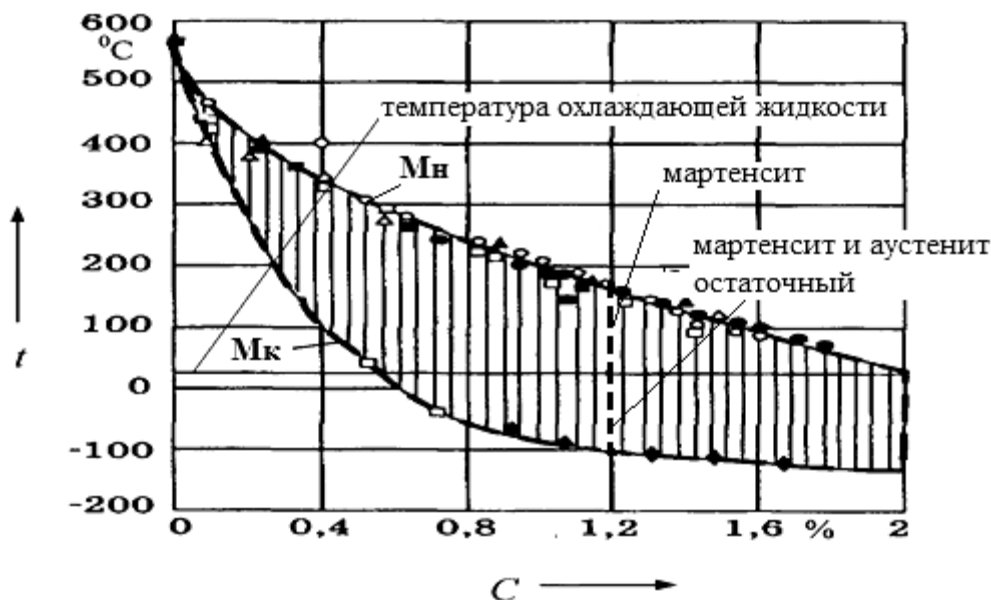


Рисунок 8.9 – Изменение температурного интервала мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода в аустените

Для стали У12 точка конца мартенситного превращения сдвигается в область отрицательных температур ($M_k = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$), таким образом, структура после закалки наполовину состоит из аустенита остаточного.

В соответствии с этой схемой после закалки сталей с содержанием углерода более 0,5 % в структуре всегда будет присутствовать остаточный аустенит (см. точку пересечения линий конца мартенситного превращения и температуры охлаждающей жидкости). Остаточный аустенит ухудшает свойства закаленной стали. После закалки сталь обязательно подвергают отпуску.

Под *отпуском* понимается совокупность операций, заключающихся в

нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки A_{c1} , выдержке и охлаждении до комнатной температуры. Практическими целями отпуска являются уменьшение закалочных напряжений, получение нужного комплекса механических свойств (прочности, пластичности и вязкости).

В зависимости от температуры нагрева различают три разновидности отпуска: *низкий, средний и высокий*.

Низкий отпуск проводят путем нагрева закаленной стали до температур ≈ 200 °С. При этом мартенсит закалочный превращается в мартенсит отпущенный. Низкий отпуск частично снимает внутренние напряжения и несколько повышает вязкость. Твердость при низком отпуске практически не снижается. Такой отпуск наиболее часто применяется при термической обработке инструментальных сталей и изделий после цементации.

При *среднем отпуске* нагрев закаленной стали производится до температур ≈ 400 °С, при этом образуется структура троостита отпуска. Троостит отпуска состоит из дисперсных частиц феррита и цементита. Сталь со структурой троостита отпуска имеет высокий предел упругости. Поэтому средний отпуск обычно применяют при термической обработке рессор и пружин.

При *высоком отпуске* нагрев закаленной стали производится до температур ≈ 600 °С; образуется структура – сорбит отпуска, представляющий собой смесь укрупненных зерен феррита и цементита округлой формы. Сорбит отпуска имеет хорошее сочетание свойств: прочность, пластичность и вязкость. Твердость сорбита составляет 25...30 HRC. Закалка стали с последующим высоким отпуском на сорбит носит название термического улучшения. Эта обработка рекомендуется для среднеуглеродистых конструкционных сталей.

Задание

- 1 Дать определение основным видам термической обработки, указать их цель.
- 2 Описать разновидности отжига первого и второго рода, указать их режимы и назначение.
- 3 Изучить влияние отпуска на фазовые превращения и характер образующихся микроструктур.
- 4 Зарисовать структуры предложенных шлифов, указать фазы.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определения термической обработке, отжигу первого рода, отжигу второго рода, закалке, отпуску.
- 2 Опишите разновидности отжига первого и второго рода, укажите их режимы и назначение.
- 3 Укажите преимущества и недостатки нормализации.
- 4 Укажите разницу и сходство структур перлита, сорбита и троостита.

Список литературы

1 **Струк, В. А.** Материаловедение = Materials science : учебник / В. А. Струк ; под ред. Н. К. Мышкина, В. А. Гольдаде. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2023. – 475 с.

2 **Свидунович, Н. А.** Материаловедение. Теоретические основы : учеб. пособие / Н. А. Свидунович ; под ред. Н. А. Свидуновича, В. М. Константинова. – Мн.: РИВШ, 2023. – 456 с.

3 **Бондаренко, Г. Г.** Материаловедение : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова ; под ред. Г. Г. Бондаренко. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2021. – 327 с.