

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г. И. Носова»  
Многопрофильный колледж



УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
/С.А. Махновский  
29.06.2022г

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ  
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ОП.04 Материаловедение**

**для обучающихся специальности**

**22.02.05 Обработка металлов давлением**

Магнитогорск, 2022

**ОДОБРЕНО**

Предметно-цикловой комиссией  
«Металлургии и обработки металлов давлением»  
Председатель О.В. Шелковникова

Протокол № 10 от 22.06.2022 г.

Методической комиссией МпК

Протокол № 6 от 29.06.2022 г.

**Составитель:**

преподаватель ФГБОУ ВО МГТУ МпК

Ю.В. Денисова

Методические указания по выполнению практических и лабораторных работ разработаны на основе рабочей программы учебной дисциплины «Материаловедение». Содержание практических и лабораторных работ ориентировано на подготовку обучающихся к освоению профессионального(ых) модуля(ей) программы подготовки специалистов среднего звена по специальности 22.02.05 Обработка металлов давлением

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	
2 Методические указания	
Лабораторная работа 1	
Лабораторная работа 2	
Лабораторная работа 3	
Лабораторная работа 4	
Лабораторная работа 5	
Лабораторная работа 6	
Практическая работа 1	
Практическая работа 2	
Практическая работа 3	
Практическая работа 4	
Практическая работа 5	
Практическая работа 6	
Практическая работа 7	
Практическая работа 8	
Практическая работа 9	
Лабораторная работа 7	
Практическая работа 10	

## 1. ВВЕДЕНИЕ.

Важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки студентов составляют практические работы.

Состав и содержание практических работ направлены на реализацию действующего федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования.

Ведущей дидактической целью практических работ является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений, законов, зависимостей, формирование профессиональных практических умений выполнять определённые операции, необходимые в последующей профессиональной деятельности.

В соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Материаловедение» предусмотрено проведение практических работ.

В результате их выполнения, обучающийся должен уметь:

- распознавать и классифицировать конструкционные и сырьевые материалы по внешнему виду, происхождению, свойствам;
- определять виды конструкционных материалов;
- выбирать материалы для конструкций по их назначению и условиям эксплуатации;
- проводить исследования и испытания материалов.

Содержание лабораторных работ ориентировано на подготовку студентов к освоению профессионального модуля основной профессиональной образовательной программы по специальности и овладению профессиональными компетенциями:

ПК 1.1. Планировать производство и организацию технологического процесса в цехе обработки металлов давлением.

ПК 1.2. Планировать грузопотоки продукции по участкам цеха.

ПК 1.3. Координировать производственную деятельность участков цеха с использованием программного обеспечения, компьютерных и коммуникационных средств.

ПК 1.4. Организовывать работу коллектива исполнителей.

ПК 1.5. Использовать программное обеспечение по учету и складированию выпускаемой продукции.

ПК 1.6. Рассчитывать и анализировать показатели эффективности работы участка, цеха.

ПК 1.7. Оформлять техническую документацию на выпускаемую продукцию.

ПК 1.8. Составлять рекламации на получаемые исходные материалы

ПК 2.1. Выбирать соответствующее оборудование, оснастку и средства механизации для ведения технологического процесса.

ПК 2.2. Проверять исправность и оформлять техническую документацию на технологическое оборудование.

ПК 2.3. Производить настройку и профилактику технологического оборудования.

ПК 2.4. Выбирать производственные мощности и топливно-энергетические ресурсы для ведения технологического процесса.

ПК 2.5. Эксплуатировать технологическое оборудование в плановом и аварийном режимах.

ПК 2.6. Производить расчеты энергосиловых параметров оборудования

ПК 3.1. Проверять правильность назначения технологического режима обработки металлов давлением.

ПК 3.2. Осуществлять технологические процессы в плановом и аварийном режимах.

ПК 3.3. Выбирать виды термической обработки для улучшения свойств и качества выпускаемой продукции.

ПК 3.4. Рассчитывать показатели и коэффициенты деформации обработки металлов давлением.

ПК 3.5. Рассчитывать калибровку рабочего инструмента и формоизменение выпускаемой продукции.

ПК 3.6. Производить смену сортамента выпускаемой продукции.

ПК 3.7. Осуществлять технологический процесс в плановом режиме, в том числе используя программное обеспечение, компьютерные и телекоммуникационные средства.  
ПК 3.8. Оформлять техническую документацию технологического процесса.  
ПК 3.9. Применять типовые методики расчета параметров обработки металлов давлением.  
ПК 4.1. Выбирать методы контроля, аппаратуру и приборы для контроля качества продукции.  
ПК 4.2. Регистрировать и анализировать показатели автоматической системы управления технологическим процессом.  
ПК 4.3. Оценивать качество выпускаемой продукции.  
ПК 4.4. Предупреждать появление, обнаруживать и устранять возможные дефекты выпускаемой продукции.  
ПК 4.5. Оформлять техническую документацию при отделке и контроле выпускаемой продукции.  
ПК 5.1. Организовывать и проводить мероприятия по защите работников от негативного воздействия производственной среды.  
ПК 5.2. Проводить анализ травмоопасных и вредных факторов на участках цехов обработки металлов давлением.  
ПК 5.3. Создавать условия для безопасной работы.  
ПК 5.4. Оценивать последствия технологических чрезвычайных ситуаций и стихийных явлений на безопасность работающих.  
ПК 5.5. Оказывать первую медицинскую помощь пострадавшим.

А также формированию общих компетенций:

ОК 1 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам

ОК 2 Использовать современные средства поиска, анализа и интерпретации информации и информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности

ОК 4 Эффективно взаимодействовать и работать в коллективе и команде

ОК 5 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке Российской Федерации с учетом особенностей социального и культурного контекста

ОК 9 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках

Выполнение студентами лабораторных работ по учебной дисциплине «Материаловедение» направлено на:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление, развитие и детализацию полученных теоретических знаний по конкретным темам учебной дисциплины;

- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

- формирование и развитие умений: наблюдать, сравнивать, сопоставлять, анализировать, делать выводы и обобщения, самостоятельно вести исследования, пользоваться различными приемами измерений, оформлять результаты в виде таблиц, схем, графиков;

- приобретение навыков работы с различными приборами, аппаратурой, установками и другими техническими средствами для проведения опытов;

- развитие интеллектуальных умений у будущих специалистов: аналитических, проектировочных, конструктивных и др.;

- выработку при решении поставленных задач профессионально значимых качеств, таких как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива.

Продолжительность выполнения лабораторной работы составляет не менее двух академических часов и проводится после соответствующей темы, которая обеспечивает наличие знаний, необходимых для ее выполнения.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### Тема 2.1.

#### Методы исследования структуры металлов и сплавов

#### Лабораторная работа № 1

#### Выявление ликвации серы.

##### Цель работы

Данная работа предполагает: проведение макроанализа по выявлению ликвации серы и фосфора в металлических образцах, а также присутствие свинца

Выполнив работу, Вы будете уметь:

- Определять химическую неоднородность стали
- Выявлять е дефекты, характеристику режимов травления макрошлифов:

##### Материальное обеспечение:

- заготовка
- шлифовальная машинка
- раствор кислоты (только под руководством лаборанта)

##### Задание:

Изучить метод использования серного отпечатка

Ответить на контрольные вопросы

Порядок выполнения работы:

Для выявления ликвации серы используют метод серного отпечатка (метод Баумана) по ГОСТ 10243-75, который можно отнести к группе методов поверхностного травления. При снятии отпечатка с высокосернистых (автоматных) сталей макрошлифы предварительно протирают тампоном, смоченным в 2-5%-ном растворе серной кислоты ( $H_2SO_4$ ), удаляя при этом продукты первичной реакции.

Отпечаток снимают на бромсеребряную фотобумагу, соответствующую размерам темплета (унибром по ГОСТ 10752-79). Листы фотобумаги выдерживают 5-10 минут на свету в 2...5%-ном растворе серной кислоты, затем слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги и накладывают эмульсионной стороной на поверхность макрошлифа. С обратной стороны фотобумагу непрерывно поглаживают резиновым валиком или тампоном, не допуская ее смещения, до полного удаления пузырьков газа, образующихся при реакции, а также газов, оставшихся между бумагой и макрошлифом, так как эти пузырьки оставляют на бумаге белые пятна и искажают результаты анализа. Фотобумагу выдерживают на макрошлифе при

температуре  $\sim 20^\circ C$  в течение 3...10 минут в зависимости от легирования стали и содержания в ней серы.

Полученный отпечаток промывают в воде, фиксируют в растворе гипосульфита в течение 15 минут, тщательно промывают в воде, просушивают. На участках повышенного содержания серы бумага окрашивается в светлокоричневый цвет (на легированной стали) или в темно-коричневый цвет (на углеродистой стали с повышенным содержанием серы, а также фосфора) и указывает форму и характер распределения сульфидов.

Зарисовать фигуры травления (приложение - отпечатки, полученные, на фотобумаге) и сделать вывод о качестве изучаемого металла.

Полученные результаты (отпечатки) сравнить с внутривзаводскими эталонами.

##### 2.5. Контрольные вопросы

1. Какие задачи решает макроанализ и виды макроанализа?
2. Как готовятся макрошлифы?
3. Какие реактивы и режимы используются при макроанализе?
4. Поверхностные дефекты и их характеристика?

5. Внутренние дефекты и особенности макроструктуры в этом случае?
  6. Ликвацию какого элемента можно получить с помощью отпечатка Баумана, где используется реактив Гейна?
  7. Какое влияние оказывают сернистые неметаллические включения на свойства стали, виды сернистых включений?
  8. Как влияет фосфор на свойства стали?
  9. Какое содержание серы и фосфора допустимо в качественных сталях и чугунах и почему?
  10. Способы устранения вредного влияния серы, фосфора, свинца в стали.
- Форма представления результата: выполненная работа  
Критерии оценки: зачет/незачет

## **Тема 2.1 Методы исследования структуры металлов и сплавов**

### **Лабораторная работа №2. Микроскопический анализ. Приготовление микрошлифов**

**Цель работы:** Научиться самостоятельно, проводить микроскопический анализ. В процессе выполнения работы необходимо изучить методику приготовления микрошлифов; оптические схемы лупы и микроскопа; характеристику микроскопа; устройство металлографического микроскопа.

#### **Задачи микроанализа**

Под микроанализом понимают изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа при увеличении в 50 - 2000 раз.

#### **При помощи микроанализа определяют:**

1. Форму и размер кристаллических зерен, из которых состоит металл или сплав
2. Изменение внутреннего строения сплава, происходящего под влиянием различных режимов термической химико-термической обработки, а также после внешнего механического воздействия на сплав.
3. Микропороки металла - микротрещины, раковины и т.п.
4. Неметаллические включения - сульфиды, оксиды и др.
5. Химический состав некоторых структурных составляющих по их характерной форме и характерному окрашиванию специальными реактивами, в некоторых случаях, приблизительно определяют химический состав изучаемого сплава.

Для микроскопического анализа из испытываемого материала вырезают образец, и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляются неметаллические включения, поры, графит в чугуне.

Подготовленная для исследования под микроскопом поверхность образца называется микрошлифом.

Таким образом, металлографический анализ состоит из: приготовления микрошлифов и исследования микрошлифов с помощью металлографического микроскопа.

#### **Приготовление микрошлифов**

Образец для исследования вырезают из такого места, которое давало бы характеристику внутреннего строения всего исследуемого материала.

Для получения плоской поверхности образца для микроанализа её обрабатывают на строгальном или фрезерном станке или, если материал твердый, на плоскошлифовальном станке. Затем образец шлифуют вручную. Шлифование начинают с наиболее грубым абразивным зерном, затем переходят на более мелкое зерно. При каждом переходе меняют направление шлифования на 90 градусов и следят за тем чтоб не оставалось риск от предыдущей шкурки. После шлифования приступают к полированию. Полируют

образцы после взвеси окиси хрома в воде или алмазной пастами. Поверхность образца доводят до зеркального блеска.

Чтобы выявить структуру, следует создать рельеф или окрасить в разные цвета структурные составляющие, что достигается обычно химическим травлением. При травлении кислота, в первую очередь, воздействует на границы зерна, как места, имеющие наиболее дефектное строение и, которые в травленном шлифе станут углублениями; свет, падая на них, будет рассеиваться, и в поле зрения микроскопа они будут казаться темными, а тело зерна - светлым.

Для выявления структуры углеродистых и среднелегированных сталей. А также чугунов, чаще всего используют 4% раствор азотной кислоты в спирте. Для выявления структуры высоколегированной стали, специальных чугунов и сплавов цветных металлов, кроме специальных реактивов применяют электролитическое травление.

#### **Работа на микроскопе :**

- Выбрать увеличение микроскопа (объектив и окуляр) для визуального наблюдения. Начинать надо с меньших увеличений, переходя к большим.
- В отверстие визуального тубуса вставить окуляр.
- В посадочное отверстие, расположенное в верхней части иллюминаторного тубуса вставить объектив .
- В окно предметного столика вставить подкладку с нужным отверстием в зависимости от размера шлифа и установить столик в таком положении, чтобы объектив был в центре отверстия подкладки.
- Поместить исследуемый шлиф полированной и протравленной поверхностью вниз на подкладку предметного столика над объективом.
- Визуальный тубус вдвинуть до упора.
- Наблюдая в окуляр, вращением винта произвести грубую наводку на фокус.
- Наблюдая в окуляр, вращением винта произвести точную наводку на фокус.
- Наблюдая в окуляр, при помощи винтов передвигать предметный столик и просматривать структуру в разных местах шлифа. Водить шлифом по подкладке предметного столика нельзя.

Форма представления результата: выполненная работа  
Критерии оценки: зачет/незачет

### **Тема 2.1 Методы исследования структуры металлов и сплавов**

#### **Лабораторная работа №3. Макроскопический анализ. Приготовление макрошлифов**

Цель работы:

Ознакомиться с методами макроскопического анализа и изучить характерные виды макроструктур на образцах железоуглеродистых сплавов.

Оборудование и материалы: 1. Набор макрошлифов.

2. Инструкция для проведения лабораторной работы.

3. Альбом фотографий макроструктур.

Порядок выполнения работы:

1. Описать значение макроанализа.

2. Описать технологию изготовления макрошлифа.

3. Рассмотреть с помощью лупы или невооружённым глазом исследуемую поверхность шлифа, зарисовать структуру и пороки металла (сплава и дать пояснения к ним).

Теоретические основы:

Сущность и назначение макроанализа

Макроскопический анализ заключается в определении строения материалов путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов невооруженным взглядом или через лупу при небольших увеличениях - до 30 раз.

Макроанализ даёт представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных операций металлургического производства (выплавка и разливка в слитки и непрерывные

заготовки, прокатка, ковка и др.), а также различных видов обработки на машиностроительных предприятиях (литья, обработки давлением, сварки, термической и химикотермической обработки).

Макроанализ в отличие от микроскопического анализа не позволяет определить все особенности строения. Часто макроанализ является не окончательным, а предварительным видом исследования. Он позволяет выбрать те участки, которые требуют дальнейшего микроскопического исследования. Широкое применение макроанализ находит при контроле качества сталей и сплавов и для обнаружения разнообразных дефектов металлургии.

Макростроение металла можно изучить:

- на поверхности заготовки;
- в изломе заготовки;
- на предварительно подготовленной поверхности, отшлифованной и подвергнутой травлению специальными реактивами.

Методом макроанализа определяют:

- 1) в литом металле - нарушение сплошности (усадочную рыхлость, газовые пузыри и раковины, трещины, пустоты, свищи, подкорковые пузыри и др.), дендритное строение и зону транскристаллизации, химическую неоднородность слитка (ликвацию);
- 2) неоднородность строения сплава, вызванную обработкой давлением - полосчатость, волокнистость горячедеформированной стали или линии скольжения в наклепанном металле;
- 3) структуру и химическую неоднородность металла, созданную термической, термомеханической или химической обработкой.

Макроанализ излома определяют непосредственным наблюдением, при определении других особенностей макростроения необходимы специальные макрошлифы.

Приготовление образцов и режимы травления при макроанализе

Макроанализ проводят на продольных и поперечных макрошлифах (темплетах). В случае крупных цилиндрических деталей темплеты вырезают в радиальном, тангенциальном направлении, важное значение при этом имеет выбор наиболее характерного для изучаемого изделия сечения. Условия отбора проб для контроля качества металла (число образцов, их размер, место вырезки и др.) указывается в стандартах и технических условиях на конкретные виды металлопродукции. В частности, макроструктуру прутков и заготовок обычно контролируют на поперечных макрошлифах. Поверхность макрошлифов перед травлением подвергают торцеванию, строганию или шлифованию. После механической обработки поверхность должна быть ровной и гладкой, без значительного наклона и прижога металла. При зачистке на шлифовальном станке во время перехода с крупнозернистой на мелкозернистую шлифовальную бумагу образцы отчищают от наждачной пыли, поворачивают под углом  $90^\circ$  и шлифуют до тех пор, пока не исчезнут следы предыдущей обработки. На поверхности макрошлифов не должно быть загрязнений, следов масла и т.п., поэтому после шлифовки образцы необходимо промыть водой для удаления абразива. На образцах не должно быть пленки окислов и грубых рисок. После шлифования образцы вытирают и подвергают травлению.

Выбор того или иного способа макротравления шлифа зависит от задачи, поставленной при исследовании конкретных заготовок.

Методы макростроения подразделяют на три основные группы: грубого травления, поверхностного травления, отпечатков.

Для выявления дефектов, нарушающих сплошность стали, применяют реактивы глубокого и поверхностного травления. Выявление основано на том, что соответствующие реактивы более сильно воздействуют на участки, где имеются дефекты несплошности. После травления поверхность макрошлифа в указанных участках протравливается более сильно и глубоко и они четко выявляются на фоне более выступающих и светлых (то есть менее сильно протравленных) участков без подобных дефектов.

Структура, выявляемая глубоким травлением, сравнительно слабо зависит от подготовки поверхности образцов; поверхностное травление или метод отпечатков требует более тщательной подготовки поверхности.

Реактивы глубокого травления используют для макроанализа слитков (отливок) и проката (поковок). Их применяют для определения флокенов, трещин, рыхлости, пор, не выходящих непосредственно на поверхность металла.

Реактивы поверхностного травления выявляют крупную пористость и другие дефекты несплошности, выходящие на поверхность.

При травлении макрошлифы предварительно протирают спиртом или другими составами для удаления поверхностных загрязнений и после этого погружают в ванну с реактивом таким образом, чтобы он шлифованной поверхностью не

соприкасался со стенками ванны. В ряде случаев травление проводят протиркой тампоном, смоченном в реактиве. Образцы перед травлением рекомендуется подогревать до температур раствора. Время травления должно быть более продолжительным (в рекомендованных пределах) для легированных и кислотостойких сталей, для металла с повышенной

твердостью, при травлении образцов без подогрева или в менее нагретом растворе. После травления образцы промывают в проточной воде и просушивают. При необходимости хранения образцы рекомендуется дополнительно обрабатывать 10%-ным спиртовым раствором аммиака или промыть спиртом, а затем бесцветным лаком. После травления макрошлиф приобретает рельефную поверхность с отчётливо видимыми осями дендритов (литая сталь), ликвационной неоднородностью,

пористостью, трещинами и другими дефектами, а также волокнистой структурой (деформированная сталь).

Учение о структуре и составе металлов и сплавов и главным образом о макро и микроструктуре металлов называется металлографией. Основной задачей металлографического анализа является исследование структуры и пороков металла. Макроанализ позволяет определить в металле величину, форму и расположение зёрен, дендритность или волокнистость строения, ликвидацию (серы, фосфора), усадочную рыхлость, газовые пузыри, раковины, трещины и т. д. Макроскопический метод исследования металлов можно разделить на два вида: 1) изучение макрошлифов; 2) изучение изломов. Изучение макрошлифов складывается из следующих этапов: 1) приготовление макрошлифов; 2) травление макрошлифов. 3) исследование структуры и пороков при помощи лупы или невооружённым глазом. Образец металла, приготовленный для рассмотрения его строения невооружённым глазом или с помощью лупы, называется макрошлифом. Изучаемая поверхность макрошлифа должна быть плоской, гладкой. Поверхность образца, предназначенного для макроанализа, обрабатывается на фрезерном или строгальном станке. Для получения более гладкой поверхности образец шлифуют вручную. Шлифование начинают с более крупным абразивным зерном, затем постепенно переходят на шлифование бумагой с более мелким зерном. После шлифования образец протирают ватой, смоченной спиртом и подвергают травлению.

Контрольные вопросы:

1. В чём заключается макроскопический анализ изучения свойств металла?
2. Задачи макроанализа (опишите).
3. Что называется фотоотпечатком?

### **Тема 2.3 Механические свойства металлов и методы их испытания**

#### **Лабораторная работа №4. Изучение методики измерения твёрдости металлов по Бринелю и Роквеллу**

Цель работы: -углубление, закрепление полученных теоретических знаний по данной теме;

-формирование умений применять полученные знания на практике;

-ознакомление с методикой проведения испытания металлов на твердость по

методу Бринелля и Роквелла.

Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

-развивать умения: наблюдать, анализировать, делать выводы и обобщения,

самостоятельно вести исследования

Материальное обеспечение:

1. Твердомеры типа Бринелля и Роквелла.
2. Образцы для испытания.
3. Лупа.
4. Таблица для определения чисел твердости по Бринеллю.

**Задание:**

1. Изучить способы измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу;
2. Составить опорный конспект и зарисуйте рисунок 1;
3. Подготовить образец;
4. Провести испытание по Бринеллю;
5. Провести испытание по Роквеллу;
6. Сделать вывод.

## **2. Краткая теория вопроса.**

Для того чтобы правильно использовать материал, надо знать его свойства. Различают **физические, химические, технологические и механические свойства.**

**Физические свойства**- показывают отношение материала к действию физических явлений (исключая действие механических сил). К ним относятся: плотность – отношение к действию сил тяжести; теплопроводность – способность передавать тепло от более нагретых частей тела к менее нагретым; цвет – способность отражать или поглощать световые волны и т.п.

**Химические свойства** - показывают отношение материала к действию химических явлений. К ним относятся: окисляемость способность сопротивляться действию окислителей; коррозионная стойкость – способность сопротивляться коррозии, растворимость – способность растворяться в химических веществах и т.д.

**Технологические свойства** - показывают отношение материала к способам его обработки. К ним относятся: литейные свойства (жидкотекучесть, усадка, склонность к ликвации), деформируемость (ковкость), свариваемость – способность образовывать неразъемные соединения требуемого качества и т.д.

**Механические свойства** показывают отношение материала к действию внешних сил. К ним относятся твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость и т.д.

**Твердостью** называют свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него постороннего тела. Твердость – это характеристика материала, зависящая от совокупности его пластических, упругих свойств и характера напряженного состояния, проявляющаяся в способности оказывать сопротивление при деформации участка поверхности тела из этого материала.

Способы измерения твердости различаются по характеру воздействия наконечника на поверхность исследуемого материала и характеризуют его различные механические свойства.

Твердость, измеренная по вдавливанию наконечника, характеризует сопротивление материала пластической деформации.

Это самые распространенные методы замера твердости (твердость по Роквеллу, Бринеллю, Виккерсу, определение микротвердости).

Твердость, измеренная по царапанию поверхности, характеризует сопротивление разрушению.

Твердость, измеренная по удару или по отскоку наконечника- шарика, характеризует упругие свойства материала.

Это метод замера твердости по Полюди, применяемый при переносных испытаниях.

Измерение твердости по Бринеллю проводят по ГОСТ 9012-59 «Метод измерения твердости по Бринеллю».

Твердость по Бринеллю определяют вдавливанием стального шарика диаметром от 2,5 до 10 мм с нагрузкой от 187,5 до 3000кг в течение от 10 до 30 секунд.

Диаметр отпечатка измеряют с помощью микроскопа или других приборов в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют среднее арифметическое значение двух измерений.

При этом разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2% меньшего из них.

Твердость по Бринеллю выражается отношением приложенной нагрузки  $F$  к площади поверхности сферического отпечатка  $A$ .

Обозначение твердости:

$HB$  – при применении стального шарика для металлов и сплавов с твердостью не более 450 единиц и  $HBW$  – при применении шарика из твердого сплава для металлов и сплавов с твердостью более 650 единиц.

Если твердость по Бринеллю измеряется с использованием стального шарика диаметром  $D = 10$  мм при нагрузке  $F = 3000$  кгс и продолжительности выдержки под нагрузкой от 10 до 15 с, она обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами  $HB$ , например 190HB. При других условиях испытания после буквы  $HB$  указываются условия испытания в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки под нагрузкой: например, 190 HB 5/750/20 – твердость по Бринеллю определенная с применением шарика  $D = 5$  мм при нагрузке 750 кгс и продолжительности выдержки под нагрузкой 20с.

Число твердости определяется по формуле:

$$HB = F/A = 2F/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2});$$

где  $F$  – приложенная нагрузка, кгс,  $D$  – диаметр шарика, мм;  $d$  – диаметр отпечатка, мм.

*Требования к образцам и проведению испытаний:*

- ✓ толщина образца должна не менее, чем в 10 раз, превышать глубину отпечатка;
- ✓ поверхность должна быть ровной, гладкой и свободной от оксидных пленок;
- ✓ расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее  $4d$ ;
- ✓ расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее  $2,5d$ .

Схемы проведения измерения твердости приведена на рис. 1 (а).

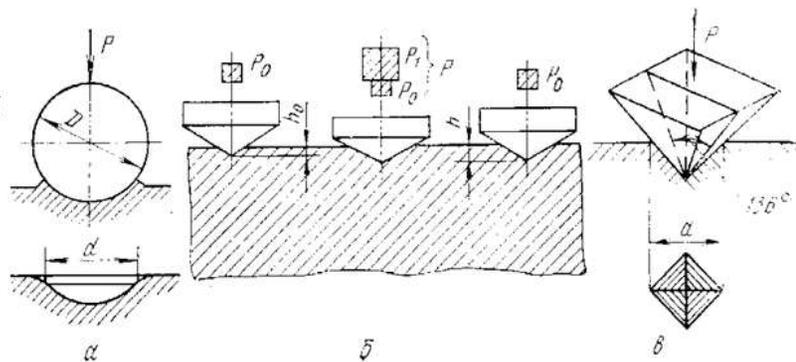


Рис.1 Схемы замера твердости: по а – по Бринеллю, б –по Роквеллу, в –по Виккерсу

Для определения твердости по Бринеллю применяют специальные приборы стационарного типа ТШ или ТШК с гидравлическим или рычажно-механическим приводом (рис. 2).

Прибор состоит из чугунной станины 1, опорного столика 2 для помещения образца, шарика 3, вставленного в шпиндель 4, рычажной системы 5 с грузами 6 и червячной передачей с шатуном 7. Нагружение производится при помощи электродвигателя 8. Опорный столик может перемещаться в вертикальном направлении при помощи подъемного винта 9 и маховик к 10. Предварительное нагружение для предотвращения смещения образца во время испытания производится пружиной 11.

## 2.2 Определение твердости по методу Роквелла

Сущность метода заключается во внедрении в поверхность образца алмазного конусного (шкалы А, С, D) или стального сферического наконечника (шкалы В, Е, F, G, К) под действием последовательно прилагаемых предварительного  $F_0$  и основного  $F_1$  усилий и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия  $F_1$ .

Наиболее часто используются три шкалы метода Роквелла: А,В,С.

Выбор наконечника и нагрузки для испытания по методу Роквелла представлен в табл. 1.

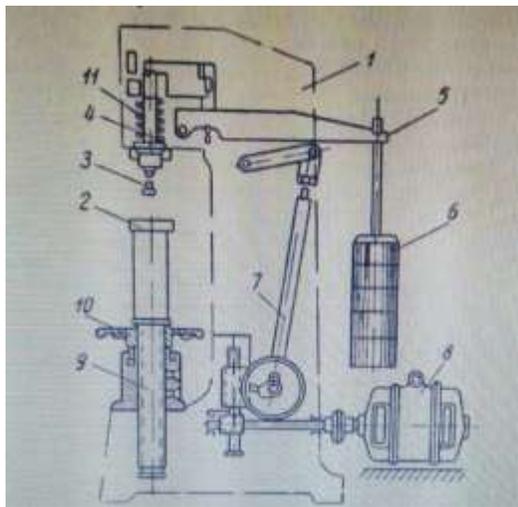


Рис.2 Прибор для определения твердости ТШ

Таблица 1. Определение твердости по методу Роквелла

Испытуемый материал	Наконечник	Цвет шкалы	Нагрузка, кг	Шкала	Обозначение твердости
Мягкие цветные металлы и их сплавы	Шарик (диаметр 1,59 мм)	Красный	100	В	HRB
Мягкие цветные металлы и их сплавы	Алмазный конус	Черный	150	С	HRC
Особо твердые материалы (белый чугун, металлокерамические твердые сплавы)	Алмазный конус	Черный	60	А	HRA

Твердость по Роквеллу обозначают символом HR с указанием шкалы твердости. Число твердости по Роквеллу определяется по шкале индикатора или показателя цифрового отсчитывающего устройства с округлением до 0,5 единицы твердости.

Например: 61,5 HRC - твердость по Роквеллу 61,5 единиц по шкале С.

Число твердости по Роквеллу является условной величиной и *определяется разностью глубин, на которые перемещается наконечник под действием последовательно приложенных нагрузок*. Чем больше величина вдавливания, тем меньше величина твердости HR. Единица твердости по Роквеллу - безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002мм

*Требования к образцам и проведению испытаний:*

- ✓ шероховатость поверхности образца Ra должна быть не более 2,5 мкм;
- ✓ толщина образца должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основного усилия;
- ✓ расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка, но не менее 2 мм;
- ✓ расстояние от центра до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм).

Наличие различных шкал твердости, условный и безразмерный численный результат испытаний, сравнительно низкая чувствительность делают метод Роквелла лишь средством быстрого и упрощенного технического контроля. Однако отпечатки на поверхности деталей имеют небольшие размеры и практически безвредны для дальнейшей эксплуатации деталей.

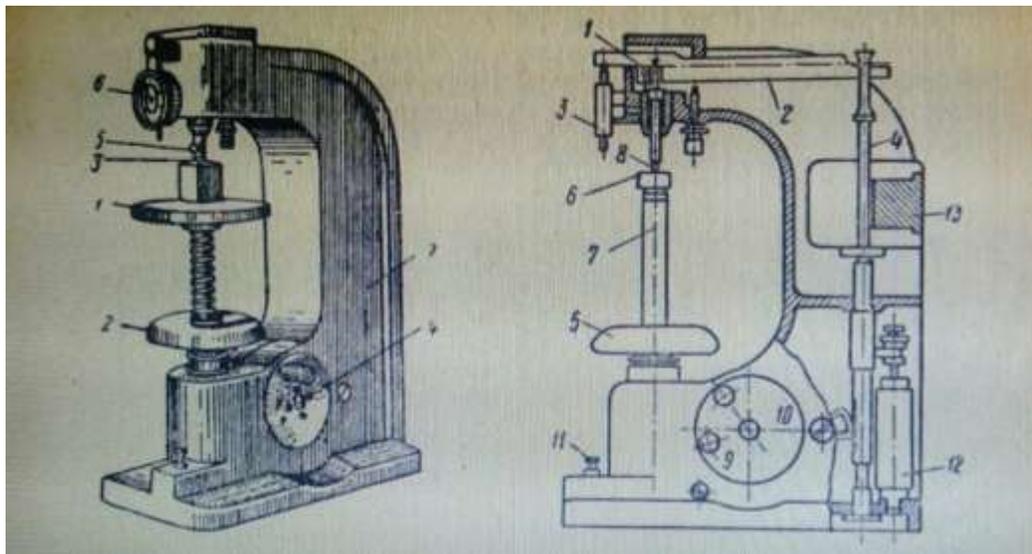


Рис.3 А-прибор Роквелла: 1-подставка, 2-маховик,3-алмазный конус, 4-рукоятка, 5-наконечник, 6-индикатор,7-станина;  
Б-схема дюрометра Роквелла

На опоре 1 вращается рычаг 2, соприкасающейся с одной стороны с индикатором 3, а с другой стороны с вертикальной тягой 4 с грузами. При помощи маховичка 5 испытываемый образец 6, помещённый на предметный столик 7, подводят к наконечнику шариком или с алмазным конусом 8. Маховичок медленно вращают до тех пор, пока малая стрелка индикатора не придет к нулю, а большая не займёт почти вертикальное положение. Затем шкалу индикатора поворачивают так, чтобы нулевая точка шкалы С совпала с острием большой стрелки (при работе с шариковым наконечником большая стрелка устанавливается на деление 30 шкалы В). В этот момент наконечник 8 оказывается нагруженным силой в 10 кг. Это предварительная нагрузка устраняет влияние мелких неровностей поверхности образца на результаты его испытания. Рукоятка 9 на диске 10 служит для поднятия вертикальной тяги с грузом, когда нужно разгрузить испытываемый образец. Нажимая кнопку 11, приводят в действие с помощью моторчика нагружающий механизм, при этом рукоятка диска переместится, а вертикальная тяга с грузами опустится, постепенно нагружая наконечник до 100 или 150 кг. Масляный катаракт 12 регулирует скорость нагружения грузом 13. Затем поворотом рукоятки 9 в прежнее положение нагрузку сжимают до 10 кг.

Стрелка индикатора покажет число твердости, которая зависит от глубины вдавливания шарика или конуса при увеличении нагрузки от 10 до 100 или 150 кг.

#### Порядок выполнения работы:

1. Подготовить образец.
  2. Образец должен иметь чистую и плоскую поверхность.
  3. Толщина образца должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка.
  4. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее 2,5 диаметров отпечатка, а от центра соседнего отпечатка на расстоянии не менее четырех диаметров отпечатка.
  5. Провести испытание по Бринеллю.
    - 5.1 Установить на подвеску грузы, соответствующие выбранной нагрузке.
    - 5.2 Испытуемый образец положить на столик прибора.
    - 5.3 Вращением маховика прижать образец к шарикам.
    - 5.4 Включить электродвигатель.
    - 5.5 После снятия нагрузки опустить столик.
    - 5.6 Измерить полученный отпечаток лупой в двух взаимно перпендикулярных направлениях.
    - 5.7 В результате вдавливания шарика на поверхности образца образуется отпечаток.
    - 5.8 Диаметр отпечатка характеризует твердость образца.
- Число твердости по Бринеллю подсчитывают по формуле:
- $$HB = F/A = 2F/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2});$$
- где F – приложенная нагрузка, кгс, D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.
- Диаметр шарика, величину нагрузки на образец, время выдержки нагрузки в зависимости от твердости испытываемого образца определяют по таблице (ГОСТ 9012 – 59).
- 5.10 По таблице определить твердость.
  - 5.11 Результаты испытаний занести в таблицу 2.

### Результаты испытаний

Материал образца	Условия испытания			Диаметр отпечатка, мм			Твердость НВ, кг/мм <sup>2</sup>
	Нагрузка, кг	Диаметр шарика, мм	Время выдержки, сек	Первое измерение	Второе измерение	Среднее значение	

6. Провести испытание по Роквеллу.

6.1 Подвесить груз, соответствующий наконечнику и шкале (Табл.3)

Таблица 3

### Выбор нагрузки наконечника

Шкала	Вид наконечника	Нагрузка, кг	Обозначение твердости	Пределы измерения
В	Стальной шарик 1,588 мм	100	HRB	25...100
С	Алмазный конус	150	HRC	20...67
А	Алмазный конус	60	HRA	70...85

6.2 Образец положить на столик прибора.

6.3. Вращением маховика поджимать образец к наконечнику до тех пор, пока маленькая стрелка индикатора не установится против красной точки – это означает, что дана предварительная нагрузка 10 кг. Большая стрелка должна указывать на нуль шкалы индикатора с погрешностью + 5 делений.

6.4. Вращением барабана 9 установить большую стрелку на нуль черного цвета.

6.5. Плавно нажать на клавишу 10 (при этом включается механизм нагружения).

6.6. После окончания цикла нагружения произвести отсчет по шкале индикатора.

6.7. Снять предварительную нагрузку вращением маховика 8 против часовой стрелки.

6.8. Испытание провести не менее трёх раз.

6.9. Результаты испытаний занести в таблицу 4

Таблица 4

### Результаты испытаний

Материал образца	Условия испытания			Диаметр отпечатка			Твердость HRC, кг/мм <sup>2</sup>
	Нагрузка, кг	Диаметр шарика, мм	Время выдержки	Первое измерение	Второе измерение	Среднее значение	

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

## Лабораторная работа №5. Изучение влияния условий кристаллизации на структуру и механические свойства

Цель работы:

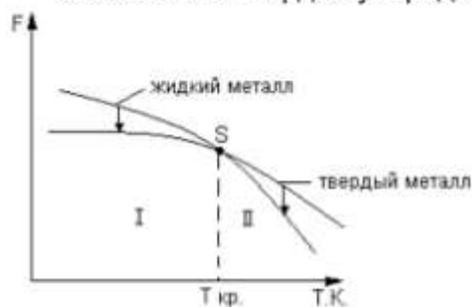
1. Изучить механизм и кинетику процесса кристаллизации.
2. Изучить макроструктуру металлических слитков.
3. Изучить влияние условий кристаллизации на структуру и механические свойства металла.

Материалы и оборудование для выполнения работы:

Водные растворы солей, биологические микроскопы, металлические слитки, муфельная электропечь с термопарой и автоматическим потенциометром, металлическая форма (кокиль), керамическая форма.

### Кристаллизация металлов

Кристаллизация металлов – переход материала из жидкого состояния в твердое упорядоченное, т.е. кристаллическое.



Изменение величины свободной энергии в зависимости от температуры

Степень переохлаждения разностью между теоретической и фактической температурами кристаллизации.

### Основные положения

Кристаллизация – это процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое, кристаллическое. В расплавленном металле нет дальнего порядка: расстояния между атомами не являются постоянными, объемы с упорядоченным расположением атомов то возникают, то снова исчезают. В процессе кристаллизации устанавливается дальний порядок: атомы располагаются на определенных расстояниях по каждому пространственному направлению, образуя кристаллическую решетку. Такое упорядоченное расположение возникает за счет равновесия сил притяжения и отталкивания между атомами и соответствует минимуму энергии взаимодействия атомов в металле.

Процесс кристаллизации может идти самопроизвольно, а может вызываться какими-то искусственными причинами. Самопроизвольно идут только те термодинамические процессы, которые приводят к уменьшению свободной энергии системы. (Свободная энергия  $F$  – это изменяемая часть полной энергии системы.) С повышением температуры металла его свободная энергия как в жидком, так и в твердом состоянии снижается, но с разной скоростью: свободная энергия жидкого металла снижается быстрее. Поэтому кривые зависимости свободной энергии от температуры пересекаются при какой-то температуре  $T_S$ . При любой температуре ниже  $T_S$  меньшим уровнем свободной энергии обладает твердый металл, поэтому, если охладить расплав до температуры  $T_1 < T_S$ , начнется кристаллизация. И наоборот, при температурах выше  $T_S$  устойчиво жидкое состояние, поскольку жидкий металл имеет меньший уровень свободной энергии. Значит, нагрев до  $T_2 > T_S$  приведет к плавлению.

Температура  $T_S$ , при которой свободная энергия металла в твердом и жидком состоянии одинакова, называется теоретической температурой кристаллизации. При этой температуре жидкость и кристаллы находятся в равновесии, ни плавление, ни кристаллизация до конца не идут. Чтобы кристаллизация осуществилась, необходимо некоторое переохлаждение относительно теоретической температурой кристаллизации. В таком случае образование кристаллов дает выигрыш в свободной энергии, что и является стимулом процесса. Поэтому на самом деле кристаллизация всегда происходит при температуре

ниже  $T_S$ . Реальная температура кристаллизации  $T_P$  всегда меньше теоретической. Разность между теоретической и реальной температурой кристаллизации называется степенью переохлаждения  $\Delta T$ :  $\Delta T = T_S - T_P$ . Измеряя температуру металла в процессе кристаллизации, можно получить кривую охлаждения (рис. 3). Это график в координатах «температура – время». На этой кривой имеется горизонтальный участок, соответствующий переходу металла из жидкого состояния в твердое.



Разность между теоретической и практической температурами кристаллизации называется *величиной* или *степенью переохлаждения*.

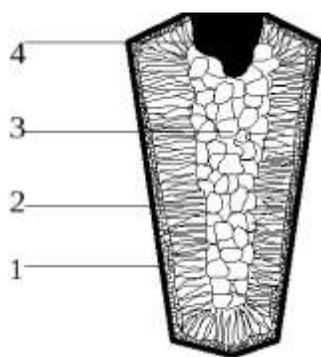


Рис.1.1. Макроструктура слитка (схема):  
 1 - корковая зона;  
 2 - зона столбчатых кристаллов;  
 3 - зона равноосных кристаллов;  
 4 - усадочная раковина

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомится с основными сведениями по теме работы.
2. С помощью биологического микроскопа проследить ход кристаллизации различных солей из пересыщенных водных растворов. Зарисовать начальную, промежуточную и конечную стадии кристаллизации, изобразить характерную форму кристаллов каждой соли. При этом обратить внимание, в каких местах капли раствора процесс кристаллизации начинается раньше и протекает интенсивнее. Описать и объяснить результаты наблюдений.
3. Изучить и зарисовать макроструктуру слитка металла. Указать на рисунке зоны кристаллизации, объяснить их образование.
4. Расплавить алюминиевый сплав (силумин) и залить в металлическую и керамическую формы. После затвердевания и охлаждения слитков провести испытания на ударную вязкость, зарисовать макроструктуру изломов. Объяснить различие в строении и свойствах (ударной вязкости) слитков, полученных в металлической и керамической формах.

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

## Тема 2.3 Механические свойства металлов и методы их испытания Лабораторная работа №6. Определение ударной вязкости материалов

Цель работы: Научиться определять ударную вязкость расчетным способом, а также с

использованием таблиц.

Оборудование: справочные таблицы

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Описать методику приготовления к испытаниям на ударную вязкость (приготовление механического копра и шаблонов для установки образца).
2. Определить ударную вязкость с помощью расчётов.
3. Определить ударную вязкость с использованием таблиц.

### 1. Теоретические сведения

Данные для расчётов:

Задача 1 Даны :  $\alpha$ -угол подъёма маятника до испытания,  $\alpha=69^\circ$   $\beta$ -угол вылета маятника после испытаний,  $\beta=60^\circ$  L-длина плеча маятника, равна 2,1 м P-Вес маятника, равен 7 кг b-длина грани квадратного сечения образца, равна 0,002 м F-Площадь поперечного сечения квадратного образца (м<sup>2</sup>)  $F=b^2$  Определить: H-высота подъёма маятника до испытаний (м) h-высота вылета маятника после испытаний (м)  $A_p$  -работа определяемая расчетно (кГм)  $A_t$  –работа затраченная на разрушение образца определяемая по таблице (кГм)  $a_p$  -ударная вязкость определяемая по таблице (кГм/см<sup>2</sup>) KCU-ударная вязкость определяемая расчетно (кГм/см<sup>2</sup>)

Задача 2 При испытании на маятниковом копре стандартного стального образца сечением в запиле 10x8 мм работа на разрушение образца составляла 300 Дж. Вычислите ударную вязкость и определите, обеспечит ли, полученное значение ударной вязкости, надежную работу материала, если условием надежной работы материала является значение ударной вязкости  $a_n \geq 50$  Дж/ м<sup>2</sup>

Задача 3 При испытании на маятниковом копре стандартного стального образца сечением в запиле 10x8 мм ударная вязкость составляла 6 кгс/см<sup>2</sup>, а остаток неиспользованной работы после удара был равен 3кгс·м. Вес маятника 8 кг. Определите работу удара, затраченную на излом образца, и запас работы маятникового копра до удара. Ударная вязкость определяется с помощью формулы

Таблица 1 Зависимость работы удара от угла подъема маятника до и после излома образца

Угол подъема маятника после излома образца, градусы	Работа удара, Дж (кгс м), при угле подъема маятника до излома образца, градусы.				Угол подъема маятника после излома образца, градусы	Работа удара, Дж (кгс м), при угле подъема маятника до излома образца, градусы			
	69	90	107	130		69	90	107	130
2	1,97	3,07	3,97	5,04	66	0,15	1,25	2,15	3,22
4	1,96	3,06	3,96	5,04	68	0,05	1,15	2,05	3,12
6	1,95	3,05	3,95	5,03	70		1,05	1,95	3,02
8	1,94	3,04	3,94	5,01	72		0,95	1,85	2,92
10	1,92	3,02	3,92	5,00	74		0,86	1,79	2,82
12	1,90	3,00	3,90	4,98	76		0,74	1,69	2,72
14	1,88	2,98	3,88	4,95	78		0,64	1,54	2,61
16	1,85	2,95	3,85	4,92	80		0,53	1,43	2,51
18	1,82	2,92	3,82	4,89	82		0,43	1,32	2,40
20	1,77	2,87	3,77	4,85	84		0,32	1,22	2,29
22	1,75	2,85	3,74	4,82	86		0,21	1,11	2,19
24	1,70	2,80	3,70	4,78	88		0,11	1,00	2,08
26	1,66	2,76	3,66	4,73	90		0,00	0,90	1,97
28	1,61	2,71	3,61	4,68	92			0,79	1,87
30	1,56	2,66	3,56	4,63	94			0,68	1,76
32	1,50	2,60	3,50	4,58	96			0,58	1,65
34	1,44	2,55	3,44	4,52	98			0,47	1,55
36	1,38	2,48	3,38	4,48	100			0,36	1,44
38	1,32	2,42	3,32	4,39	102			0,26	1,34
40	1,25	2,35	3,25	4,33	104			0,15	1,23
42	1,18	2,28	3,18	4,25	106			0,05	1,13

44	1,11	2,21	3,11	4,18	108				1,05
46	1,03	2,13	3,03	4,11	110				0,92
48	0,95	2,05	2,95	4,03	112				0,82
50	0,87	1,97	2,87	3,95	114				0,72
52	0,79	1,89	2,79	3,86	116				0,63
54	0,70	1,80	2,70	3,78	118				0,53

### **Вопросы для подготовки к защите работы**

- Какая цель лабораторной работы?
- В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
- Какие существуют методы определения работы удара?
- Что такое удельная ударная вязкость?
- В каких единицах измеряется удельная ударная вязкость?
- Какие факторы влияют на величину ударной удельной вязкости?
- О каких свойствах материала судят по величине ударной удельной вязкости?
- Как определить энергию, запасенную маятником в самом верхнем положении?
- Как влияет расстояние между опорами установки образца на величину удельной ударной вязкости?
- Чем принципиально отличаются образцы из металла от образцов из других материалов?
- Как изменится удельная ударная вязкость с изменением температуры?
- Чем отличается маятниковый копер для определения ударной вязкости металлов от копра для испытаний неметаллических материалов?
- Как влияет на ударную вязкость содержание в металле углерода и фосфора?
- Что понимают под температурным интервалом хрупкости?
- В чем состоит принцип работы маятникового копра?
- Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
- В чем сходство и различие статических и динамических испытаний?

**Форма представления результата:** выполненная работа  
**Критерии оценки:** зачет/незачет

### **Тема 3.1 Общая характеристика металлических сплавов Практическая работа №1. Диаграмма состояния сплавов**

Цель:

- Изучить диаграмму состояния сплавов;
- Разобраться с превращениями, происходящими в железоуглеродистых сплавах при медленном охлаждении и нагреве;

- определить фазовый состав и структуру сплавов в зависимости от их химического состава и температуры.

Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

- обобщать, систематизировать, углублять, закреплять, детализировать полученные теоретические знания
- формировать умения применять полученные знания на практике

Материальное обеспечение:

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Электронные плакаты Диаграмм состояния.

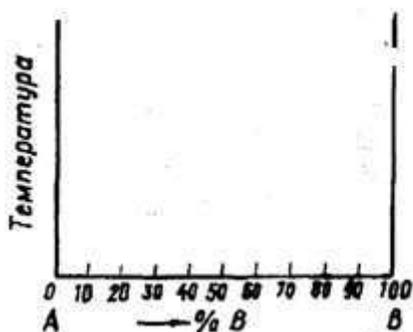
Точка	Темпер	Содер	Точка	Темпер	Содер	Точка	Темпер	Содер
диагра	атура,	жание	диагра	атура,	жание	диагра	атура,	жание
ммы	0С	углеро	ммы	0С	углеро	ммы	0С	углеро
		да,			да,			да,
		масс.%			масс.%			масс.%

### Краткие теоретические сведения

Одной из важнейших задач практического металловедения является построение и изучение диаграмм состояния.

Диаграммой состояния называется графическое изображение фазового состояния сплавов данной системы в зависимости от их концентрации и температуры. По этой диаграмме можно качественно судить о структуре сплавов, их физико-химических, физических, механических и технологических свойствах.

Для системы сплавов, состоящих из двух компонентов А и В, диаграмма состояния изображается в двух измерениях: по оси абсцисс откладывается концентрация компонентов, а по оси ординат — температура (рис, 4).



Диаграммы состояния строятся экспериментально путем нахождения критических точек чистых компонентов А и В и ряда их сплавов.

Критическими точками называются температуры, при которых происходит изменение фазового состояния сплавов или чистых компонентов.

Линии диаграммы являются геометрическими местами критических точек, соответствующих аналогичным изменениям фазового состояния.

Определение критических точек производится с помощью ряда методов физико-химического анализа: термического, металлографического, дилатометрического, измерения электрических, магнитных свойств и т.д.

Любой из этих методов основан на том, что изменение фазового состояния сплава сопровождается скачкообразным изменением его свойств.

Одним из наиболее простых и широко используемых методов является термический. Термический метод основан на том, что при изменении фазового состояния металла или сплава меняется его теплосодержание, так как фазовые превращения, согласно принципу Ле-Шателье, происходят либо с выделением, либо с поглощением тепла.

Для определения критических точек металла или сплава термическим методом производится построение кривых охлаждения (или нагрева) в координатах температура — время. Тепловой эффект фазового превращения сказывается на скорости изменения температуры системы, в результате чего на кривой охлаждения появляется точка перелома, соответствующая критической точке материала. Превращение может происходить как при постоянной температуре (тогда на кривой охлаждения имеется площадка), так и в интервале температур (тогда на кривой охлаждения имеются две точки перелома: точка начала и точка конца превращения).

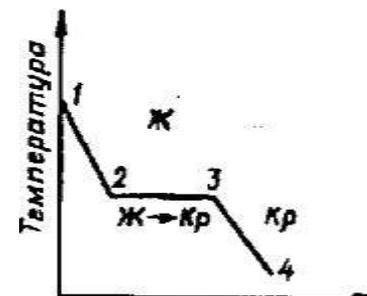
Для объяснения вида кривых охлаждения и нагревания пользуются правилом фаз Гиббса. Правило фаз дает

количественную связь между числом степеней свободы системы ( $C$ ), количеством фаз ( $\Phi$ ) и компонентов ( $K$ ) и выражается уравнением  $C = K - \Phi + 2$ .

Если принять, что фазовые превращения происходят при постоянном давлении, то правило фаз принимает следующий вид:  $C = K - \Phi + 1$ . Если  $C = 0$ , то фазовое превращение происходит при постоянной температуре, а если  $C = 1$ , — в интервале температур. На рис. 2 представлена кривая охлаждения чистого металла.

Участок 1 — 2 соответствует охлаждению жидкого металла

(на рис. 2, Ж — жидкий металл, Кр — кристаллический, твердый металл). В точке 2 начинается процесс кристаллизации, т.е. переход из жидкого в твердое состояние. Изменение фазового состояния металла приводит к появлению на кривой охлаждения точки перелома. Решая уравнение правила фаз для кристаллизации чистого металла, получаем  $C = 0$ , т.е. процесс



кристаллизации в чистом металле происходит при постоянной температуре.

В точке 3 кристаллизация заканчивается, металл полностью переходит в твердое состояние. На кривой охлаждения снова появляется точка перелома.

Точкам перелома 2 и 3 на кривой охлаждения соответствует температура кристаллизации металла, являющаяся его критической точкой. На участке 3—4 происходит охлаждение затвердевшего металла.

### Контрольные вопросы

1. Какие фазы образуются в железоуглеродистых сплавах?
2. Что такое феррит, аустенит, цементит, графит, ледебурит, перлит?
3. Какие сплавы называют техническим железом?
4. Что такое сталь?
5. Опишите доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные стали?
6. Что такое чугун?
7. Опишите доэвтектические, эвтектические и заэвтектические чугуны?
8. Какой основной химический элемент является обязательным компонентом в сталях и чугунах? Какова его массовая доля?

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

### Тема 3.2 Диаграммы состояния сплавов двухкомпонентных систем

#### Практическая работа №2. Построение диаграмм состояния сплавов с использованием метода термического анализа

Цель: -изучение методики проведения термического анализа;

-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

Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

-обобщать, систематизировать, углублять, закреплять, детализировать

полученные теоретические знания

-формировать умения применять полученные знания на практике

Материальное обеспечение:

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Электронные плакаты Диаграмм состояния.

Задание:

1. Изучите теоретический материал по построению Диаграммы состояния в координатах: температура – концентрация и составьте опорный конспект;
2. Постройте Диаграмму состояния А-В, где А 30%, В-70%;
3. Изучите теоретические сведения по теме – «Диаграммы состояния 1 типа - для случая нерастворимости в твердом состоянии» и составьте опорный конспект;  
3.1 Постройте кривые охлаждения Pb-Sb, где:  
а — 5% Sb, б – 10% Sb; в — 13% Sb; г — 20% Sb; д — 40% Sb; е — 80% Sb;  
3.2 Вычертите Диаграмму состояния Pb-Sb, укажите линии Ликвидуса и Солидуса, эвтектику, укажите критические точки;  
3.3 Проанализируйте диаграмму состояния Pb-Sb по алгоритму:  
3.3 Определить количество твердой и жидкой части сплава Pb-Sb, где Pb-60%, Sb-40% при  $T=3950$
4. Изучите теоретические сведения по теме «Диаграмма состояния 2 типа – неограниченной растворимости компонентов в твердом виде»
5. Изучите теоретические сведения по теме «Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонента в твердом состоянии»
6. Изучите теоретические сведения по теме «Диаграмма состояния сплавов для случая образования между компонентами химического соединения»
7. Сделайте вывод о проделанной работе.

Краткие теоретические сведения

Термический анализ является одним из методов определения температур фазовых превращений вещества, сопровождающихся тепловыми эффектами.

Метод основан на построении кривых охлаждения (нагрева) в координатах «температура вещества – время охлаждения (нагрева)». Если при охлаждении (нагревании) в веществе не происходят фазовые превращения, то кривая охлаждения имеет вид плавной нисходящей линии. При фазовых превращениях на кривой появляются горизонтальные (изотермические) участки или изгибы, обусловленные выделением (поглощением) тепла, вызывающем изменение скорости охлаждения (нагрева).

Процесс кристаллизации металлических сплавов и некоторые закономерности в их строении описываются с помощью диаграмм состояния или диаграмм фазового равновесия. Эти диаграммы в графической форме показывают фазовый состав и структуру в зависимости от температуры и концентрации. Они построены для условий равновесия. Равновесное состояние соответствует минимуму свободной энергии и в связи с этим является стабильным. При данных температуре и давлении в условиях равновесия свободная энергия должна оставаться постоянной.

Прежде чем перейти к рассмотрению диаграмм состояния, дадим точные определения основным понятиям, которыми придется оперировать.

Фаза – это однородная часть системы, отделенная от других частей системы (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав, структура и свойства вещества изменяются скачком.

Однородная жидкость является однофазной системой, смесь жидкости и твердого вещества – двухфазной, твердый раствор – однофазной, механическая смесь двух твердых растворов – двухфазной.

Компонентами называются вещества, образующие систему. Чистый металл – это однокомпонентная система, сплав двух металлов — двухкомпонентная.

## 1. Диаграммы состояния.

К внешним факторам, влияющим на состояние сплава, относятся температура и давление, к внутренним – концентрация

Диаграммы состояния характеризуют процессы затвердевания и структурного изменения различных систем сплавов и дают наглядное представление о структуре любого сплава данной системы. Имея диаграмму состояния сплавов данных компонентов, можно заранее судить о свойствах всех сплавов данной системы. Диаграмма состояния позволяет научно подойти к выбору режимов горячей и термической обработки сплавов.

Диаграмма состояния строится в координатных осях, по которым откладывают температуру (в градусах Цельсия) и массовую долю компонентов (от 100 % одного до 100 % другого- концентрация) –рис.1.

Для сплавов, состоящих из двух компонентов А и В, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100%.

Крайние точки А и В соответствуют 100% чистых компонентов.

Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава.

Так, например, точка С соответствует сплаву, состоящему из 20% В и 80% А,

точка D соответствует сплаву, состоящему из 60% В и 40% А.

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготавливают серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа (так же, как для чистых металлов).

Линии на диаграмме являются геометрическим местом критических температур, под которыми понимаются температуры фазовых превращений. Для их определения строят кривые охлаждения для сплавов различного состава и по остановкам и перегибам на этих кривых определяют температуры превращений – критические точки. Для их определения строят кривые охлаждения для сплавов различного состава и по остановкам и перегибам на этих кривых определяют температуры превращений – критические точки. Критические точки каждого сплава наносят на сетку в координатах температура концентрация

Схема установки для термического анализа приведена на рисунке 2.

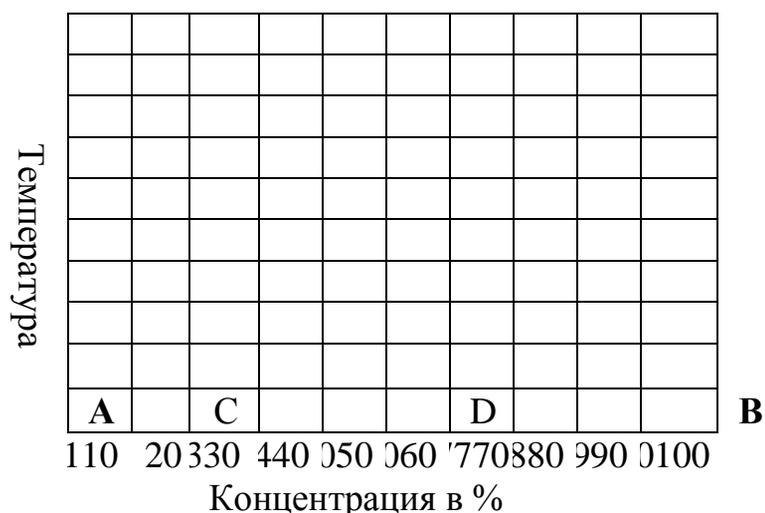


Рис.1 Диаграмма состояния

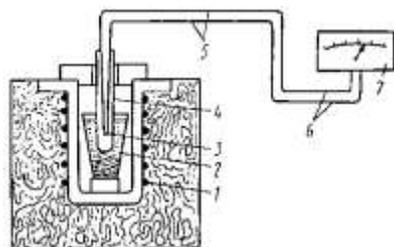


Рис.2 Схема установки для исследования процесса кристаллизации сплавов методом термического анализа

В печь 1 помещают тигель 2 с исследуемым сплавом. Сплав расплавляют и опускают в него горячий спай термопары 3, защищенной фарфоровым или кварцевым чехлом 4. Печь выключают, и начинается

охлаждение сплава. К холодным концам 5 термопары протекает электрический ток, возникающий из-за разности потенциалов в горячем спае. Ток по проводам 6 идет к гальванометру 7, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия. Сила тока в термопаре пропорциональна температуре сплава. Через определенные короткие равные отрезки времени фиксируют температуру и записывают в таблицу. После полного охлаждения сплава строят график «температура – время» (кривая охлаждения).

## 2. Диаграммы состояния I типа – для случая нерастворимости в твердом состоянии

Диаграммы состояния I типа характеризуют системы, компоненты которых в жидком состоянии полностью взаимно растворяются, а в твердом состоянии образуют механическую смесь кристаллов обоих компонентов (элементы, входящие в состав не растворяются друг в друге в твердом состоянии).

Построение диаграммы состояния I типа разберем на примере системы сплавов свинец — сурьма (Pb—Sb).

Чтобы не делать наблюдений над всеми составами сплавов, ограничимся анализом лишь шести сплавов данной системы с содержанием сурьмы 5, 10, 13, 20, 40 и 80%.

Если нагреть каждый из этих сплавов до полного расплавления и с помощью пирометра и счетчика времени зафиксировать процесс их охлаждения, то по полученным данным можно построить кривые, приведенные на рис. 3.

Перегибы и горизонтальные участки кривых – характеризуют замедление или остановки падения температуры сплавов при равномерном охлаждении и показывают наличие критических точек при данных температурах.

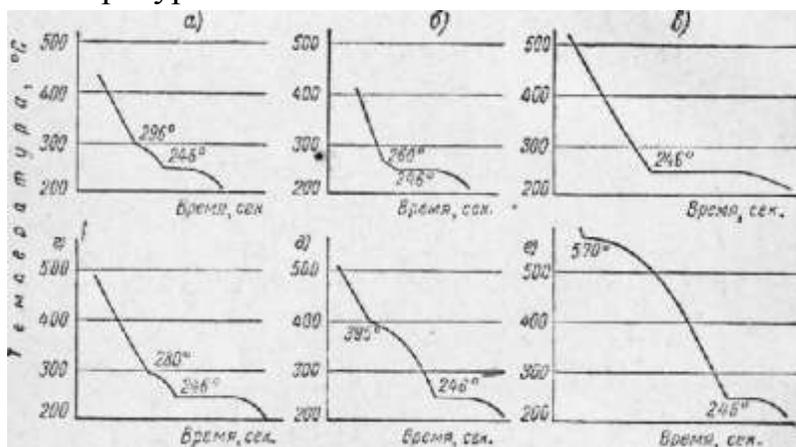


Рис 3. Кривые охлаждения Pb-Sb, где:

а — 5% Sb, б – 10% Sb; в — 13% Sb; г — 20% Sb; д — 40% Sb; е — 80% Sb

Верхние критические точки соответствуют началу перехода сплавов из жидкого состояния в твердое, нижние — окончательному затвердеванию.

Для построения диаграммы состояния сплавов отметим в масштабе:

- по горизонтали – точки взятых нами сплавов, принимая, что слева будет чистый свинец, а справа — чистая сурьма (рис. 25).

- по вертикали разметим шкалу температуры и отложим критические температуры указанных сплавов.

Свинец имеет температуру плавления  $327^{\circ}$ , сурьма  $630^{\circ}$ .

Соединяя нижние критические точки, получим прямую DE, а соединяя верхние точки — две кривые AB и BC, сходящиеся в точке B с прямой DE.

Построенная диаграмма показывает:

- начало затвердевания различных сплавов системы происходит при различных температурах,
- окончание затвердевания — при одной определенной температуре для всей данной системы сплавов,
- один сплав (13% Sb) имеет, как и чистые металлы, только одну критическую точку B, в которой происходит его полное затвердевание.

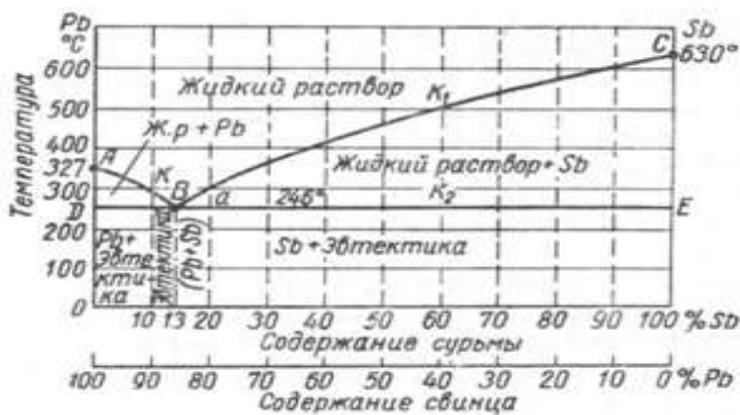
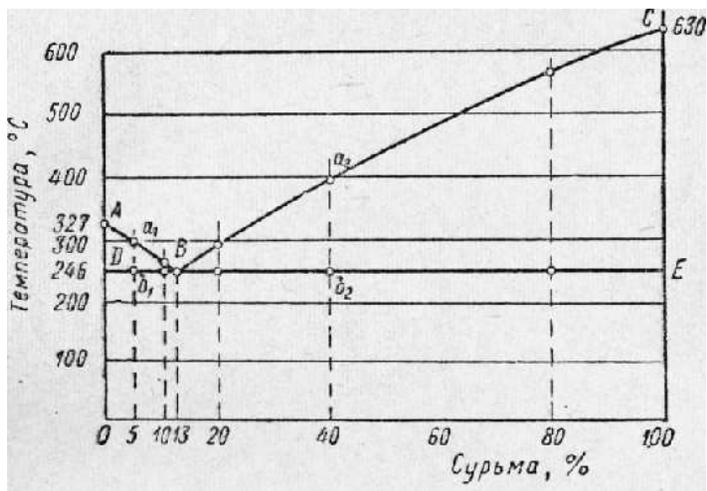


Рис.4 Диаграмма состояния Pb-Sb

Выше линии ABC все сплавы находятся в жидком состоянии (Рис.4). Линия ABC называется линией ликвидуса (ликвидус-лат. –жидкий).

Ниже линии DBE все сплавы находятся в твердом состоянии. Линия DBE называется линией солидус (солидус-лат.твердый).

Проследим процесс кристаллизации сплавов.

В точке В при содержании 13% Sb, 87% Pb и при температуре 2460 кристаллизация свинца и сурьмы происходит одновременно – образуется тонкая механическая смесь кристаллов свинца и сурьмы (двух фаз). Эта смесь называется эвтектикой, а сплав соответствующего состава — эвтектическим (рис.5).

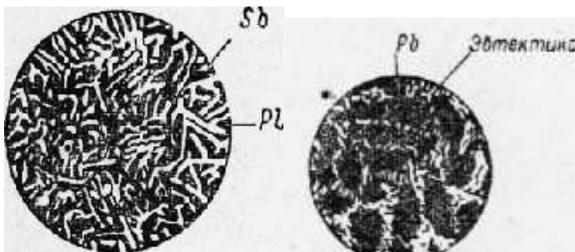


Рис.5 Механическая смесь Pb-Sb

Сплавы, содержащие меньше 13% Sb, называются доэвтектическими, а содержащие больше 13% Sb — заэвтектическими.

Общее по диаграмме сплавов свинец — сурьма, отметим следующее:

- а) по линии АВ диаграммы начинается выпадение кристаллов свинца;
- б) в области диаграммы ABD находятся кристаллы свинца и жидкий раствор, концентрация которого около линии BD приближается к эвтектической;
- в) по линии BD затвердевает весь оставшийся маточный раствор эвтектического состава;
- г) ниже линии BD находятся твердые доэвтектические сплавы, состоящие из кристаллов свинца и эвтектики;
- д) по линии BC начинается выпадение кристаллов сурьмы;
- е) в области диаграммы CBE находятся кристаллы сурьмы и жидкий раствор, концентрация которого около линии BE приближается к эвтектической;
- ж) по линии BE затвердевает весь оставшийся маточный раствор эвтектического состава;

з) ниже линии BE находятся твердые заэвтектические сплавы, состоящие из кристаллов сурьмы и эвтектики.

Доэвтектический сплав, содержащий 5% Sb, выше первой критической точки a1 находится в жидком состоянии. При охлаждении в точке a1 из жидкого раствора выпадают центры кристаллизации (центрами кристаллизации называют мельчайшие частицы, зарождающиеся в жидком растворе или твердом металле) чистого свинца, так как свинец в этом сплаве находится в количестве избыточном по сравнению с эвтектическим составом.

При дальнейшем охлаждении между точками a1 и b1 продолжается рост имеющихся кристаллов свинца и выпадение новых, поэтому количество свинца в жидком (маточном) растворе постепенно уменьшается, и около точки b1 маточный раствор имеет эвтектический состав. В точке b1 при температуре 246° происходит кристаллизация всего оставшегося маточного раствора эвтектического состава.

Ниже точки b1 сплав находится в твердом состоянии и представляет смесь кристаллов избыточного свинца и эвтектики.

Аналогично идет процесс кристаллизации заэвтектических сплавов

Правило отрезков (рычага).

Пользуясь диаграммой состояния можно определить количество эвтектики в сплаве, а также жидкого раствора и его концентрацию в любой момент затвердевания сплава, т.е. можно определить составляющие сплава не только качественно, но и количественно (Рис.4).

Для количественных определений пользуются правилом отрезков.

По этому правилу- количество данной составляющей = отношению отрезка, прилегающего к противоположной составляющей, ко всему отрезку.

Рассмотрим пример (рис 4):

Определить количество твердой и жидкой части сплава Pb-Sb, где Pb-20%, Sb-80% при T=2800.

1. Состав жидкой части сплава при данной температуре определяется точкой К (20%Sb).
2. Сплав состоит из кристаллов Sb (количественно обозначим Qt) и жидкой части сплава (количественно обозначим Qж).
3. Линия сплава I – I делит горизонтальную линию KM длиной 80 единиц (от 20 до 100) на отрезок КЛ длиной 60 единиц(от 20 до 80) и LM длиной 20 единиц (от 80 до 100).

По правилу отрезков:

$$Q_t = \frac{KL}{KM} * 100\% = \frac{60}{80} * 100\% = 75\% \text{- кристаллов сурьмы.}$$

$$Q_{ж} = \frac{LM}{KM} * 100\% = \frac{20}{80} * 100\% = 25\% \text{- жидкого состава.}$$

Т.е. этот сплав при 280 градусах будет состоять из 75% кристаллов сурьмы и 25% жидкого сплава.

Соотношение жидкой и твердой фаз в любой точке отрезка (при любой температуре затвердевания сплава) определяется плечами горизонтального рычага, проведенного через данную точку.

2 Диаграмма состояния 2 типа – неограниченной растворимости компонентов в твердом виде

Диаграммы состояния II типа характеризуют системы, компоненты которых взаимно полностью растворяются как в жидком, так и в твердом состоянии. Примером этого может служить система сплавов медь — никель (Cu — Ni).

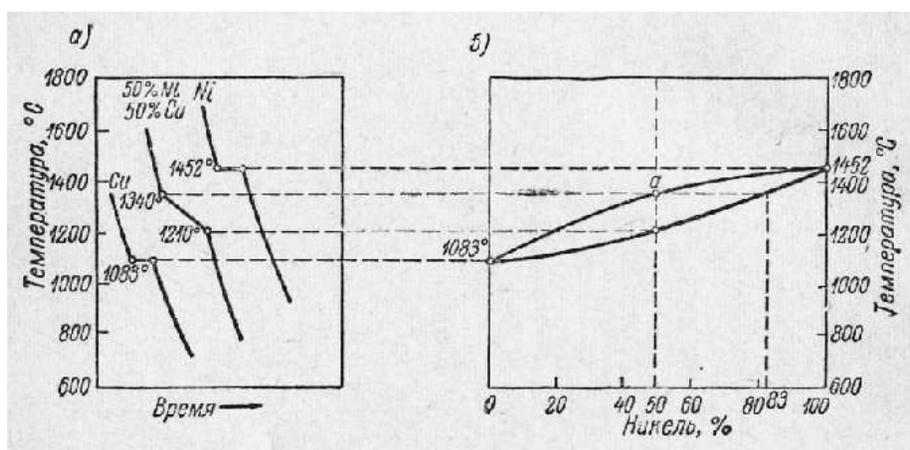


Рис. 6 Диаграмма состояния сплавов Медь-Никель(Cu-Ni)

Кристаллизация при постоянной температуре наблюдается только у чистых металлов, а сплавы кристаллизуются в интервале температур между ликвусом и солидусом.

Для различных сплавов начало и окончание затвердевания происходит при различных температурах.

Проследим процесс затвердевания на примере сплава, содержащего 50% Cu (рис.6).

Выше точки а сплав находится в жидком состоянии. При охлаждении в точке а из жидкого раствора начинают выделяться кристаллы в виде твердого раствора меди в никеле, причем концентрация этого первоначального твердого раствора отличается от исходной повышенным содержанием высокоплавкого компонента (Ni) и может быть приблизительно определена, если из точки а провести горизонталь до пересечения с линией солидуса. В нашем примере концентрация никеля в центрах кристаллизации достигнет 83%. При дальнейшем охлаждении кристаллы твердого раствора растут неоднородными за счет жидкой фазы, непрерывно обедняющейся никелем.

При медленном охлаждении в каждый момент кристаллизации, состав самих кристаллов выравнивается за счет диффузии.

Если же охлаждение в процессе кристаллизации происходит быстро, состав внутри кристаллов не успевает выравняться и внутренние части каждого кристалла содержат больше тугоплавкого компонента (никеля), чем внешние.

Это явление называется внутрикристаллической ликвацией.

Таким образом, ликвацией называют неоднородность химического состава сплавов, возникающую при кристаллизации.

Внутрикристаллическая ликвация может быть уничтожена отжигом, и тогда сплав — твердый раствор будет всюду иметь исходную концентрацию никеля (50%).

Следовательно, сплавы — твердые растворы в отличие от сплавов — смесей являются однофазными.

Взаимная растворимость компонентов в твердом состоянии определяется:

- 1) близостью их расположения в периодической системе Менделеева (т. е. сходностью строения электронных оболочек их атомов);
- 2) близостью атомных диаметров;
- 3) подобием формы кристаллических решеток;
- 4) близостью температуры плавления компонентов.

При уменьшении сродства компонентов по одному или нескольким из этих признаков образуются системы сплавов с ограниченной взаимной растворимостью.

3. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Характерной особенностью такой диаграммы является наличие при температурах ниже линии солидуса (т.е. для твердого состояния) линии (или линий) ограниченной растворимости

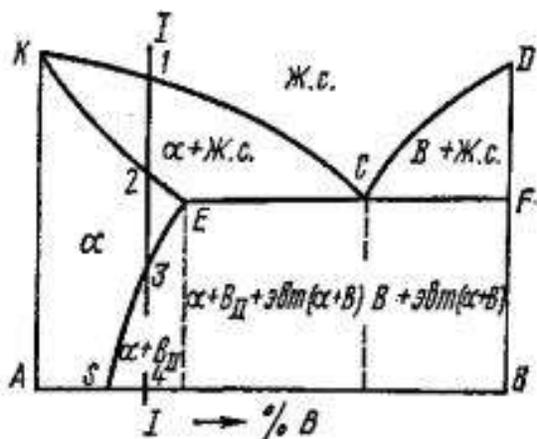


Рис.7. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонента в твердом состоянии

1. На этой диаграмме верхняя линия KCD – линия ликвидуса, показывающая температуры плавления сплавов;
  2. Линия KECF – линия солидуса, показывающая температуры затвердевания сплавов.
  3. Ниже линии KECF все сплавы, состоящие из компонентов А и В находятся полностью в твердом состоянии.
  4. Линия SE показывает изменение растворимости с понижением температуры компонента В в компоненте А в твердом состоянии. (с понижением температуры растворимость уменьшается).
  5. При кристаллизации сплава, состав которого левее точки S, при любой температуре все количество компонента В находится в твердом растворе.
  6. Другой характер имеет кристаллизация и структура сплавов, состав которых находится правее точки S, т. Е. за пределом растворимости.
  7. Рассмотрим для примера процессы, происходящие при охлаждении, например, сплава I – I
  8. Выше температуры точки  $t_1$  сплав жидкий.
  9. Ниже температуре точки  $t_1$  – начинается кристаллизация и до температуры точки  $t_2$  образуются кристаллы твердого раствора В в А (обозначим их  $\alpha$ ).
  10. В точке 2 сплав имеет структуру кристаллов  $\alpha$
  11. При охлаждении до температуры  $t_3$  (от точки 2 до точки 3) происходит охлаждение сплава без изменения его структуры.
  12. При температуре точки 3 линия I-I сплава пересекает линию SE предельной растворимости компонента В в А.
  13. Ниже этой температуры (ниже точки 3) растворимость становится все меньшей и меньшей. Все количество компонента В уже не может находиться в растворе. Часть компонента В выходит из раствора и образует отдельные кристаллы компонента В, называемые вторичными (ВII).
- Вывод: Таким образом, после полного охлаждения сплав имеет структуру, состоящую из твердого раствора а и вторичных кристаллов компонента В (ВII).
- Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется вторичной кристаллизацией, в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве {первичная кристаллизация}.

14. В сплавах, лежащих по составу правее точки E, т. Е. на линии ECF, образуется эвтектика. Особенность этой эвтектики в том, что она представляет смесь не кристаллов А и В, а кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и кристаллов компонента В.

4 Диаграмма состояния сплавов для случая образования компонентами химического соединения  
Химическое соединение обозначают  $A_mB_n$ .

Это означает, что в данном соединении на  $m$  атомов компонента А приходится  $n$  атомов компонента В.

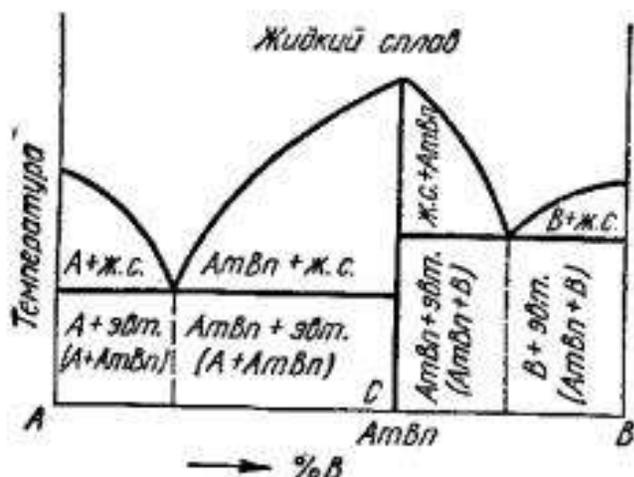


Рис.8 Диаграмма состояния сплавов для случая образования между компонентами химического соединения

Состав химического соединения является постоянным, т. е. при нагреве и охлаждении не изменяется. Диаграмма состояния сплавов для случая образования между компонентами химического соединения имеет вид, показанный на рис.8.

1. Диаграмма как бы составлена из двух диаграмм, когда образуется механическая смесь.
2. В сплавах левее точки С (соответствующей по составу химическому соединению  $AmBn$ ) имеется компонента А больше, чем входит в химическое соединение.
3. Следовательно, в этих сплавах левее точки С образуется механическая смесь  $AmBn + A$
4. В сплавах правее точки С компонента В больше, чем может входить в химическое соединение.
5. Следовательно, в этих сплавах образуется механическая смесь  $AmBn+B$

ВЫВОД:

6. В левой части диаграммы образуется ЭВТЕКТИКА, состоящая из кристаллов А и химического соединения  $AmBn$ , а в правой – ЭВТЕКТИКА, состоящая из кристаллов В и химического соединения  $AmBn$ .

Порядок выполнения работы:

1. Изучите теоретический материал по построению Диаграммы состояния в координатах: температура – концентрация и составьте опорный конспект;
2. Постройте Диаграмму состояния А-В, где А 30%, В-70%;
3. Изучите теоретические сведения по теме – «Диаграммы состояния 1 типа - для случая нерастворимости в твердом состоянии» и составьте опорный конспект;
  - 3.1 Постройте кривые охлаждения Pb-Sb, где:
    - а — 5% Sb; б – 10% Sb; в — 13% Sb; г — 20% Sb; д — 40% Sb; е — 80% Sb;
  - 3.2 Вычертите Диаграмму состояния Pb-Sb, укажите линии Ликвидуса и Солидуса, эвтектику, укажите критические точки;
  - 3.3 Проанализируйте диаграмму состояния Pb-Sb по алгоритму:
    - Выделить линию солидус.
    - Под наклонным участком линии солидус находится одна фаза - твердый раствор.
    - Под горизонтальной прямой линии солидус находится механическая смесь фаз, состав этой смеси на «боковых стенках», ограничивающих эту область
    - Если имеется эвтектика, необходимо из т. э опустить перпендикуляр и указать состав эвтектики (ее состав находится на концах прямой эвтектического превращения).
    - Если имеется линия понижения растворимости, то необходимо из ее вершины опустить перпендикуляр и указать состав выделяющейся вторичной фазы. Состав выделяющейся вторичной фазы находится на противоположном конце прямой эвтектического (эвтектоидного) превращения
- 3.3 Определить количество твердой и жидкой части сплава Pb-Sb, где Pb-60%, Sb-40% при  $T=3950$

8. Изучите теоретические сведения по теме «**Диаграмма состояния 2 типа – неограниченной растворимости компонентов в твердом виде**»
- Вычертите Диаграмму состояния Cu-Ni и проанализируйте диаграмму.
  - Проведите фазовый анализ всех областей и определить количественное соотношение и состав фаз при заданной температуре (температура задается преподавателем).
  - Опишите все изотермические превращения в данной диаграмме.
  - Во всех областях диаграммы укажите структуры, образующиеся в сплавах данной системы в состоянии равновесия.
9. Изучите теоретические сведения по теме «**Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонента в твердом состоянии**»
- Вычертите Диаграмму состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонента в твердом состоянии
  - Провести фазовый анализ всех областей и определить количественное соотношение и состав фаз при заданной температуре
  - Описать все изотермические превращения в данной диаграмме.
  - Во всех областях диаграммы указать структуры, образующиеся в сплавах данной системы в состоянии равновесия.
10. Изучите теоретические сведения по теме «**Диаграмма состояния сплавов для случая образования между компонентами химического соединения**»
- Вычертите Диаграмму состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонента в твердом состоянии
  - Провести фазовый анализ всех областей и определить количественное соотношение и состав фаз при заданной температуре
  - Описать все изотермические превращения в данной диаграмме.
  - Во всех областях диаграммы указать структуры, образующиеся в сплавах данной системы в состоянии равновесия
11. Сделайте вывод о проделанной работе.
- Форма представления результата: выполненная работа

Критерии оценки: зачет/незачет

### **Тема 3.2 Диаграммы состояния сплавов двухкомпонентных систем**

#### **Практическая работа №3. Решение задач по диаграммам состояния двухкомпонентных систем**

Цель:

- научиться определять структуру;
- описывать изотермические превращения по диаграммам

Выполнив работу, Вы будете:

уметь:

- обобщать, систематизировать, углублять, закреплять, детализировать полученные теоретические знания
- формировать умения применять полученные знания на практике

Задачи:

1. *Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей твердость 500 НВ. Укажите, как этот режим называется и какая структура при этой обработке получается.*
2. Чем объясняется упрочнение металла при пластической деформации?
3. *Что такое эвтектика? Приведите пример какого-либо сплава, имеющего строение эвтектики.*
4. Какие процессы происходят при горячей пластической деформации и как при этом изменяются строение

и свойства металла?

5. Что такое твердый раствор? Виды твердых растворов. Приведите примеры.

Форма представления результата: выполненная работа

Критерии оценки: зачет/незачет

#### **Тема 4.1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов.**

##### **Практические занятия 4**

#### **Упражнения по теме «Превращение и формирование равновесной структуры сплавов Fe-C»**

**Цель:** изучение структуры и свойств железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии на основе диаграммы состояния железо-углерод (Fe<sub>3</sub>C).

#### **Выполнив работу, Вы будете:**

уметь:

-обобщать, систематизировать, углублять, закреплять, детализировать полученные теоретические знания

-формировать умения применять полученные знания на практике

#### **Материальное обеспечение:**

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Электронные плакаты Диаграмм состояния

#### **Задание:**

1. Изучить диаграмму состояния железо-цементит.
2. Изучить превращение из жидкого состояния в твердое (первичную кристаллизацию).
3. Изучить превращение в твердом виде (вторичную кристаллизацию)
4. Охарактеризовать фазы и структурные составляющие сталей и чугунов в равновесном состоянии.
5. Самостоятельно вычертить диаграмму состояния железо-углерод с указанием структурных составляющих, характерных температурных и критических точек.
6. Дайте характеристику всем линиям и точкам диаграммы железо-углерод
7. Рассмотреть под микроскопом, зарисовать и описать микроструктуру углеродистых сталей и серого чугуна.
8. Построить кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 0,2 % C и 1,2 %C с помощью правила фаз и объяснить какие фазовые превращения протекают в точках перегиба кривой Определить с помощью правила отрезков количественное соотношение фаз заданного сплава с 0,4 %C и 3,4 % C при комнатной температуре.
9. Изучить классификацию железоуглеродистых сплавов по структуре в равновесном состоянии.
10. Оформить отчёт по работе.

#### **Краткие теоретические сведения:**

При весьма медленном охлаждении сплавов железо — углерод происходит выделение графита. Для этого случая на диаграмме, кроме сплошных линий знакомой уже нам системы железо — цементит, нанесены пунктирные линии системы железо — графит, несколько смещенные влево вверх (соответственно изменяется положение критических точек по концентрации и температуре).

Таким образом, получаются **как бы две диаграммы**, наложенные друг на друга, цементитная метастабильная (относительно устойчивого равновесия) и графитная стабильная (абсолютно устойчивого равновесия) –рис.1.

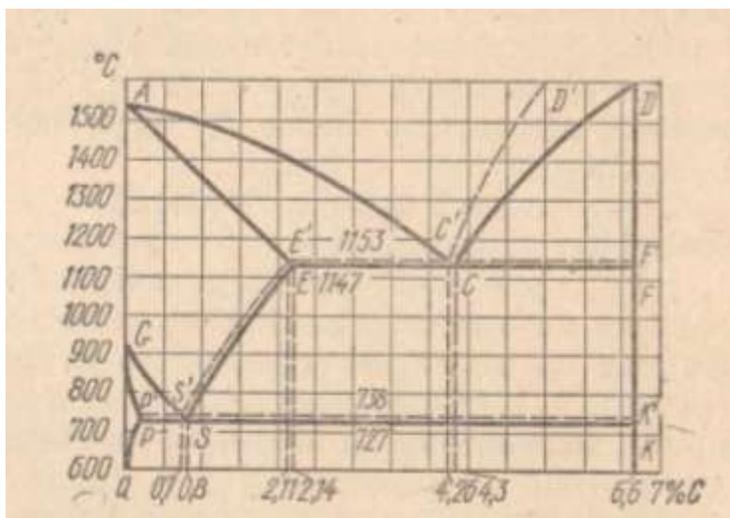


Рис.1 Общий вид современной диаграммы состояния Fe-C

В применяемых сплавах Fe с C содержание C не превышает 5%. Поэтому диаграмму состояния Fe-C рассматривают не полностью от 0 до 100%, а именно до 6,67% C, что соответствует содержанию C в **цементите**. Такую диаграмму обычно называют **железо-цементит (Fe-Fe<sub>3</sub>C)**

Диаграмма состояния Fe -C(в упрощенном виде) приведена на рис. 2

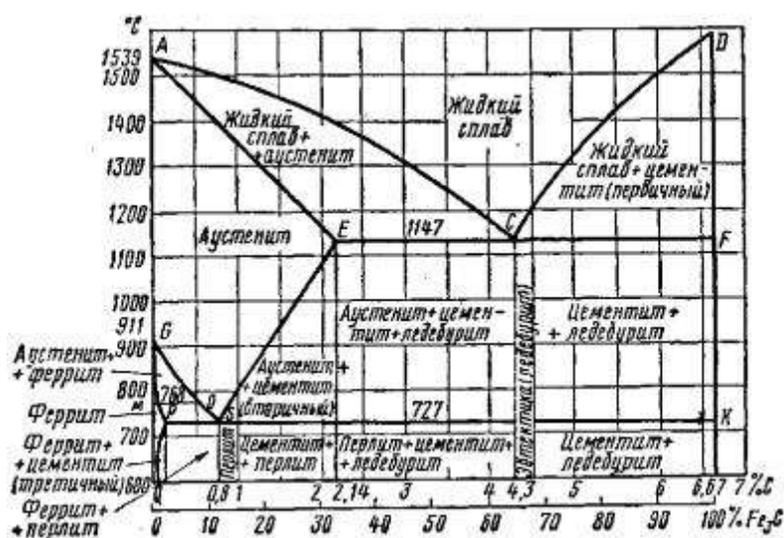


Рис.2 Диаграмма состояния Fe -C(в упрощенном виде)

На этой диаграмме точка A (1539° C) соответствует температуре плавления (затвердевания) **железа**, а точка D (~ 1600° C) - температуре плавления (затвердевания) **цементита**.

Наибольшее количество углерода по диаграмме 6,67% соответствует содержанию углерода в химическом соединении — цементите. Следовательно, компонентами, составляющими сплавы этой системы, будут являться, с одной стороны, чистое железо (Fe), с другой — цементит (Fe<sub>3</sub>C).

### Характеристика компонентов и фаз

Компонентами в рассматриваемой системе является железо ( Fe) и углерод (C)/

**Железо** является полиморфным металлом, т.е. может существовать в нескольких полиморфных формах, различающихся кристаллическими решетками.

На рис. 3приведены кривые охлаждения и нагревания чистого железа.

Железо плавится при температуре 1539°. Критические точки превращений железа обозначают буквой А, приписывая букву с — при нагревании и букву г — при охлаждении.

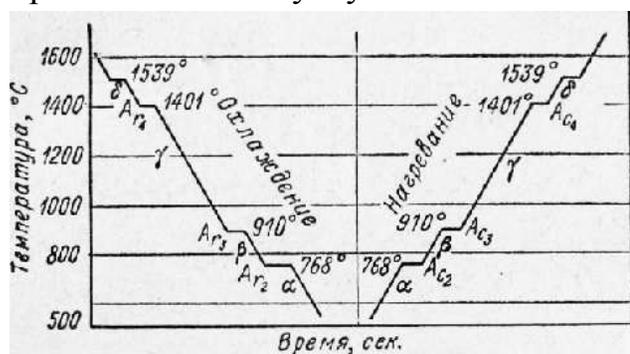


Рис 3. Кривые охлаждения и нагревания чистого железа

В интервале температур 1539-1392°С существует δ-Fe с кубической объемно-центрированной решеткой (ОЦК).

В интервале температур 1392-911<sup>0</sup>С существует  $\gamma$ -Fe с кубической гранцентрированной решеткой (ГЦК) Ниже 911<sup>0</sup>С устойчивой модификацией является  $\alpha$ -Fe с решеткой ОЦК.

При 768<sup>0</sup>С (точка Кюри) происходит магнитное превращение без изменения кристаллической решетки

*Углерод* –также обладает полиформизмом и имеет две кристаллические разновидности - графит и алмаз.

При сплавлении Fe с С кроме жидкой фазы образуются различные твердые фазы. В каждой из модификаций железа может растворяться определенное количество углерода и при этом образуются твердые растворы типа внедрения, которые имеют специальные названия.

*Феррит* - твердый раствор углерода и других элементов в  $\alpha$  -железе.

Феррит имеет низкую твердость и прочность и высокую пластичность. Поэтому технически чистое железо, структура которого представляет зерна феррита, хорошо подвергается холодной деформации, т. е. хорошо штампуются, прокатывается, протягивается в холодном состоянии.

Чем больше феррита в железоуглеродистых сплавах, тем они пластичнее

*Аустенит* - твердый раствор углерода и других элементов в  $\gamma$  –железе. В  $\gamma$  –железе может раствориться углерода в значительно больших количествах до 2,14% при температуре 1147<sup>0</sup> С. Характерная особенность **аустенита** заключается в том, что он в железоуглеродистых сплавах может существовать только при **высоких температурах**. Как и всякий твердый раствор, аустенит имеет микроструктуру, представляющую собой зерна твердого раствора. Аустенит пластичен, поэтому он хорошо подвергается горячей деформации, т.е. хорошо штампуются, куется, прокатывается.

Кроме вышперечисленных твердых растворов в системе Fe-С образуются еще две высокоуглеродистые фазы: графит и цементит.

*Графит*-модификация углерода с гексагональной кристаллической решеткой, низкими прочностными свойствами. Фаза стабильная, состоит почти на 100% из атомов углерода. Температура плавления графита около 3600<sup>0</sup> С.

*Цементит* - **химическое соединение** железа с углеродом **Fe<sub>3</sub>C (карбид железа)**. В цементите 6,67% С, он имеет высокую *твердость*, но чрезвычайно низкую, практически нулевую, *пластичность*. Чем больше цементита в железоуглеродистых сплавах, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают. Цементит неустойчив и при определенных условиях может распадаться, выделяя свободный углерод в виде графита.

*Превращение из жидкого состояния в твердое (первичная кристаллизация).*

*Характеристика линий и точек диаграммы*

1. Линия АСD является линией ликвидуса, показывающая температуры начала затвердевания (конца плавления) сталей и белых чугунов. Линия АЕСF — линией солидуса, показывающая температуры конца затвердевания (начала плавления).
2. Форма этих линий показывает, что перед нами сложная диаграмма, представляющая сочетание диаграммы типа II (от точки А до точки Е) и диаграммы типа I (от точки Е до точки F).  
Выше линии АСD сплавы системы находятся в жидком состоянии (Ж).
3. По линии АС из жидкого раствора начинают выпадать кристаллы твердого раствора углерода в –  $\gamma$ (гамма)железе, называемого аустенитом (А)( по имени У Робертса-Аустена, англ. металлурга).
4. Следовательно, в области АСЕ будет находиться смесь двух фаз — жидкого раствора (Ж) и аустенита (А).
5. По линии СD из жидкого раствора начинают выпадать кристаллы цементита (Ц); в области диаграммы CFD находится смесь двух фаз — жидкого раствора (Ж) и цементита (Ц), называемый первичным цементитом.
6. В точке С при *содержании 4,3% С и температуре 1130<sup>0</sup>* происходит одновременно кристаллизация аустенита и цементита и образуется их тонкая механическая смесь — эвтектика, называемая в этой системе ледебуритом (нем.металлург А.Ледебур).
7. Ледебурит (эвтектика) присутствует во всех сплавах, содержащих от 2,0 до 6,67% углерода. Эти сплавы относятся к группе чугуна.
8. Точка Е соответствует предельному насыщению железа углеродом (2,0%). Сплавы, лежащие левее этой точки, после полного затвердевания представляют один аустенит. Эти сплавы относятся к группе - стали.

*Превращения в твердом состоянии (вторичная кристаллизация).*

1. Линии GSE, PSK и GPQ показывают, что в системе сплавов *в твердом состоянии происходят изменения структуры.*

*Превращения в твердом состоянии происходят вследствие перехода железа из одной модификации в другую, а также в связи с изменением растворимости углерода в железе.*

2. В области диаграммы AGSE находится аустенит (А). При охлаждении сплавов аустенит начинает распадаться с выделением по линии GS феррита (Ф)—твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе, а по линии SE — цементита (Ц). Этот цементит, выпадающий из твердого раствора, называется вторичным в отличие от первичного цементита, выпадающего из жидкого раствора.

3. В области диаграммы GSP находится смесь двух фаз — феррита (Ф) и распадающегося аустенита (А), а в области SEE1 — смесь вторичного цементита и распадающегося аустенита.

4. В точке S при содержании 0,8% (точнее 0,83%) С и при температуре 723° весь аустенит распадается и одновременно кристаллизуется тонкая механическая смесь феррита и цементита — эвтектоид, который в этой системе называется перлитом.

Сталь, содержащая 0,8% С, называется эвтектоидной, менее 0,8% С — доэвтектоидной, от 0,8 до 2,0% С — заэвтектоидной.

5. По линии PSK происходит распад всего аустенита, оставшегося в любом сплаве системы, с образованием перлита; поэтому линия PSK называется линией перлитного (эвтектоидного) превращения.

Сравнивая между собой превращения в точках С и S диаграммы можно отметить следующее:

- выше точки С находится жидкий раствор, выше точки S — твердый раствор — аустенит;
- в точке С сходятся ветви AC и CD, которые указывают начало выделения кристаллов из жидкого раствора (первичной кристаллизации); в точке S сходятся ветви GS и ES, указывающие начало выделения кристаллов из твердого раствора (вторичной кристаллизации);
- в точке С жидкий раствор, содержащий 4,3% С, кристаллизуется с образованием эвтектики — ледебурита; в точке S твердый раствор, содержащий 0,8% С, кристаллизуется с образованием эвтектоида — перлита;
- на уровне точки С лежит прямая EF эвтектического (ледебуритного) превращения, на уровне точки S — прямая PK эвтектоидного перлитного превращения.

### **Порядок выполнения работы**

1. Составьте опорный конспект по теоретическим сведениям «диаграмма состояния железо-цементит».
2. Самостоятельно вычертите диаграмму состояния железо-углерод с указанием структурных составляющих, характерных температурных и критических точек.  
Дайте характеристику всем линиям и точкам диаграммы железо-углерод
3. Охарактеризуйте фазы и структурные составляющие сталей и чугунов в равновесном состоянии.
4. Рассмотрите под микроскопом, зарисуйте и опишите микроструктуру углеродистых сталей и серого чугуна.
5. Постройте кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 0,2 %С и 1,2 %С с помощью правила фаз и объясните какие фазовые превращения протекают в точках перегиба кривой
6. Определите с помощью правила отрезков количественное соотношение фаз заданного сплава с 0,4 %С и 3,4 % С при комнатной температуре .
7. Изучите классификацию железоуглеродистых сплавов по структуре в равновесном состоянии.
8. Оформите отчет по работе.

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

### **Тема 4.1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов.**

#### **Практические занятия 5, 6**

**Построение кривых охлаждения (нагрева) и анализ превращений, происходящих в сталях и чугунах.**

**Цель:** Проанализировать превращения, протекающие в сталях и чугунах при охлаждении, выявить закономерности структурообразования в них.

**Выполнив работу, Вы будете:**

уметь:

-обобщать, систематизировать, углублять, закреплять, детализировать

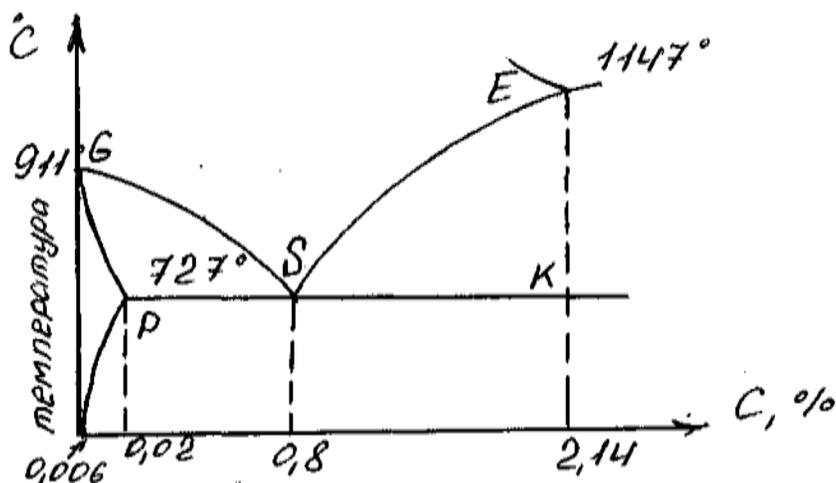
полученные теоретические знания  
-формировать умения применять полученные знания на практике

### Материальное обеспечение:

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Электронные плакаты Диаграммы состояния Fe-C

### Задание:

1. Изучить теоретические сведения к практической работе.
2. Записать определение чугуна и стали.
3. Начертить в масштабе диаграмму железо-цементит и отметить на ней:
  - ✓ сплавы – доэвтектоидную, эвтектоидную и заэвтектоидную стали (содержание углерода для каждого сплава может быть произвольным).
  - ✓ Сплавы- доэвтектический, эвтектический и заэвтектический чугуны



4. Для каждого сплава обозначить критические точки и построить кривую охлаждения в координатах время - температура.
5. На кривой охлаждения указать фазовый состав сплава в разных температурных интервалах.
6. Проанализировать превращения, протекающие в сплавах при охлаждении, и зарисовать схему структуры сплавов после охлаждения.
7. Указать структуру при комнатной температуре доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной стали и температурный интервал в котором при охлаждении образуется каждая структурная составляющая.
8. Указать структуру при комнатной температуре доэвтектического, эвтектического и заэвтектического чугуна и температурный интервал, в котором при охлаждении образуется каждая структурная составляющая.
9. Сделать выводы по работе

### Краткие теоретические сведения:

*Углеродистые стали. Структура и свойства медленно охлажденной стали.*

Для лучшего ознакомления с природой стали проследим процесс охлаждения *эвтектоидной, доэвтектоидной и заэвтектоидной сталей.*

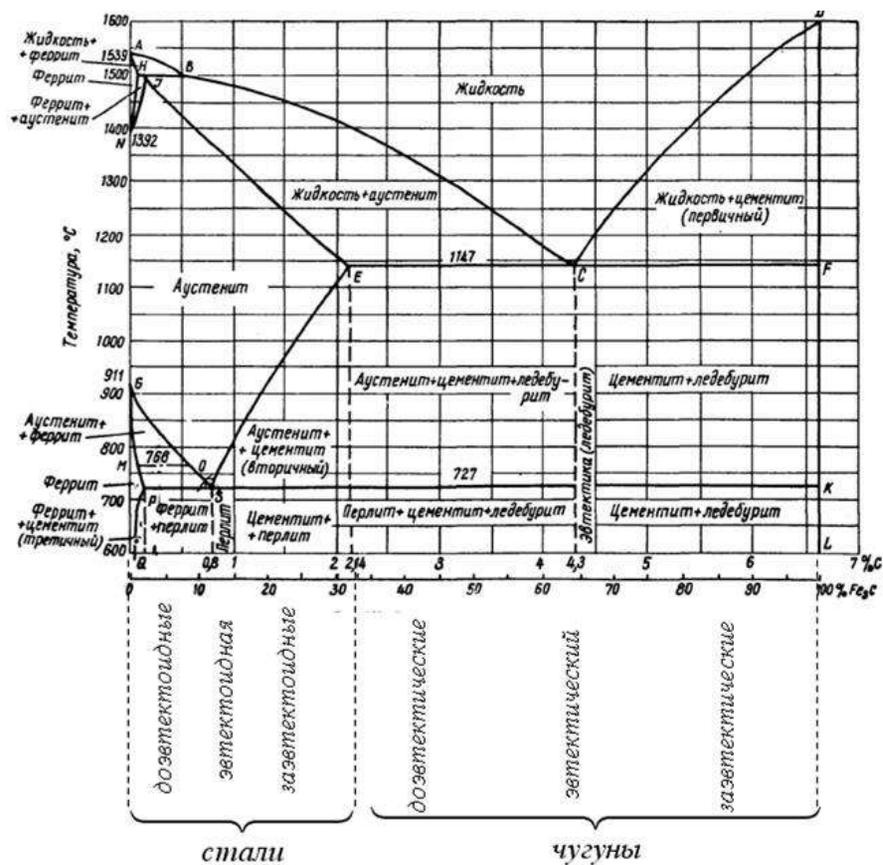


Рис.1 Диаграмма состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C (стали и чугуны)

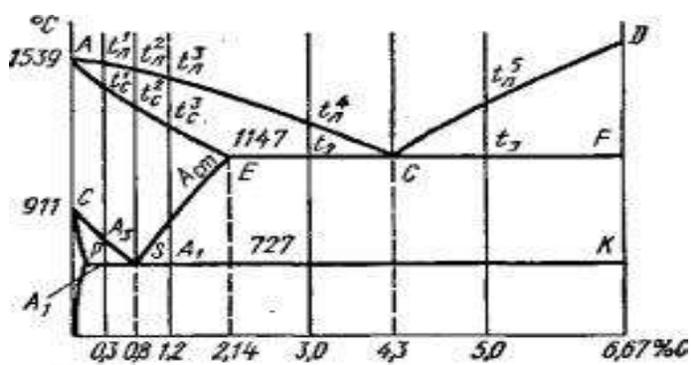


Рис.2 Диаграмма состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C(критические точки )

### 1. Эвтектоидная сталь

Выше точки **a** сплав находится в жидком состоянии. При охлаждении в точке **a** на линии ликвидуса начнут выделяться первые кристаллы **аустенита**, содержащие меньше 0,8% C. Между точками **a** и **b** количество маточного раствора (жидкой фазы) постепенно уменьшается до нуля, а концентрация **углерода** в нем постепенно увеличивается; одновременно растут кристаллы **аустенита**, и около точки **b** (линия солидуса) первичная кристаллизация заканчивается.

В точке **S** однородный аустенит распадается и образуется смесь **цементита и феррита** — **перлит**. На рис. 3 приведена микроструктура перлита при большом увеличении; здесь ясно видно равномерное распределение цементита (темные участки) по светлomu полю феррита. Итак, эвтектоидная сталь по структуре представляет один перлит.

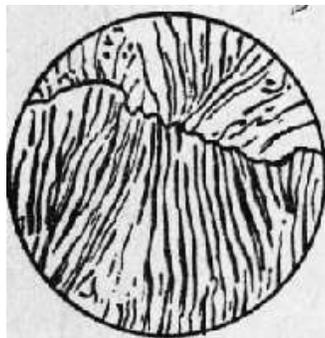


Рис.3. Эвтектоидная сталь

## 2. Дозэвтектоидная сталь (0,3%С)

А) В точках **a<sub>1</sub>** и **b<sub>1</sub>** происходят превращения, аналогичные превращениям эвтектоидной стали в точках а и b.

Б) В точке **c<sub>1</sub>** на линии GOS начинается вторичная кристаллизация стали — выделение **феррита** и аллотропический переход **γ-железа в α-железо**. Температуру превращения сплавов по линии GOS для краткости обозначают через **A<sub>3</sub>**.

В) В точке **d<sub>1</sub>** при температуре 768° происходит магнитное превращение выпавших кристаллов феррита, т. е. **немагнитный феррит становится магнитным**. Критические температуры превращения сплавов по линии **МО** обозначают через **A<sub>2</sub>**.

В связи с выпадением кристаллов **феррита** количество **углерода** в остающемся **аустените** постепенно увеличивается и к точке **e<sub>1</sub>** доходит до эвтектоидного состава (0,8% %).

Концентрация **углерода в аустените** при любой температуре между точками **c<sub>1</sub>** и **e<sub>1</sub>** может быть определена проекцией на линию **GOS**.

Г) В точке **e<sub>1</sub>** выпадение кристаллов **феррита** заканчивается и происходит распадение оставшегося **аустенита** в смесь **феррита и цементита** — **перлит**. Температуру превращения сплавов по линии **PSK** (эвтектоидное превращение) обозначают через **A<sub>1</sub>**.

Д) Ниже точки **A<sub>1</sub>** происходит выделение **цементита из феррита**; этот цементит называют **третичным**. С выделением третичного цементита содержание углерода в феррите постепенно понижается от 0,025% при 723° до 0,006% при 0°.

Таким образом, в структуру доэвтектоидной стали, содержащей более 0,025% углерода, входят **перлит и феррит**, а при содержании меньше 0,025% углерода — **феррит и цементит третичный** (Рис.4)

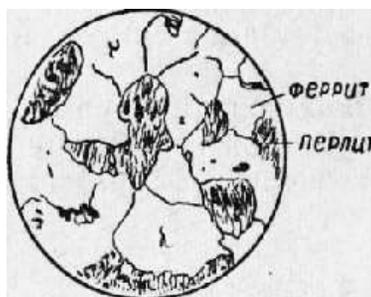


Рис.4 Микроструктура доэвтектоидной стали

## 3. Заэвтектоидная сталь

А) При охлаждении заэвтектоидной стали, например стали с 1,2% углерода (Рис. 33), в точке **c<sub>2</sub>** начинается вторичная кристаллизация **цементита из аустенита**. Температуру превращения по линии **SE** обозначают через **Aст**.

Количество углерода в **аустените** между точками **c<sub>2</sub>** и **e<sub>2</sub>** непрерывно уменьшается, так как кристаллы цементита содержат 6,67% С.

Б) В точке **e<sub>2</sub>** происходит эвтектоидное превращение **аустенита**. Таким образом, в структуру заэвтектоидной стали входят **перлит и цементит вторичный (избыточный)** (Рис.5)

Здесь **цементит** образует тонкую сетку игл на поле **перлита**. Избыточный **цементит** в структуре стали никогда не занимает больших участков, и заэвтектоидная сталь в основном состоит из **перлита**.

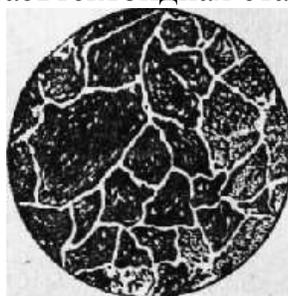


Рис.5 Микроструктура заэвтектоидной стали

Чугуны.

При кристаллизации чугунов – С может выделяться в двух видах:

1. В связанном состоянии в виде цементита  $Fe_3C$ . Излом таких чугунов имеет светлый, блестящий. Поэтому такие чугуны называются **белыми**
2. При весьма медленном охлаждении сплавов железо — углерод происходит выделение углерода в свободном состоянии **в виде графита**. Излом таких чугунов имеет серый цвет. Такие чугуны называют **серыми**.

### **1 Структура белого чугуна.**

Белые чугуны кристаллизуются по диаграмме состояния системы сплавов железо — цементит.

#### **1. Эвтектический чугун:**

А) при охлаждении сплава с содержанием 4,3% С в точке С диаграммы образуется эвтектика **цементита и аустенита — ледебурит**

Б) при охлаждении от Т-ры точки С до Т-ры линии РК **аустенит в ледебурите** будет распадаться с выделением **вторичного цементита**, и концентрация углерода в этом аустените будет уменьшаться от **2,0 до 0,8%** (в соответствии с линией ES)

В) При Т-ре линии РК происходит **перлитное превращение оставшегося аустенита**.

**ВЫВОД:** при температуре ниже точки  $A_{r1}$  ледебурит будет состоять из цементита и перлита.

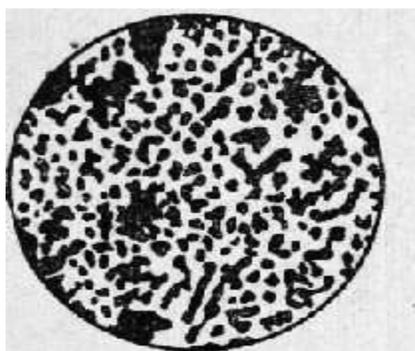


Рис.6 Структура эвтектического чугуна

*Чугуны, содержащие 4,3% С, называются эвтектическими.*

#### **2) В доэвтектическом чугуне (3%) :**

А) При температуре в точке  $a_1$  из жидкого раствора выделяются **кристаллы аустенита**.

Б) Между точками  $a_1$  и  $b_1$  кристаллы **аустенита** растут, а **концентрация углерода в маточном растворе увеличивается до эвтектического состава (4,3%)**.

В) При температуре в точке  $b_1$  происходит затвердевание всего оставшегося раствора с образованием **ледебурита**.

Г) При дальнейшем *охлаждении от* точки  $b_1$  до  $c_1$  происходит **вторичная кристаллизация аустенита, входящего в состав ледебурита**.



Рис. 7 Структура доэвтектического чугуна

**ВЫВОД:** В структуру охлажденного доэвтектического чугуна входит распавшийся известный аустенит и ледебурит

#### **3) При охлаждении заэвтектического чугуна (5% С):**

А) в точке  $a_2$  начинается кристаллизация **цементита**.

Б) Между точками  $a_2$  и  $b_2$  кристаллы **цементита** растут, а концентрация углерода в маточном растворе **уменьшается до эвтектического состава (4,3%)**;

В) в точке  $b_2$  происходит затвердевание всего оставшегося раствора с образованием **ледебурита**.

Г) между точками  $b_2$  и  $c_2$  происходит **вторичная кристаллизация аустенита, входящего в состав ледебурита**

**Вывод: В структуру охлажденного заэвтектического чугуна входят цементит (первичный) и ледебурит.**



Рис. 8 Структура заэвтектического чугуна

Заэвтектические чугуны как технические сплавы применяются редко ввиду их чрезмерной хрупкости.

Значительное количество твердого и хрупкого цементита в составе белых чугунов является причиной того, что эти чугуны трудно поддаются механической обработке. Они применяются для отливки деталей с последующим отжигом на ковкий чугун, а также для отливки прокатных валков и вагонных колес, причем как в валках, так и в колесах белый чугун образуется не во всей толще, а лишь в поверхностном слое; внутри отливки образуется серый чугун

**Пример построения кривой охлаждения для сплава с содержанием углерода  $C=3,8\%$ .**

Заданный сплав с содержанием углерода -  $C = 3,8\%$  - это доэвтектический чугун.

1. Построение кривой охлаждения сплава
2. Превращения в сплаве при медленном охлаждении

**Доэвтектический чугун (3,8 % углерода)** охлаждается до температуры линии ликвидус в жидком состоянии. Первичная кристаллизация начинается на ликвидусе (точка-1) с выделения из жидкости аустенита. При охлаждении в интервале температур точек 1-2 количество аустенита увеличивается и соответствует при температуре точки 2 отрезку 2-С, а концентрация углерода в нем, изменяясь по линии солидус - JE, достигает предельной растворимости, равной 2,14 % (проекция точки E). Одновременно к концу кристаллизации сохраняется некоторое количество жидкости (отрезок E-2), концентрация углерода в которой, изменяясь по линии ликвидус BC, соответствует эвтектическому составу (4,3 % углерода). В результате первичная кристаллизация завершается при температуре точки 2 (1147 °С) эвтектическим превращением; оставшаяся жидкость затвердевает в ледебурит на аустенитной основе (аустенитно-цементитная смесь). После кристаллизации сплав имеет структуру: аустенит и ледебурит на аустенитной основе ( $A + Л_A$ ). При дальнейшем охлаждении в интервале точек 2-3, вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените по линии ES, из аустенита выделяется цементит вторичный; аустенит при этом обедняется углеродом до 0,8 %. При температуре точки 4 (727 °С) аустенит, получивший эвтектоидный химический состав, превращается в перлит. Поскольку это превращение претерпевает и аустенит, входящий в состав ледебурита, то ледебурит на аустенитной основе становится ледебуритом на перлитной основе (перлитно-цементитная смесь). Окончательная структура сплава после охлаждения — перлит, ледебурит на перлитной основе и цементит вторичный ( $П + Лп + Ц_2$ ).

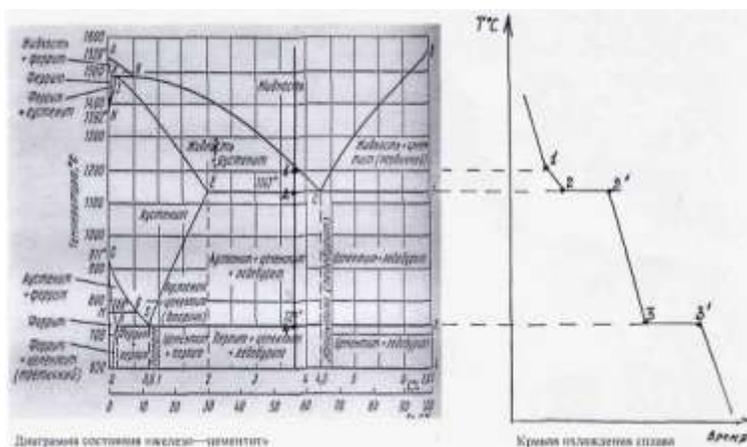


Рис.9 а- Диаграмма состояния «железо-цементит»; в-Кривая охлаждения

**Порядок выполнения работы:**

1. Составить опорный конспект по теоретическим сведениям к практической работе.
2. Записать определение чугуна и стали.
3. Начертить в масштабе диаграмму железо-цементит и отметить на ней:
  - сплавы – доэвтектоидную, эвтектоидную и заэвтектоидную стали: 0,3%С, 0,8%С, 1,2%С.
  - доэвтекктический, эвтекктический и заэвтекктический чугуны: 3%С, 4,3%С, 5%С.
4. Для каждого сплава обозначить критические точки и построить кривую охлаждения в координатах время - температура.
  - 4.1 Определите, какие фазы существуют в системе. ( в сплавах железа и углерода фазы представляют собой аустенит, феррит, цементит и графит)
  - 4.2. Опишите каждую из этих фаз.
  - 4.3 Для построения кривой *охлаждения* воспользуйтесь правилом фаз Гиббса, которое формулируется так: в равновесной системе, на которую влияют только температура и давление, число степеней свободы равняется разнице числа компонентов и числа фаз, увеличенных на 2.
  - 4.4 на оси концентрации диаграммы состояния находим точку, соответствующую составу сплава, и проводим вертикальную линию
  - 4.5 В местах пересечения вертикали с линиями диаграммы отмечаем критические точки a,b, c, e, d (рис.2) и проектируем их на ось температур координатной системы «температура-время».
  - 4.6 При построении схематической кривой следует руководствоваться соображением, что при наличии в системе процессов, сопровождающихся выделением тепла, температура понижается медленнее при одновариантном равновесии или будет температурная остановка при нонвариантном равновесии (с=0). Температура понижается быстрее, если в системе не протекает процессов с выделением тепла.
- 4.4 Сделав вычисления, постройте **кривую охлаждения**.
5. На кривой охлаждения указать фазовый состав сплава в разных температурных интервалах.
6. Проанализировать превращения, протекающие в сплавах при охлаждении, и зарисовать схему структуры сплавов после охлаждения.
7. Указать структуру при комнатной температуре доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной стали и температурный интервал в котором при охлаждении образуется каждая структурная составляющая.
8. Указать структуру при комнатной температуре доэвтекктического, эвтекктического и заэвтекктического чугуна и температурный интервал, в котором при охлаждении образуется каждая структурная составляющая.
9. Сделать выводы по работе

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

### Тема 4.3 Чугуны

#### Практическая работа №7. Микроанализ серых, высокопрочных, ковких чугунов

Цель:- научиться по структуре определять вид чугуна.

Материальное обеспечение:

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Микроскоп
4. Образцы материалов: чугуны

Задание:

- получить навыки определения по микроструктуре вида чугуна (белый, серый, ковкий, высокопрочный),

- оценить приближенно его механические свойства и установить область применения.

- изучить под микроскопом микрошлифы и определить структурные составляющие.

- по структурным составляющим определить наименование чугуна (белый, серый, ковкий, высокопрочный).

-определить увеличение микроскопа. Зарисовать схемы микроструктур.

Теоретические сведения:

По химическому составу чугуны - отличаются от сталей более высоким содержанием углерода (более 2,14%) и постоянных примесей ( S, P, S, Mn).

Чугун обладает более низкими механическими свойствами, чем сталь. Однако его хорошие технологические свойства (литейные, обрабатываемость режущим инструментом, износостойкость, антифрикционные свойства и т. д.) делают чугун пригодным для изготовления различных деталей машин. В зависимости от состояния углерода чугуны подразделяются на две группы: чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита ( $Fe_3C$ ), и чугуны, в которых весь углерод или большая его часть находится в свободном состоянии в виде графита.

К первой группе относятся белые чугуны Их структура зависит от содержания углерода и соответствует диаграмме равновесного состояния железа - цементит. По структуре белые чугуны делятся на следующие. Доэвтектические (2.14.. 4.3% C). Структура включает три составляющие - перлит, ледебурит, вторичный цементит (рис.10). Перлит наблюдается под микроскопом в виде темных зерен, цементит - светлых полос, а ледебурит – в виде участков с темными точками. Каждый такой участок представляет собой смесь мелких округлых или вытянутых темных зерен перлита, равномерно расположенных в белой цементитной основе.

Эвтектический чугун (4,3%С) состоит из ледебурита, представляющего собой равномерную механическую смесь перлита с цементитом (рис.2).

Заэвтектический чугун (4,3...6,7%С) характеризуется двумя структурными составляющими - первичным цементитом (вытянутая форма) и ледебуритом (рис.3).

Характерная особенность структуры белого чугуна - наличие в ней весьма твердых и малопластичных составляющих; цементита и ледебурита.

Получение такой структуры в белых чугунах способствует повышенное содержание в них марганца, пониженное кремния и сравнительно быстрое охлаждение. Белые чугуны очень хрупки и тверды, плохо поддаются обработке режущим инструментом. Поэтому такие чугуны в машиностроении используются редко (дробильные шары, звездочки для очистки литья). Они обычно идут на переделку в сталь и для получения ковкого чугуна.

Ко второй группе чугунов относятся серые, высокопрочные и ковкие чугуны.

Структура их представляет собой металлическую основу, пронизанную графитными включениями. От структуры металлической основы, которая выявляется после травления шлифа (ферритно-перлитная, перлитная или ферритная), зависят такие свойства, как предел прочности при сжатии, твердость, износостойкость. Такие свойства чугуна, как пластичность, сопротивление растяжению и износостойкость, зависят главным образом от формы, размеров, количества и характера расположения графитовых включений Срочность графита по сравнению с металлической основой ничтожна, его присутствие равносильно надрезу - пустоте. Поэтому чем равномернее расположены графитовые включения в металлической основе, чем они мельче и их форма ближе к округлой, тем меньше будет разобщена металлическая основа чугуна и прочностные свойства будут выше. В соответствии с отмеченным качеством чугунов оценивается не только структурой металлической основы, но и формой, размером и характером распределения в ней графитовых включений.

В чугунах встречается три формы графитовых включений: пластинчатая (рис.4), шаровидная (рис.5), хлопьевидная (рис.8).

Пластинчатая (лепестковая) форма графита свойственна серым чугунам.

Такую форму можно рассматривать как трещины (надрезы), создающие концентрацию напряжений в перлитной, ферритно-перлитной металлических основах. Получение серых чугунов способствует медленное охлаждение отливок и наличие в них повышенного содержания кремния и пониженное - марганца. Пластинчатая форма графита резко снижает прочностные свойства чугуна.

Повышение механических свойств серых чугунов достигается модифицированием, т. е. воздействием на процесс графитизации за счет введения в жидкий расплав чугуна особых добавок (модификаторов).

Модификаторами являются ферросилиций, силикокальций, вторичный алюминий. Будучи введенным в жидкий чугун перед его разливкой, модификаторы раскисляют его и образуют в нем тугоплавкие окислы типа  $SiO_2$ ,  $CaO$ , которые, находясь во взвешенном состоянии, служат дополнительными центрами графитизации и способствуют размельчению графита. Из серых чугунов изготавливают блоки цилиндров, картеры, маховики и др. В автотракторостроении и сельскохозяйственном машиностроении часто применяют следующие марки серых чугунов: СЧ18, СЧ20, СЧ25 (немодифицированные) и СЧ30, СЧ35 (модифицированные)

Шаровидная форма графита свойственна высокопрочному чугуну. Его получают двойным модифицированием серого чугуна: добавкой в жидкий чугун незадолго перед заливкой двух модификаторов - ферросилиция для создания большего количества центров графитизации и магния или цезия для получения шаровидной формы графита (рис.5). Структура высокопрочного чугуна состоит из ферритной или перлитно-ферритной металлической основы, в которой располагаются графитовые включения в форме шаров. Такая форма графита не нарушает сплошности металлической основы, и это способствует повышению прочности и пластичности. Высокопрочный чугун – хороший заменитель литой стали и применяется для изготовления коленчатых и распределительных валов, гильз цилиндров автомобильных двигателей. В сельскохозяйственном машиностроении часто применяют высокопрочные чугуны марок ВЧ60-2, ВЧ45-5. Хлопьевидная форма графита (рис.6) присуща ковкому чугуну, который получают специальным графитизирующим отжигом (томлением) белых доэвтектических чугунов, содержащих от 2,2 до 3,2% С.

Такая форма графита способствует повышению пластических свойств – чугун лучше переносит удары, обладает достаточной вязкостью. В зависимости от вида отжига белого чугуна металлическая основа может иметь структуры: при одностадийном отжиге - ферритно-перлитную или перлитную, при двухстадийном - ферритную. Наиболее часто применяют ферритный ковкий чугун, так как он характеризуется высокой (для чугунов) пластичностью.

В автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении применяют ковкие чугуны марок КЧ37-12, КЧ35-10, КЧ50-4. Из них изготавливают картеры редукторов, рулевых механизмов, ступицы колес, педали и др.

**Форма представления результата:** выполненная работа

В работу включить участок диаграммы состояния железо - цементит для чугунов, проанализировать изменение структуры с увеличением содержания углерода.

Описать виды чугунов, их структуру, свойства и применение. Рядом с зарисованными схемами микроструктур указать структурные обставляющие, наименование чугуна, условия и метод получения механических свойств (НВ, ув, д используя справочный материал). Объяснить влияние формы графита на механические свойства чугунов.

**Критерии оценки:** зачет/незачет

## Тема 5.2 Легированные стали Практическая работа №8. Микроанализ легированных сталей

**Цель работы.** Ознакомление с особенностями микроструктуры и основными техническими характеристиками легированных сталей и сплавов различного назначения.

Изучение микроструктуры легированных и конструкционных сталей в нормализованном состоянии и после закалки и отпуска. Изучение влияния термической обработки на механические свойства легированных сталей.

**Задание.**

- 1. Изучить и зарисовать микроструктуру легированной конструкционной стали марок 40ХА, 30ХН3А, 40ХТГ или 30ХГСА в нормализованном и термически обработанном состоянии. Указать, к какому классу по структуре относится исследуемая сталь.
- 2. Зарисовать и описать микроструктуру легированной инструментальной стали марок ХГ, ХВГ, 9ХС или ХВ5 в нормализованном и термически обработанном состояниях.

- 3. Зарисовать и описать микроструктуру быстрорежущей стали Р9 или Р18 после нормализации, закалки и отпуска.
- 
- **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ**
- **Влияние легирующих элементов**
- Простые углеродистые стали далеко не всегда удовлетворяют требованиям техники. В промышленности широко применяются легированные стали, которые обладают высокими механическими или особыми физическими и химическими свойствами, приобретаемыми после соответствующей термической обработки. Легированными называются стали, в которые для получения требуемых свойств специально добавляются определенные количества необходимых элементов.
- Изучая влияние легирующих элементов на свойства стали, важно знать взаимодействие легирующего элемента с железом и углеродом, а также влияние легирующих элементов на полиморфизм железа и превращения в стали при термической обработке.
- При суммарном содержании легирующих элементов до 2 % сталь является *низколегированной*, от 2 до 10 % - *среднелегированной*, более 10 % - *высоколегированной*. В качестве легирующих элементов наибольшее применение получили Cr, Ni, Mo, W, V, Mn, Ti. Сталь может быть легирована одним, двумя, несколькими элементами. Соответственно легированные стали называются хромистой, хромоникелевой и т.д.
- 
- **Влияние элементов на полиморфизм железа**
- Все элементы, которые растворяются в железе, влияют на температурный интервал существования его аллотропических модификаций, т.е. сдвигают точки  $A_3$  и  $A_4$  по температурной шкале.
- Большинство элементов или повышают температуру  $A_4$  и снижают температуру  $A_3$ , расширяя область существования  $\gamma$ -модификации (рис. 11.1а), или понижают  $A_4$  и повышают  $A_3$ , расширяя область существования  $\alpha$ -модификации (рис. 11.1б).
- Из схематических диаграмм состояния железо - легирующий элемент (рис. 11.1) следует, что при содержании марганца, никеля свыше определенного количества (см. размер с) (рис. 11.1а)  $\gamma$ -состояние существует как стабильное от температуры плавления до комнатной температуры. Такие сплавы на основе железа называются аустенитными.

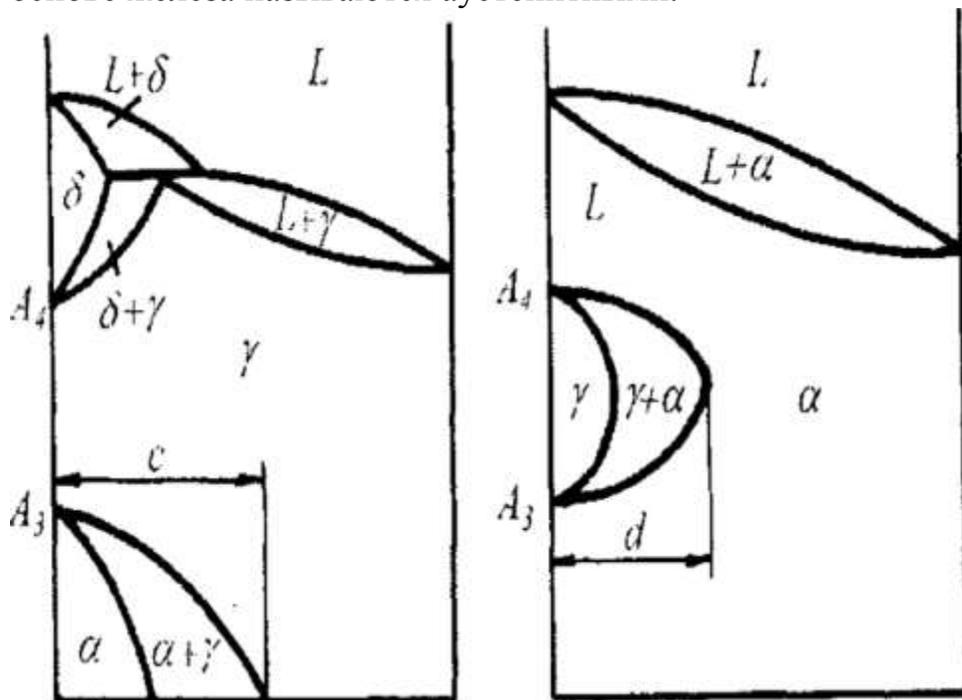


Рис. 11.1. Диаграмма состояния: железо-легирующий

элемент

При содержании ванадия, молибдена, кремния и других элементов свыше определенного значения (см. размер d) устойчивым при всех температурах является  $\alpha$ -состояние (рис. 11.1б). Такие сплавы на основе железа называются ферритными. *Аустенитные и ферритные сплавы не имеют превращений при нагревании и охлаждении.*

### Распределение легирующих элементов в стали

В промышленных легированных сталях легирующие элементы могут

- 1) находиться в свободном состоянии: свинец, серебро, медь (если ее не более 1%) не образуют соединения и не растворяются в железе;
- 2) образовывать интерметаллические соединения (металлиды) с железом или между собой при большом содержании легирующих элементов; встречаются, в основном, в высоколегированных сталях;

Для справки: образование металлидов (М) наблюдается при выделении избыточного компонента из твёрдых растворов или как результат упорядочения в расположении атомов компонентов твёрдых растворов. Состав М. обычно не отвечает формальной валентности их компонентов и может изменяться в значительных пределах. Это объясняется тем, что в М. ионная и водородная связи встречаются редко, а преобладает металлическая связь, т.е. М получают прямым взаимодействием их компонентов при нагревании, путём реакций обменного разложения и т.д.

- 3) образовывать окислы, сульфиды и другие неметаллические включения - элементы, имеющие большее сродство к кислороду, чем железо. В процессе производства стали такие элементы (например, Мп, Si, Al), введенные в последний момент плавки, раскисляют сталь, отнимая кислород у железа. Количество окислов, сульфидов и других неметаллических включений в обычных промышленных сталях невелико и зависит от метода ведения плавки;
- 4) растворяться в цементите или образовывать самостоятельные карбидные фазы. Карбидообразующими элементами могут быть элементы, имеющие большее, чем железо, сродство к углероду (элементы, расположенные в периодической системе элементов левее железа: Ti, М, Cr, Мп, Zr, Nb, Mo, Tc, Hf, Ta, W, Re

Указанные элементы, кроме того, что они образуют карбиды, растворяются в железе. Следовательно, они в известной пропорции распределяются между этими двумя фазами;

5) растворяться в железе - большинство легирующих элементов, кроме С, N, O, В и металлоидов. Элементы, расположенные в периодической системе правее железа (Si, Ni, Co и др.) образуют только растворы с железом и не входят в карбиды.

Таким образом, легирующие элементы преимущественно растворяются в основных фазах железоуглеродистых сплавов - феррите и аустените, а также цементите или образуют специальные карбиды.

### Влияние легирующих элементов на феррит

Растворение легирующих элементов в  $\alpha$ -железе происходит путем замещения атомов железа атомами этих элементов. Атомы легирующих элементов, отличаясь от атомов железа размерами и строением, создают в решетке напряжения, которые вызывают изменение ее периода. Изменение размеров  $\alpha$ -решетки вызывает и изменение свойств феррита.

На рис. 11.2. показаны изменения механических свойств феррита (твердость, ударная вязкость) при растворении в нем различных элементов.

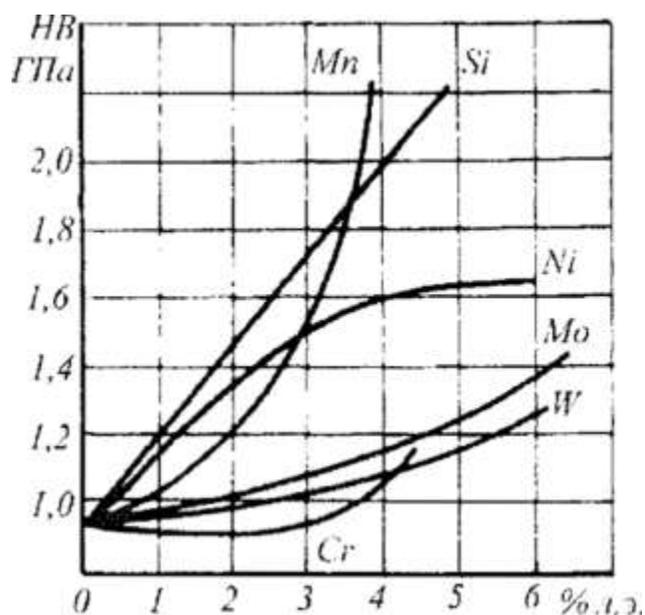
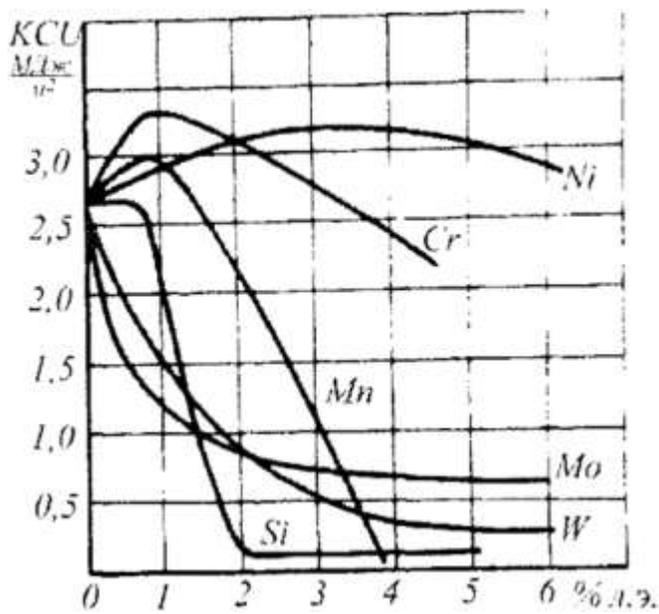


Рис. 11.2. Содержание легирующего элемента, % а - твердость; б - ударная вязкость.



Как видно из диаграмм, хром, молибден, вольфрам упрочняют феррит меньше, чем никель, кремний и марганец. Молибден, вольфрам, марганец и кремний снижают вязкость феррита. Хром уменьшает вязкость значительно слабее перечисленных элементов, а никель не снижает вязкости феррита.

Важное значение имеет влияние элементов на порог хладноломкости, что характеризует склонность стали к хрупкому разрушению. Наличие хрома в железе способствует некоторому повышению порога хладноломкости, тогда как никель интенсивно снижает порог хладноломкости, уменьшая тем самым склонность железа к хрупким разрушениям.

Приведенные данные относятся к медленно охлажденным сплавам.

### Карбидная фаза в легированных сталях

В сталях карбиды образуются только металлами, расположенными в периодической системе элементов левее железа. Эти металлы имеют менее достроенную d-электронную полосу. Чем левее расположен в периодической системе карбидообразующий элемент, тем менее достроена его d-полоса. Вместе с тем, многочисленные опыты показывают, что, чем левее в периодической системе расположен элемент, тем более устойчив карбид.

В процессе карбидообразования углерод отдает свои валентные электроны на заполнение d-электронной полосы атома металла. Только металлы с d-электронной полосой, заполненной меньше, чем у железа, являются карбидообразующими; активность их как карбидообразователей тем сильнее и устойчивость образующихся карбидных фаз тем больше, чем менее достроена d-полоса у металлического атома. Фактически мы встречаемся в сталях лишь с карбидами шести видов:

$M_3C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  - карбиды 1 группы,

$MC$ ,  $M_2C$  - карбиды 2 группы,

где под M подразумевается сумма карбидообразующих элементов.

Карбиды, отнесенные в I группу, имеют сложную кристаллическую структуру. Особенность строения карбидов II группы заключается в том, что они имеют простую кристаллическую решетку и кристаллизуются обычно со значительным дефицитом по углероду. Карбиды II группы трудно растворимы в аустените. Это значит, что при нагреве (даже очень высоком) они могут не перейти в твердый раствор. Карбиды I группы легко растворяются в аустените.

Все карбидные фазы обладают высокой температурой плавления и высокой твердостью. Карбиды II группы в этом отношении превосходят карбиды I группы.

Порядок растворения карбидов в аустените определяется их относительной устойчивостью, а степень перехода в раствор - их количеством.

Для справки: энергия электронов на энергетических уровнях подразделяется по орбиталям: s,p,d,f. Металлы, имеющие частично заполненную орбиталь d при наличии электронов на внешней s- орбитали, называются переходными. К их числу относятся важнейшие конструкционные металлы Fe, Cr, Ti, Mo, Ni и др.

### Влияние легирующих элементов на превращения в стали

Влияние легирующих элементов на кинетику распада аустенита. Кинетика распада аустенита определяет поведение стали при термической обработке. Легирующие элементы, которые только растворяются в феррите или цементите, не образуя специальных карбидов, оказывают лишь количественное влияние на процессы превращения. За исключением Co, который ускоряет превращение, все элементы замедляют его (Mn, Ni и другие).

Карбидообразующие элементы вносят не только количественные, но и качественные изменения в кинетику изотермического превращения. Легирующие элементы при разных температурах по-разному влияют на скорость распада аустенита: 700-500 °C (образование перлита) - замедляют превращение; 500-400 °C - весьма значительно замедляют превращение; 400-300 °C (образование бейнита) - ускоряют превращение.

Таким образом, в сталях, легированных карбидообразующими элементами (O, Mo, W и др.), наблюдаются два максимума скорости изотермического распада аустенита, разделенных областью относительной устойчивости переохлажденного аустенита. Изотермический распад аустенита имеет два явно выраженных *интервала превращений* - превращение в пластинчатые (перлитное превращение) и превращение в игольчатые (бейнитные превращения) структуры. Схематическое изображение диаграммы изотермического распада аустенита приведено на рис. 11.3.

Практически наиболее важной является способность легирующих элементов замедлять скорость распада аустенита в районе перлитного превращения, что выражается в смещении вправо линии на диаграмме изотермического распада аустенита. Это способствует более глубокой прокаливаемости и переохлаждению аустенита до интервала мартенситного превращения при более медленном охлаждении, например, при охлаждении в масле или на воздухе.

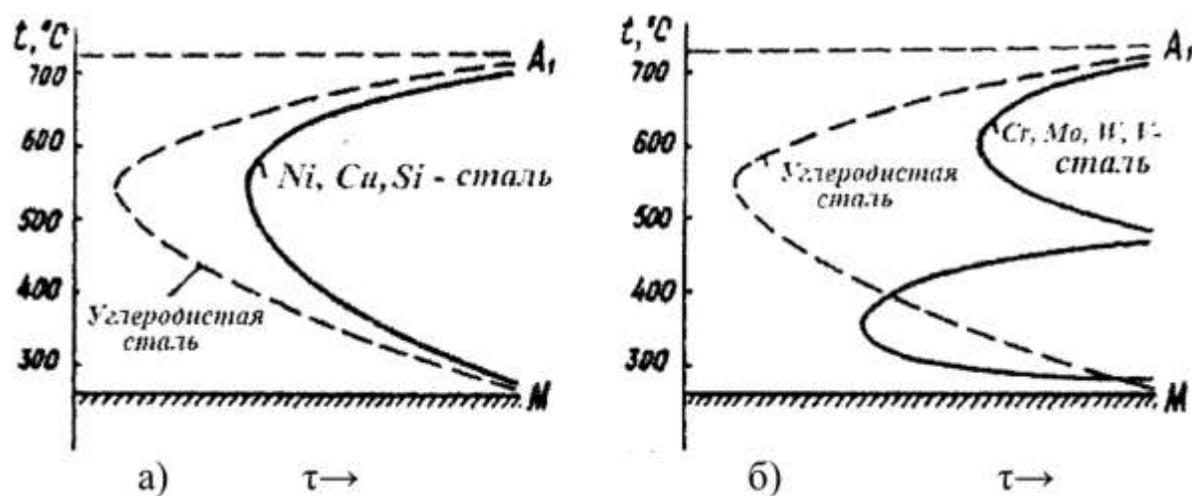


Рис. 11.3. Углеродистая сталь и сталь, легированная: некарбидообразующими (а) элементами, углеродистая сталь

и сталь, легированная карбидообразующими (б) элементами

Наиболее сильно увеличивают прокаливаемое™ хром, никель, молибден, марганец, поэтому они входят в состав большинства конструкционных легированных сталей. Прокаливаемое™ стали может быть особенно увеличена при совместном легировании несколькими элементами. Таково, например, совместное действие никеля и хрома. Очень эффективно действует молибден при введении его в хромоникелевую сталь.

Своеобразно влияют на кинетику распада такие сильные карбидообразователи, как Ti, V, Ni и отчасти РИ. Так как элементы образуют труднорастворимые карбиды, то при обычных температурах закалки (800-900 °C) они остаются связанными в карбиды и не переходят в аустенит. В результате этого прокаливаемое™ стали уменьшается. При высоком нагреве под закалку эти карбиды уже растворяются в аустените, что увеличивает прокаливаемое™.

## Влияние легирующих элементов на мартенситное превращение

Легирующие элементы, не влияя на кинетику мартенситного превращения, оказывают влияние на положение температурного интервала мартенситного превращения, что отражается на количестве остаточного аустенита, которое фиксируется в закаленной стали. Некоторые элементы повышают мартенситную точку и уменьшают количество остаточного аустенита (Al, Co), и другие не влияют на нее (Si), но большинство снижают мартенситную точку и увеличивают количество остаточного аустенита.

На рис. 11.4 представлено влияние легирующих элементов на температуру мартенситного превращения (а) и количество остаточного аустенита (б) сталей, содержащих 1 %С.

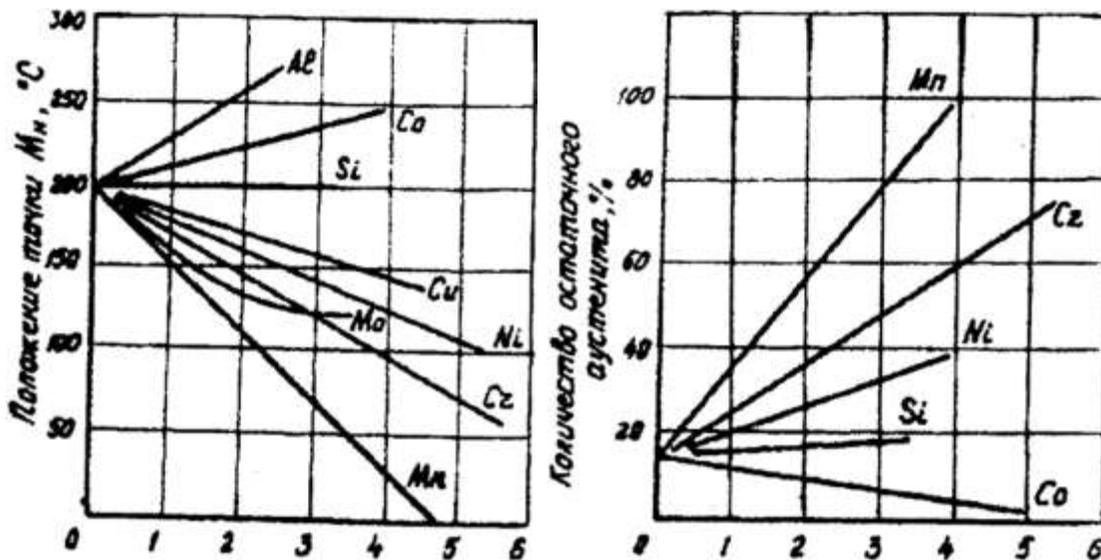


Рис. 11.4. Влияние легирующих элементов на температуру мартенситного превращения сталей с содержанием 7% С

Из диаграммы видно, например, что 5 %Мп снижает мартенситную точку до 0 °С, следовательно, при таком (или большем) содержании этого легирующего элемента охлаждением можно зафиксировать аустенитное состояние.

## Влияние легирующих элементов на рост зерна аустенита

Влияние легирующих элементов на рост зерна аустенита является прямым следствием различной устойчивости карбидов этих элементов. Избыточные карбиды, не растворенные в аустените, препятствуют росту аустенитного зерна. В связи с этим, хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан сильно измельчают зерно; никель, кобальт, кремний, медь (элементы, не образующие карбидов) - слабо влияют на рост зерна; марганец, бор - способствуют росту зерна.

## Влияние легирующих элементов на превращения при отпуске

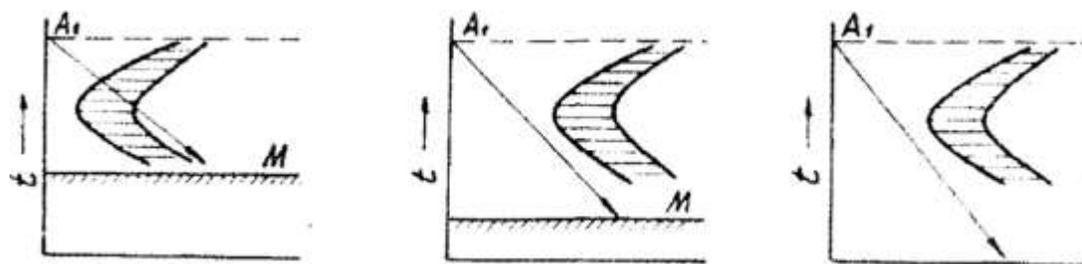
Легирующие элементы замедляют процесс распада мартенсита. Некоторые элементы, такие как никель или марганец, влияют незначительно, тогда как большинство (хром, молибден, кремний и др.) - весьма заметно. Для получения одинаковых результатов сталь, легированную такими элементами, как хром, молибден, кремний и др. нужно нагревать при отпуске до более высокой температуры или увеличивать продолжительность отпуска, по сравнению с углеродистой сталью.

При содержании ванадия, молибдена, кремния и других элементов свыше определенного значения ( см. размер d) устойчивым при всех температурах является а-состояние ( рис. 11.16). Такие сплавы на основе железа называются ферритными. *Аустенитные и ферритные сплавы не имеют превращений при нагревании и охлаждении.*

## Классификация легированных сталей по структуре после нормализации (охлаждения на воздухе)

По структуре легированные стали делятся на пять классов: *перлитный, мартенситный, ферритный, аустенитный и карбидный.*

К перлитному классу относятся низколегированные стали, в которых после нормализации образуется перлитная (сорбитная, трооститная) структура. Это объясняется тем, что кривая скорости охлаждения будет пересекать область перлитного распада (рис. 11.5а).



а б в

Рис. 11. 5. Диаграмма изотермического распада аустенита

К нему относятся стали, содержащие небольшое количество легирующих элементов и обладающие структурой эвтектоидного типа: перлит, сорбит, троостит, наряду с которыми могут присутствовать феррит или вторичные карбиды. К этой группе относятся стали 40Х, 40ХН, 30ХГСА, 40ХГТ, Х, 9ХСидр.

К мартенситным — среднелегированные стали, наличие легирующих элементов в которых обеспечивает при нормализации образование мартенситной структуры. При этом область перлитного распада сдвинута вправо (рис. 11.5б), поэтому аустенит здесь переохлаждается без распада до температур мартенситного превращения.

Из сталей этого класса в машиностроении применяются хромоникелевые и хромоникельвольфрамовые конструкционные стали с содержанием до 0,3-0,4.% углерода, например 18Х2Н4ВА, 25ХН4ВА и др. Стали других составов отличаются высокой хрупкостью и поэтому не применяются.

К аустенитным - высоколегированные стали, в которых при нормализации не происходит превращение аустенита, и он полностью сохраняется в стали при комнатной температуре. Это объясняется тем, что мартенситное превращение протекает в области отрицательных температур (рис. 11.5в).

К аустенитному классу относятся стали с высоким содержанием таких легирующих элементов, как Ni, Mn, Cr и Ti. В структуре стали будет находиться аустенит и небольшое количество карбидов. Стали этого класса жаропрочные и коррозионностойкие. После закалки при температуре 1000-1100.°С карбиды, находящиеся в стали, переводятся в твердый раствор, в результате чего улучшается коррозионная стойкость и повышается пластичность. К этой группе относятся стали X18H9, X18H9T и др.

К ферритным - стали, легированные значительным количеством элементов, расширяющих область  $\alpha$  - твердого раствора (феррита). Такие стали не испытывают аллотропических превращений и при любых температурах находятся в состоянии  $\alpha$ -твердого раствора. К ферритному классу относятся стали, содержащие значительное количество легирующих элементов, замыкающих область существования  $\gamma$  - твердого раствора (Cr, Si и др.) и малое количество углерода. Эти стали обладают высокой коррозионной стойкостью, например сталь X17.

К карбидному классу относятся в основном инструментальные стали с большим содержанием карбидообразующих элементов (Cr, W, Mo, Ti). К этому классу можно отнести стали X12M, P9, P18 и др., содержащие большое количество углерода и карбидообразующих элементов Cr, W, V и др. Для этого класса характерным является именно наличие карбидов, структура же основного фона может быть в зависимости от состава и температуры нагрева перлитной, мартенситной и аустенитной. Эти стали обладают высокой твердостью и износостойкостью. Применяются для изготовления режущего инструмента и штампов, работающих в тяжелых условиях.

Основные структурные составляющие легированных сталей - легированный феррит, легированный аустенит, легированный цементит и специальные карбиды.

*Легированный феррит* представляет собой твердый раствор легирующих элементов в  $\alpha$ -железе (феррите) и отличается от обычного феррита тем, что в его кристаллической решетке атомы железа частично замещены атомами легирующего элемента. Под микроскопом легированный феррит ничем не отличается от феррита углеродистой стали.

*Легированный аустенит* представляет собой твердый раствор легирующих элементов в  $\gamma$ -железе. Он наблюдается под микроскопом в виде однородных зерен, часто с наличием линии сдвига или двойников.

*Легированный цементит* представляет собой раствор легирующих элементов в карбиде железа  $Fe_3C$  и отличается от цементита железа углеродистых сталей тем, что в его кристаллической решетке атомы железа частично замещены атомами карбидо-образующих легирующих элементов. Под микроскопом легированный цементит ничем не отличается от обычного цементита углеродистых сталей.

*Специальные карбиды* - соединения легирующих элементов с углеродом. Они отличаются высокой твердостью и обычно большей, чем цементит, дисперсностью. Различают две группы карбидов: имеющие сложную кристаллическую решетку ( $Cr_23C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_2W_2C_7$ ) и имеющие простую кристаллическую решетку ( $W_2C$ ,  $WC$ ,  $Mo_2C$ ,  $VC$ ,  $TiC$ ). Под микроскопом специальные карбиды трудно отличить от цементита. Для выявления состава карбида применяются специальные реактивы и методы травления. Некоторые специальные карбиды имеют специфическую форму, например, карбид титана имеет форму кубиков.

Изменение скорости охлаждения будет изменять структуру, а также класс стали. Так, если сталь перлитного класса охладить с большой скоростью, то можно получить мартенсит; при охлаждении стали мартенситного класса с меньшей скоростью можно получить перлит, а обработав аустенитную сталь холодом, можно получить мартенсит.

## **СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И УСЛОВИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Рассмотрим наиболее распространенные легированные стали, их термическую обработку, структуру и некоторые свойства.

Легированные конструкционные улучшенные стали марок 40X, 40XH, 30XГСА и 40XГТ подвергают термическому улучшению - закалке и высокому отпуску. В некоторых случаях их используют в состоянии поставки (в отожженном или нормализованном состоянии).

### **Стали перлитного класса**

Сталь 40X - конструкционная улучшаемая машиностроительная сталь, легированная хромом. Введение хрома способствует уменьшению критической скорости закалки, а следовательно, улучшению прокаливаемости. Из-за большей прокаливаемости<sup>TM</sup> и меньшей критической скорости закалки замена углеродистой стали легированной позволяет производить закалку деталей в менее резких охладителях (масле, воздухе), что уменьшает деформацию изделий и опасность образования трещин. При охлаждении в масле сталь 40X позволяет получить сквозную прокаливаемость<sup>TM</sup> до диаметра 20 мм (сталь 40 - до 10 мм). Применяется сталь 40X для изготовления средненагруженных машиностроительных деталей небольших сечений (валов, штоков, шатунов и т.п.).

Химический состав стали 40X: 0,36 - 0,44 % C; 0,5-0,8 % Mn, 0,8-1,1 % Cr.

Сталь 40X для улучшения обрабатываемости подвергают нормализации при температуре 900 °C. В результате такой обработки структура стали будет состоять из крупнопластинчатого перлита и сетки феррита (рис. 11.6а).

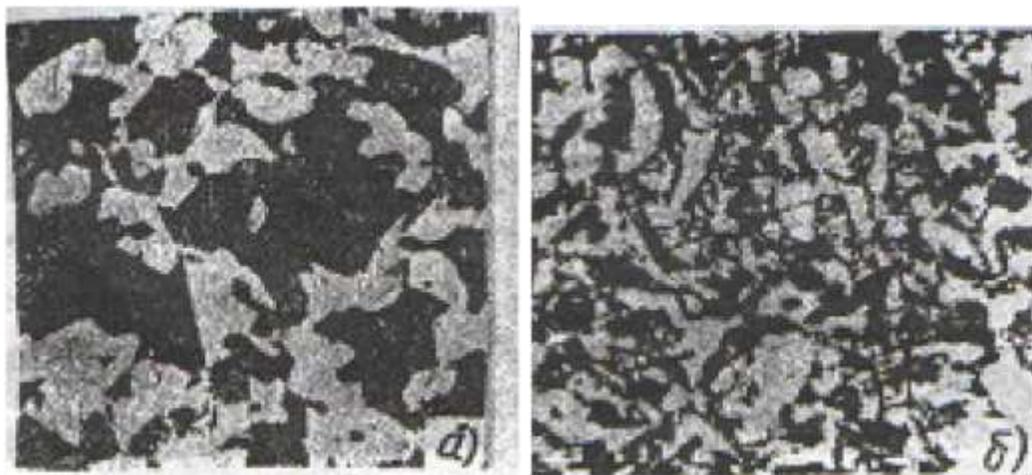
Термическая обработка стали 40X заключается в улучшении: закалка с температуры 860 °C с охлаждением в масле и высокий отпуск при температуре 500-600 °C с охлаждением в воде, а для мелких деталей в масле. Сталь склонна к отпускной хрупкости II рода, устранение которой требует быстрого охлаждения с температуры высокого отпуска. В термически обработанной стали структура состоит из продукта распада мартенсита - сорбита. Улучшение обеспечивает высокий комплекс механических свойств:  $\sigma_B = 1000$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 800$  МПа;  $\delta = 10\%$ ;

$\psi^* = 45\%$ ,  $KCU = 0,6$  МДж/м<sup>2</sup>, будет иметь структуру мелкоигольчатого отпущенного мартенсита (рис. 11.6б).



*Рис. 11.6. Структура стали 40X*

Конструкционная сталь 30ХГСА (хромансиль) обладает высокими механическими и технологическими свойствами и используется для изготовления тонкостенных сварных конструкций. Сталь 30ХГСА подвергают отжигу и улучшению. В отожженном состоянии структура состоит из феррита и перлита высокой дисперсности (рис. 13.7а), в улучшенном состоянии - из сорбита, ориентированного по мартенситу (рис. 13.7 б). Такая же структура характерна и для других среднеуглеродистых конструкционных сталей.



*Рис. 11.7. Структура стали 30ХГСА*

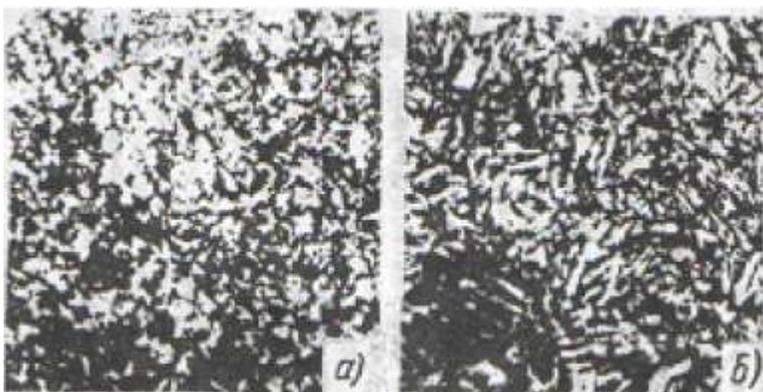
### **Стали мартенситного класса**

Легированные конструкционные цементованные стали 15X, 20X, 18ХГТА, 12ХН3А и др. подвергают отжигу и закалке с последующим низким отпуском при температуре 150 °С,

Сталь 12ХН3А цементованная, закаленная с температуры 860 °С и отпущенная при 150 °С будет иметь структуру поверхностного слоя, состоящую из мартенсита грубого строения (рис. 13.8).

Легированные стали в отличие от углеродистых прокаливаются насквозь, поэтому сердцевина цементованной стали после обработки будет иметь структуру малоуглеродистого мартенсита (рис. 13.9).

Сталь 18Х2Н4ВА применяется в цементованном виде и без цементации (для деталей, к которым предъявляются высокие требования в отношении прочности, но не износостойкости). Структура стали 18Х2Н4ВА в состоянии поставки будет состоять из сорбита с неравномерным распределением углерода (рис. 13.9а).



*Рис. 11.8. Структура стали 12ХН3А*

Структура стали 18Х2Н4ВА после закалки и отпуска при низкой температуре состоит из малоуглеродистого мартенсита (рис. 13.96). После термической обработки эта сталь обладает высокой прочностью и вязкостью. Такое сочетание свойств обеспечивает надежность изделий в эксплуатации.

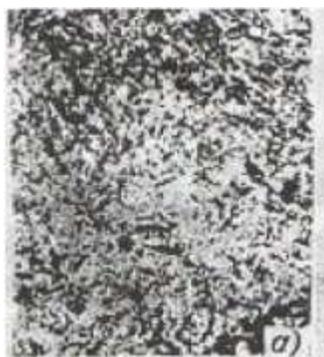
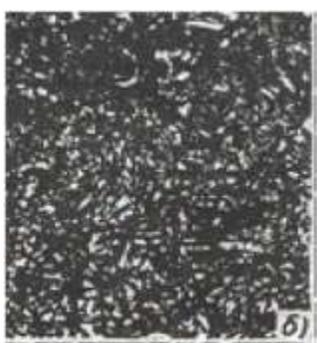


Рис. 11.9. Структура стали 18Х2Н4ВА



## Стали аустенитного класса

### Хромоникелевая нержавеющая сталь 12Х18Н9Т

Поверхностное разрушение металла под воздействием внешней среды называется коррозией. Технически чистое железо, углеродистые нелегированные и низколегированные стали неустойчивы против коррозии в атмосфере, в воде и других средах окисляющего действия. Некоторые элементы повышают устойчивость стали против коррозии. При введении таких элементов в сталь происходит не постепенное, а скачкообразное повышение коррозионной стойкости. Введение в сталь 13%Сг делает ее коррозионностойкой в атмосфере и во многих других промышленных средах. Сплавы, содержащие меньше 13 % Сг подвержены коррозии. Сплавы, содержащие более 13 % Сг, ведут себя как благородные металлы: обладая положительным электрохимическим потенциалом (рис. 13.10), они не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей

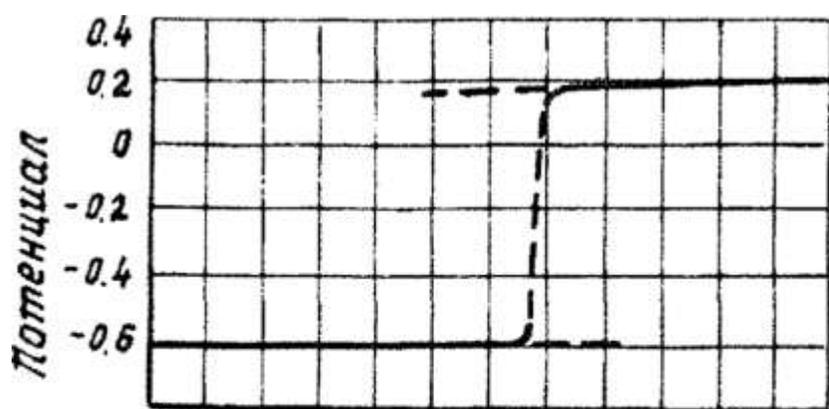


Рис. 11. 10. Потенциал железохромистых сплавов

Введение достаточного количества никеля в 18 %-ную хромистую сталь переводит ее в аустенитное состояние во всем диапазоне температур, что обеспечивает лучшие механические свойства, меньшую склонность к росту зерна, а также делает сталь более коррозионностойкой.

Нержавеющие стали с 18 % Сг и 9 % Ni получили наиболее широкое распространение в машиностроении, в изделиях широкого потребления.

Химический состав стали 12Х8Н9Т: 0,12 % С; 1-2 % Мп, 17-19 % О; 8-10 % Ni, ~ 1%Ti.

В хромоникелевых нержавеющей стали могут образовываться специальные карбиды, преимущественно типа  $M_{23}C_6$ . Образование карбидов может происходить при содержании углерода  $> 0,04\%$ . Высокое содержание никеля снижает растворимость углерода в аустените, поэтому и возможно образование карбидов при  $0,12\%C$ .

При дополнительном легировании этих сталей титаном и ниобием последние могут образовывать специальный карбид типа MC. Чем больше будет отношение содержания титана и ниобия к углероду, тем больше будет образовываться карбида типа MC и меньше карбида типа  $M_{23}C_6$ .

Термическая обработка нержавеющей сталей аустенитного класса заключается в закалке в воде с температуры  $1050-1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Нагрев до этих температур вызывает растворение карбидов хрома ( $Cr_3C_6$ ), а последующее быстрое охлаждение фиксирует состояние пересыщенного твердого раствора (аустенит). Медленное охлаждение недопустимо, так как при этом, как и при отпуске, возможно выделение карбидов, приводящее к ухудшению пластичности и коррозионной стойкости. Кроме того, при закалке происходят рекристаллизационные процессы, устраняющие последствия предшествующего пластического деформирования.

Перешедшие при нагреве в раствор карбиды могут выделиться при последующем замедленном охлаждении или при отпуске  $500-700\text{ }^\circ\text{C}$ , если сталь была закалена. Это приводит к появлению очень опасного особого вида коррозионного разрушения по границам зерен, названного межкристаллитной (интеркристаллитной) коррозией. Выделение карбидов хрома  $Cr_{23}C_6$  в пограничных зонах приводит к обеднению этих зон аустенита хромом ниже того предела (т.е.  $13\%$ ), который обеспечивает коррозионную стойкость.

Склонность к интеркристаллитной коррозии аустенитных нержавеющей сталей можно устранить уменьшением содержания углерода и введением элементов-стабилизаторов - титана или ниобия. При введении в сталь титана или ниобия образуются карбиды типа MC. Эти карбиды мало растворимы в аустените. Титан и ниобий, забирая на себя углерод, препятствуют образованию хромистых карбидов и появлению интеркристаллитной коррозии.

В структуре стали 12X18H9T после закалки будет аустенит (рис. 13.11), что обеспечивает наиболее высокие механические и коррозионностойкие свойства.

Механические свойства нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T в закаленном состоянии:  $\sigma_b = 520-560\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 200-250\text{ МПа}$ ;  $\delta = 50\%$ ;  $\psi = 55\%$ ,  $НВ = 1400-1500\text{ МПа}$



Рис. 11. 11. Структура аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T

## Стали карбидного класса

### Быстрорежущая инструментальная сталь P18

Основным требованием, предъявляемым к стали для режущего инструмента, является сохранение режущей кромки в течение длительного времени. Чтобы эта полоска металла была устойчивой против истирания, она должна иметь высокую твердость, как правило, выше  $60HRC$ .

На отделение стружки от обрабатываемой детали при резании затрачивается определенная механическая работа, которая в процессе резания превращается в тепло. Это тепло нагревает режущий инструмент и может приводить к снижению твердости режущей кромки.

В отличие от других инструментальных сталей быстро-режущие стали обладают высокой теплостойкостью (красностойкостью), то есть способностью сохранять мартенситную структуру и соответственно, высокую твердость, прочность и износостойкость, а следовательно, высокие режущие свойства, при повышенных температурах. Эти стали сохраняют мартенситную структуру при нагреве до 600-620 °С, поэтому применение их позволяет значительно повышать скорость резания (в 2-4 раза) и стойкость инструментов (в 10-30 раз) по сравнению со сталями, не обладающими теплостойкостью. Так, твердость углеродистой стали начинает быстро падать после нагрева до 200 °С (вследствие распада мартенсита).

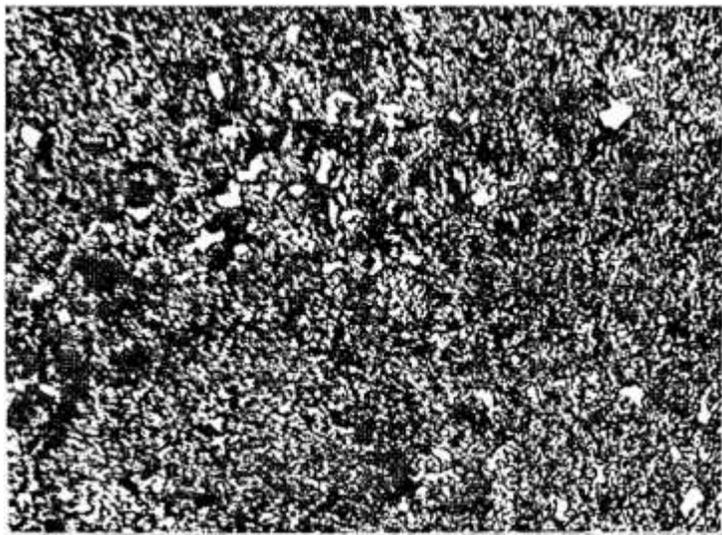
Высокая теплостойкость быстрорежущих сталей обеспечивается введением большого количества вольфрама совместно с другими карбидообразующими элементами (Мо, V), а также кобальтом. Инструмент из этих сталей сохраняет высокую твердость до 600-640 °С и допускает в 3-5 раз более производительные режимы резания, чем из сталей, не обладающих теплостойкостью.

Быстрорежущие стали обозначаются буквой Р, цифра, после которой указывает содержание вольфрама - основного легирующего элемента в процентах (ГОСТ 19265-73).

Химический состав наиболее распространенной стали Р18: 0,7-0,8 %С; 3,8-4,4 % Сг; 17,0-18,5 % W, <1,0 %Мо; 1,0-1,4 % V.

По структуре после отжига быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу. В литом виде имеют ледебуритную эвтектику. Ее устраняют путем измельчения первичных карбидов горячей деформацией (ковкой), что возможно, так как в ледебурите литой быстрорежущей стали углерода значительно меньше, чем в чугунах.

Для снижения твердости (до 2070-2550 НВ) деформированную сталь перед механической обработкой подвергают изотермическому отжигу. Структура отожженных сталей состоит из сорбитообразного перлита, вторичных и более крупных первичных карбидов (рис. 13.12).



*Рис. 11.12. Структура отожжённой стали*

Общее количество карбидов в стали составляет примерно 28 %. Основным карбидом в стали Р18 является сложный карбид вольфрама переменного состава (МбС), который растворяет в себе часть ванадия и хрома. В карбидах находится 80-95 % вольфрама и ванадия и около половины хрома. Остальная часть растворена в феррите.

Легируемые инструментальные стали марок Х, ХГ, ХВГ, 9ХС, ХВ5, 3Х2В8Ф и др. подвергают закалке и низкому отпуску с получением мартенсита отпуска. В результате термической обработки эти стали приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость. Для режущего и измерительного инструмента используют сталь марки Х. Структура отожженной стали Х состоит из зернистого перлита, после закалки при температуре 800 °С и отпуска при температуре 150°С структура будет - мартенсит и легируемый цементит (рис. 11.14).

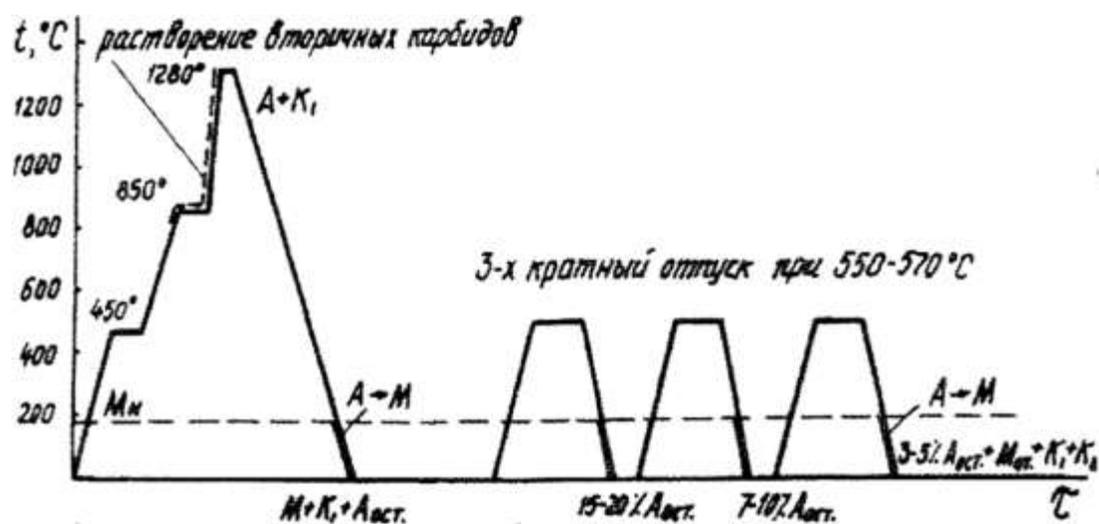


Рис. 11.13. Схема термической обработки быстрорежущей стали (без обработки холодом)

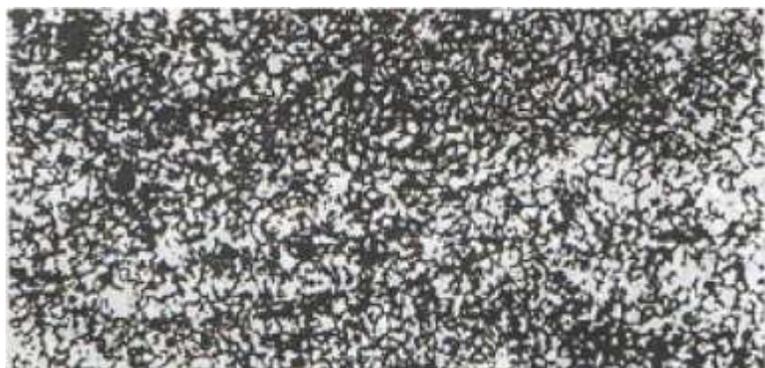


Рис. 11.14. Структура стали X

Высокие режущие свойства инструмент из быстрорежущей стали (без обработки холодом) приобретает после закалки и трёхкратного отпуска (рис. 11.13) медленно с прогревами при 450 °С и 850 °С. Особенность закалки быстрорежущих сталей - высокая температура нагрева. Она необходима для обеспечения теплостойкости - получения после закалки высоколегированного мартенсита в результате перехода в раствор максимального количества специальных карбидов. Высокая температура закалки не вызывает перегрева - роста зерна из-за торможения включениями первичных карбидов и высокой скорости нагрева в расплаве солей в соляных ваннах, дополнительно уменьшающего окисление и обезуглероживание.

Легирование аустенита происходит при растворении вторичных карбидов. Первичные карбиды не растворяются и тормозят рост зерна аустенита. Благодаря им при нагреве, близком к температуре плавления быстрорежущие стали сохраняют мелкое зерно.

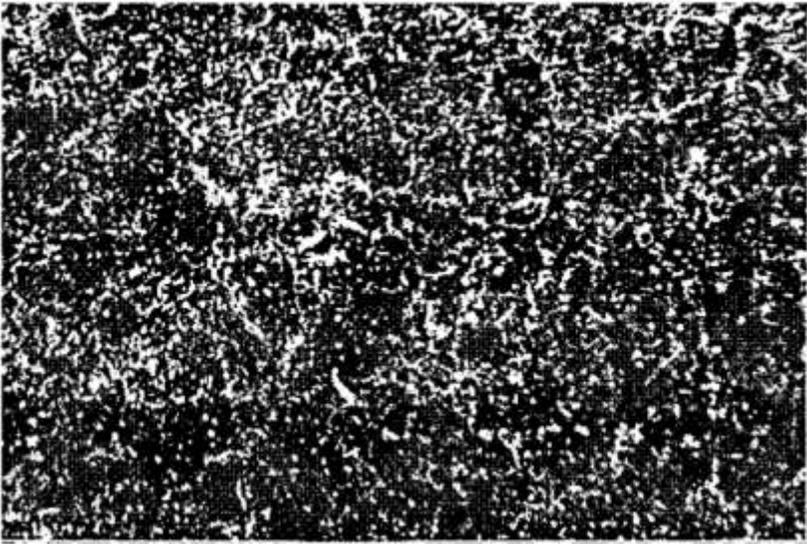
После закалки сталь не обладает максимальной твердостью, которая не превышает 60 HRC, так как в структуре, кроме мартенсита и первичных карбидов содержится 30-40 % остаточного аустенита, присутствие которого вызвано снижением точки  $M_s$  ниже 0 °С из-за присутствия высокого содержания легирующих элементов и углерода, (рис. 11.15).

Чтобы полностью превратить остаточный аустенит, снижающий режущие свойства инструмента, после закалки проводится отпуск при температуре 560 °С. В процессе выдержки при отпуске (1 час) из мартенсита и остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды МбС. Этот процесс протекает наиболее интенсивно при 560 °С в течение первого часа, а затем замедляется. Аустенит, обедняясь углеродом и легирующими элементами, становится менее устойчивым и при охлаждении ниже  $M_n$  испытывает мартенситное превращение. Однократный отпуск не обеспечивает превращения всего остаточного аустенита. Применяют трехкратный отпуск с выдержкой 1 час и охлаждением на воздухе. Применение после закалки обработки холодом сокращает цикл термической обработки.

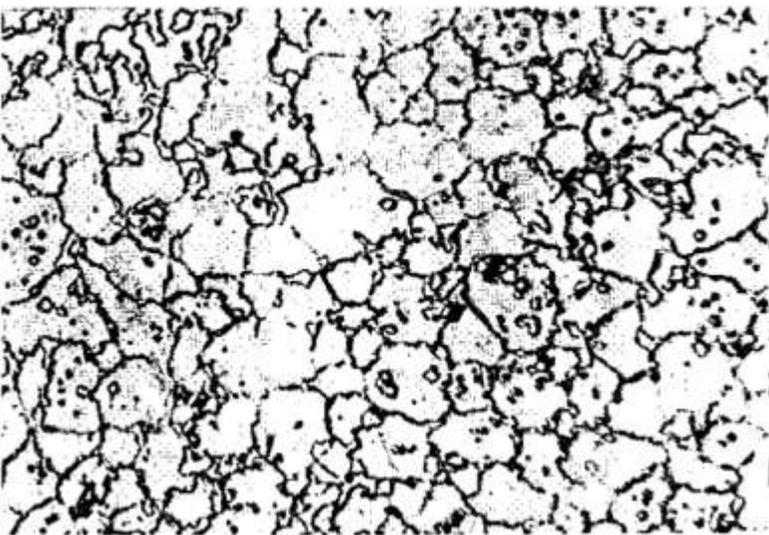
### Порядок проведения работы

- 1. Изучить влияние легирующих элементов на структуру и свойства легированных сталей.
- 2. Рассмотреть классификацию легированных сталей.
- 3. Изучить и зарисовать микроструктуры легированных сталей.
- 4. Вписать химический состав каждой стали и объяснить принцип маркировки

- 5. Определить к какому классу по структуре и назначению принадлежат заданные стали, для каких изделий применяются, какими свойствами должны обладать



*Рис. 11.15 Микроструктура стали P18 после закалки*



*Рис. 11.16. Структура после отпуска*

- 6. Выписать типичные режимы термической обработки для каждой стали и получаемые значения механических свойств.
- 7. Рассмотреть особенности термической обработки каждой стали.

Результаты выполнения работы заносятся в таблицу следующей формы.

Таблица

№ п/п	Марка стали	Микроструктура в нормализованном состоянии	К какому классу относится сталь	Ориентировочный режим термической обработки	Микроструктура термически обработанной стали

### Содержание отчёта

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующий материал:

- 1. Наименование и цель работы.
- 2. Микроструктуры легированных сталей с обозначениями структурных составляющих.
- 3. Химический состав изучаемых легированных сталей.
- 4. Режимы термической обработки изучаемых легированных сталей.
- 5. Механические свойства изучаемых легированных сталей.
- 6. Описание возможных областей применения изученных легированных сталей.

## Вопросы для самопроверки

При подготовке отчета необходимо обратить внимание на следующие вопросы теории:

- 1. Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа.
- 2. Распределение легирующих элементов в стали.
- 3. Влияние легирующих элементов на кинетику распада аустенита.
  
- 4. Влияние легирующих элементов на мартенситное превращение.
- 5. Влияние легирующих элементов на превращения при отпуске.
- 6. Классификация и маркировка легированных сталей.
- 7. Применение изучаемых легированных сталей.

### Раздел 5 Конструкционные материалы

#### Тема 5.2 Легированные стали

#### Практическое занятие 9

### Определение видов сталей по маркировке. Выбор марки легированных сталей для деталей в зависимости от условий их работы

**Цель:-** Освоить умения работы со справочной литературой по выбору марок стали и условий их работы;  
-Освоить умения по выбору вида и режимов термической обработки сплавов в зависимости от назначения изделия;

#### Материальное обеспечение:

1. Презентация по данной теме;
2. Компьютер, проектор, экран;
3. Электронные плакаты Диаграммы состояния Fe-C
4. компьютер, проектор, экран,
5. Образцы материалов: сталь.
6. Марочник сталей под редакцией Сорокина В.Г. М.: Машиностроение, 1989 г.

#### Задание:

1. Изучить условия работы заданной детали или инструмента и требования к ней.
2. Выбрать марку сталей для деталей или инструмента изучить ее химический состав и механические свойства.
3. Разработать в зависимости от условий работы детали, необходимые вид и режим термической или химико-термической обработки.

#### Теоретические сведения:

Задание предусматривает: обосновать выбор материала для изготовления заданной детали и выбор вида и режима термической и химико-термической обработки, которая обеспечит надежность и работоспособность детали в условиях эксплуатации, указанных в задаче.

Для решения задачи необходимо прежде всего *определить материал*, обладающий свойствами, близкими к требуемым. Для этой цели рекомендуется ознакомиться с классификацией, составом и назначением основных материалов, используемых в технике.

Если для улучшения свойств выбранного материала нужны термическая и химико-термическая обработка, то необходимо указать их режимы, получаемую структуру и свойства. При рекомендации режимов обработки необходимо также указать наиболее экономичные и производительные способы.

*Классификация по назначению.*

В зависимости от назначения легированную сталь делят на:

- конструкционную,

- инструментальную
- сталь с особыми физико-химическими свойствами.

*Конструкционную сталь* применяют для изготовления деталей машин; она в свою очередь делится на цементируемую (подвергаемую цементации) и улучшаемую (подвергаемую улучшению — закалке и высокому отпуску).

*Инструментальную сталь* применяют для изготовления режущего, измерительного, штампового и другого инструмента.

*К сталям с особыми свойствами относят:*

- нержавеющие,
- жаростойкие,
- кислотостойкие,
- износостойчивые,
- с особыми магнитными и электрическими свойствами и т. д.

### **Маркировка легированной стали.**

По ГОСТ для обозначения легирующих элементов приняты **следующие буквы:**

- Х — хром,
- Н — никель,
- Г — марганец,
- С — кремний,
- В — вольфрам,
- М — молибден,
- Ф — ванадий,
- К — кобальт,
- Т — титан,
- Ю — алюминий,
- Д — медь.

### **Конструкционная легированная сталь и сталь с особыми свойствами.**

Конструкционную легированную сталь применяют для изготовления ответственных деталей машин и металлических конструкций. Такая сталь относится в **основном к перлитному классу.**

Свойства легированной стали определяются не только количеством легирующих элементов и содержанием углерода, но также в значительной степени термической обработкой.

Тройная легированная сталь. Хром в качестве легирующего компонента получил наибольшее распространение, так как способствует увеличению прочности стали и является относительно дешевым. Хром сообщает стали хорошую сопротивляемость износу, а с увеличением количества углерода — высокую твердость вследствие образования карбидов. Низко- и среднелегированная хромовая сталь довольно широко применяется в авиа-, авто- и тракторостроении, а также в других отраслях машиностроения для изготовления осей, валов, зубчатых колес и других деталей. Хромовая сталь при содержании 0,4—1,65% Cr и 0,95—1,15% C образует группу шарикоподшипниковых сталей. Низколегированную хромовую сталь применяют также для изготовления инструментов.

**Никель** — прекрасный легирующий элемент, но он очень дорог и дефицитен. Поэтому его стараются по возможности заменять или применять в сочетании с хромом, марганцем и другими легирующими элементами (сложнолегированная сталь). Никель увеличивает прочность, вязкость и твердость (после закалки) стали, мало снижая пластичность, сильно повышает прокаливаемость и коррозионную стойкость. После закалки и низкого отпуска никелевая сталь имеет высокую твердость, но не обладает хрупкостью.

**Кремний** при содержании его свыше 0,8% повышает прочность, упругость и твердость стали, снижая, однако, ее вязкость. В практике нашла применение низколегированная кремнистая сталь перлитного класса.

Низкоуглеродистую кремнистую сталь (0,08—0,18% C и 0,8—1,2% Si) применяют для сооружения мостов и других целей. Эту сталь не подвергают термической обработке.

Сталь 55C<sub>2</sub>, 60C<sub>2</sub> и других марок применяют для изготовления пружин и рессор. После закалки и отпуска эта сталь отличается высоким пределом прочности и упругости.

**Марганец** повышает твердость и прочность стали, а также увеличивает ее прокаливаемость и улучшает свариваемость. Легированной марганцевой сталью называют сталь, которая содержит не менее 1% Мп. В практике применяют низколегированную и высоколегированную марганцевую сталь.

#### **Сложнолегированная конструкционная сталь.**

**Сложнолегированная конструкционная сталь** имеет в промышленности большое распространение. Это объясняется тем, что путем одновременного легирования стали несколькими элементами получение нужных свойств достигается легче, полнее и при меньшем общем содержании легирующих элементов.

**Хромоникелевая сталь** получила широкое применение в авиастроении для изготовления наиболее нагруженных деталей авиадвигателей (шатуны, поршневые пальцы, ролики рычагов и т. д.), в авто- и тракторостроении и др. В зависимости от характера службы в изделии одни детали должны подвергаться цементации, другие — закалке и высокому отпуску (улучшению).

**Хромо- молибденовая сталь.** Молибден придает стали способность сохранять прочность при нагреве (жаропрочность), способствует образованию мелкозернистой однородной структуры, улучшает свариваемость и обрабатываемость резанием.

#### **Хромованадиевая сталь.**

Низколегированная сталь повышенной прочности. Незадолго до Великой Отечественной войны советскими учеными совместно с работниками промышленности была разрешена задача получения строительной и конструкционной низколегированной стали повышенной прочности, не содержащей дорогостоящих элементов (никеля, молибдена, ванадия, фольфрама и др.), а легированной хромом, марганцем и кремнием.

**Хромомарганцевокремнистая сталь** (сокращенно хромансиль) марок 20ХГСА, 30ХГСА и др, легко сваривается, а после соответствующей термической обработки по своим механическим свойствам не уступает хромомолибденовой стали

Например, для деталей, изготавливаемых в массовом и крупносерийном производстве – обработку с индукционным нагревом, газовую цементацию и др.

*Инструментальные стали для резания или горячего деформирования* должны сохранять при нагреве высокие твердость, прочность и износостойкость, т.е. обладать красностойкостью (теплостойкостью). Это свойство создается специальным легированием и термической обработкой.

#### **Пример выполнения задания.**

**Задание:** Подберите марку стали повышенной теплостойкости, пригодную для резания жаропрочной стали. Укажите ее состав, режимы термической обработки, схемы микроструктуры.

**Решение:** При резании сталей и сплавов с аустенитной структурой (нержавеющих, жаропрочных и др.), получающих все более широкое применение в промышленности, стойкость инструментов и предельная скорость резания могут сильно снижаться по сравнению с резанием обычных конструкционных сталей и чугунов с относительно невысокой твердостью (до НВ 220-250). Это связано главным образом с тем, что теплопроводность аустенитных сплавов понижается. Вследствие этого теплота, выделяющаяся при резании, лишь в небольшой степени поглощается сходящей стружкой и деталью и в основном воспринимается режущей кромкой. Кроме того, эти сплавы сильно упрочняются под режущей кромкой в процессе резания, из-за чего заметно вырастают усилия резания.

Для резания подобных материалов, называемых труднообрабатываемые, малопригодны быстрорежущие стали умеренной теплостойкости типа Р12, сохраняющие высокую твердость (HRC-60) и мартенситную структуру после нагрева не выше 615-620°C.

Для обработки аустенитных сплавов необходимо выбирать быстрорежущие стали повышенной теплостойкости, а именно кобальтовые стали сохраняют твердость HRC 60 после более высокого нагрева до 640-645°C. Кроме того, кобальт заметно повышает теплостойкость быстрорежущей стали, а следовательно, снижает температуру режущей кромки из-за лучшего отвода тепла в тело инструмента. Стали с кобальтом имеют высокую твердость – до HRC 68.

Для сверл и фрез, применяемых для резания аустенитных сплавов, рекомендуются кобальтовые сплавы марок Р12Ф4К5 или Р8М3К6С.

Таблица 1

Химический состав сталей, %

Сталь	С	Gr	W	Mo	V	Co
Р12Ф4К5	1,3	3,8	12,5	1	3,5	5,5
Р8М3К6С	1,1	3,8	8	3,6	1,7	6

Термическая обработка кобальтовых сталей принципиально не отличается от обработки других быстрорежущих сталей.

Закалка до 1240-1250°C (P13Ф4K5) и 1210-1220°C (P8M3K6C), что необходимо для растворения большого количества карбидов и насыщения аустенита (мартенсита) легирующими элементами. Более высокий нагрев недопустим: он вызывает рост зерна, что снижает прочность и вязкость. Структура стали после закалки: мартенсит, остаточный аустенит (15-30%) и избыточные карбиды, не растворяющиеся при нагреве и задерживающие рост зерна. Твердость HRC 60-62.

Затем инструменты опускают при 550-560°C (3 раза по 60 минут).

Отпуск:

а) вызывает выделение дисперсных карбидов мартенсита, что повышает твердость до HRC 66-69;

б) превращает мягкую составляющую – остаточный аустенит в мартенсит;

в) снимает напряжения, вызываемые мартенситным превращением.

После отпуска инструмент шлифуют, а затем подвергают цианированию, чаще всего жидкому с выдержкой 15-30 мин. (в зависимости от сечения инструмента).

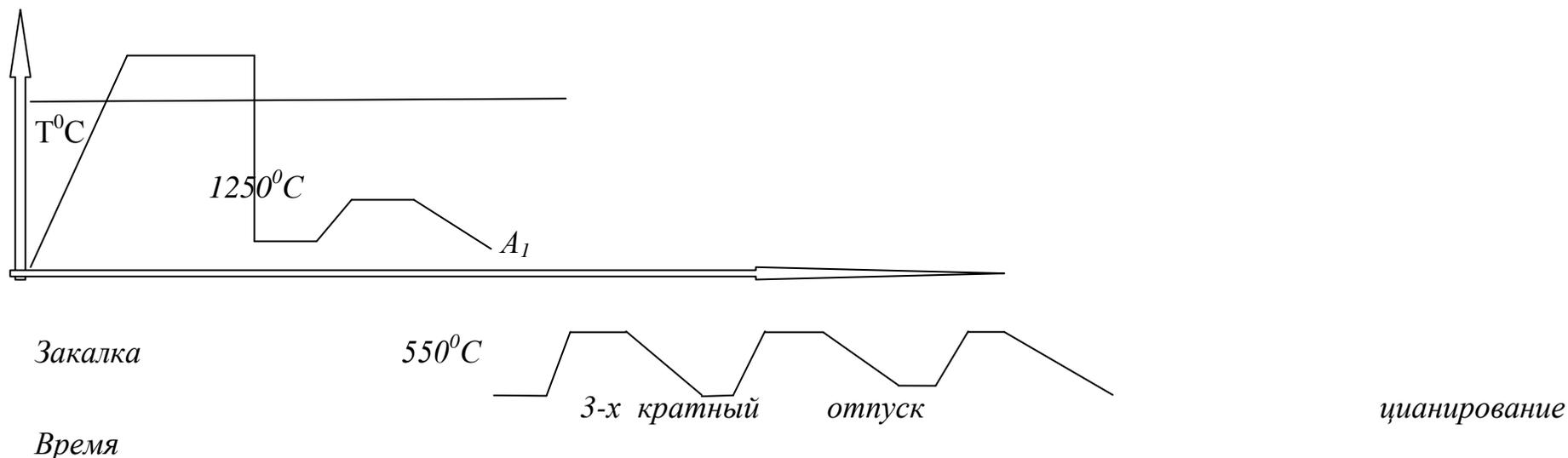


Рис.1 Термический цикл обработки

Твердость цианирования слоя на глубину 0,02-0,03мм достигает HRC 69-70. Цианирование повышает стойкость инструментов на 50-80%. После цианирования возможен кратковременный нагрев при 450-500 °C с охлаждением в масле, поверхность инструмента приобретает тогда синий цвет и несколько улучшает стойкость против воздушной коррозии.



Рис.2 Микроструктура стали после отжига



Рис.2 Микроструктура стали после закалки и многократного отпуска

### Порядок выполнения работы:

1. Изучить условия работы заданной детали и требования, предъявляемые к ней.
2. Выбрать марку материала для изготовления детали или инструмента, изучить ее состав и механические свойства.
3. Разработать в зависимости от условий работы детали, необходимый вид и режим термической или химико-термической обработки, начертить термический цикл обработки.
4. Дать обоснование выбора марки стали и вида термической обработки детали.
5. Выполнить индивидуальное задание по вариантам:

### Вариант 1

1. Завод изготавливает коленчатые валы диаметром 35мм; сталь в готовом состоянии должна иметь предел текучести не ниже 290 мПа и ударную вязкость не ниже 50 мПа. Вал должен обладать повышенной износостойкостью не по всей поверхности, а только в шейках, т.е. в участках, сопряженных с подшипниками и работающих на истирание.  
Подберите марку стали, рекомендуйте режим термической обработки, повышающей твердость в отдельных участках поверхности вала.  
Зарисовать схему микроструктуры и твердость стали в поверхностном слое шейки вала и структуру и механические свойства в остальных участках вала.
2. Щеки и шары машин для дробления руды и камней работают в условиях повышенного износа, сопровождаемого ударами.  
Подберите сталь для изготовления щек и шаров, учитывая, что они изготавливаются методом литья, должны иметь предел прочности не ниже 640 мПа и ударную вязкость при температуре +20 °С не ниже 260 дж/см<sup>2</sup>. Укажите химический состав, режимы термической обработки и свойства стали. Зарисуйте схему микроструктуры.

### Вариант 2

1. Детали самолетов – педали, рычаги изготавливают из сплава с хорошими литейными свойствами, обладающие кроме того хорошей обрабатываемостью резанием. Предел прочности сплава не ниже 220 мПа. Рекомендуйте состав сплава, режимы термической обработки, укажите механические свойства в готовом изделии. Зарисуйте схему микроструктуры.
2. Стаканы цилиндров мощных двигателей внутреннего сгорания должны обладать высоким сопротивлением износу на поверхности. Для повышения износостойкости применяют азотирование.
  - а. Подберите сталь, пригодную для азотирования, приведите химический состав, рекомендуйте режим термической обработки и режим азотирования. Укажите твердость поверхностного слоя и механические свойства низлежащих слоев в готовом изделии. Приведите схему микроструктуры.

### Вариант 3

1. Рессоры грузового автомобиля изготавливают из качественной легированной стали, толщина рессоры до 10мм. Сталь должна иметь предел прочности не менее 1500 мПа и обладать высокими пределами выносливости и упругости. Подберите сталь, укажите ее состав, режимы термической обработки, свойства. Зарисуйте микросхему.
2. Необходимо изготовить шестерни из цветного сплава, стойкого против действия воды и пара и обладающего небольшим коэффициентом трения. Предел прочности не ниже 340МПа. Укажите марку сплава, его состав, механические свойства. Зарисуйте схему микроструктуры.

### Вариант 4

1. Выбрать марку материала для изготовления фрезы, обрабатывающей нержавеющей стали. Теплостойкость до 630 °С. Укажите состав сплава, режимы его термической обработки, механические свойства. Зарисуйте схему микроструктуры.
2. Выберите марку стали для изготовления топоров. Лезвие топора не должно сниматься или выкрашиваться в процессе работы, поэтому оно должно иметь твердость в пределах HRC 50-55 на высоту не более 30-40мм, остальная часть топора не подвергается закалке. Укажите химический состав стали, режимы термической обработки, обеспечивающие данную твердость на лезвии топора. Зарисовать схему микроструктуры.

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

## Лабораторная работа №7. Изучение микроструктуры цветных сплавов

Цель работы:

Изучение микроструктуры и свойств, маркировку и область применения цветных металлов и сплавов, и установление связи между структурой сплава и соответствующей диаграммой состояния. Получить практический навык микроанализа основных групп медных сплавов – латуней и бронз.

Приборы и материалы: Микроскоп металлографический. Коллекция микрошлифов

Теоретическая часть:

Медь и сплавы на ее основе Медь – металл красновато-розового цвета. Температура плавления 1083оС. Кристаллическая решетка – гранецентрированная кубическая с периодом 0,36153 нм. Плотность меди высокая – 8,94 г/см<sup>3</sup>. Медь характеризуют высокие тепло- и электропроводность; хорошо сопротивляется коррозии в обычных атмосферных условиях, в пресной и морской воде и других агрессивных средах, но имеет плохую устойчивость в сернистых газах и аммиаке, растворяется в кислотах-растворителях. Марки технической меди - М00, М0, М0б, М1б, М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р (б – бескислородная, р – раскисленная). Содержание примесей - от 0,01 % до 0,5 %. Наиболее вредными примесями, вызывающими горячеломкость (красноломкость) меди и ее сплавов, являются свинец (допустимое содержание 0,04 %) и особенно висмут (допустимое содержание 0,001 %), который вызывает также и хладноломкость. Механические свойства меди зависят от ее чистоты и состояния. Для отожженной меди предел прочности при растяжении примерно 220 МПа, относительное удлинение от 40 % до 50 %. Применяют медь благодаря ее токо- и теплопроводящим свойствам в электротехнике (проводники, шины, коллекторы) как материал для теплообменников, водоохлаждаемых изложниц, кристаллизаторов, поддонов. 42 Структура деформированной и отожженной технически чистой меди – полиэдрические зерна с двойниковыми образованиями. Различают следующие группы сплавов на основе меди: латуни (сплавы, где основным легирующим элементом является цинк), бронзы (сплавы с различными другими элементами) и медно-никелевые сплавы, которые в данной работе не рассматриваются. Маркируют сплавы в соответствии с их химическим составом. Легирующие элементы обозначают русскими буквами : О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, Ж – железо. Ф – фосфор, Б – бериллий, А – алюминий, Н – никель, С – свинец, Х – хром и т.д. Цифры обозначают количество соответствующих элементов в процентах. Если сплав деформируемый, то после букв Л (латунь) или Бр (бронза) перечисляют элементы, а затем соответственно их количество (ЛАН 59-3-2, БрАЖ 9-4), причем в латунях первая цифра отражает содержание меди, количество цинка определяется по остатку. В литейных сплавах буквы, обозначающие добавки, и цифры содержания чередуются (ЛЦ40С, БрА11Ж6Н6). Медные сплавы отличаются высокими механическими и технологическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии. Латуни называют простыми, или двойными, если в них входят только медь и цинк, и сложными, или легированными (многокомпонентными), если в них введены другие элементы. Структура латуней описывается диаграммой состояния Cu-Zn. При комнатных температурах до 39% цинка растворяется в меди, образуя фазу  $\alpha$  - твердый раствор замещения цинка в меди. При большем содержании цинка появляется фаза  $\beta^c$  – упорядоченный твердый раствор на основе электронного соединения CuZn с объемноцентрированной кубической решеткой. Эта фаза является твердой и хрупкой составляющей. В промышленном масштабе применяют только однофазные  $\alpha$  - латуни и двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-латуни (содержащие цинка не более 45 %), поэтому другие соединения меди с цинком не упоминаются. С увеличением содержания цинка прочность латуней увеличивается, особенно у двухфазных латуней, пластичность же возрастает до концентрации цинка от 30 % до 32 %, а затем резко уменьшается. В связи с этим однофазные латуни легко деформируются как в горячем, так и в холодном состояниях; двухфазные латуни обычно подвергают только горячей обработке давлением. Легирующие элементы сообщают латуням более высокие свойства. Алюминий существенно повышает прочность, особенно в сочетании с никелем, марганцем, железом, кремнием; никель улучшает технологические свойства и коррозионную стойкость, олово тормозит коррозию в морской воде, свинец улучшает обрабатываемость резанием, железо измельчает зерно и наряду с небольшим количеством марганца увеличивает пластичность. 43 В современной технике применяют как деформируемые, так и литейные латуни, из которых получают плотные, лишенные ликвации отливки с

высокими механическими свойствами, однако при литье существуют определенные трудности из-за возникновения крупных усадочных раковин. Основным видом термической обработки латуни – отжиг для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением, для получения в готовых полуфабрикатах нужных свойств, а также для устранения склонности к сезонному растрескиванию, которому подвержены латуни. Латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 – единственный известный дисперсионно твердеющий сплав, эффективно упрочняющийся в результате закалки и старения или НТМО. Прочность латуни можно повысить нагартовкой, но при этом снижается пластичность сплава. Микроструктура деформированной и отожженной однофазной латуни представляет полиэдрические зерна  $\alpha$ -твердого раствора с двойниковыми образованиями; из-за явления оптической анизотропии зерна могут быть неодинаково окрашены. В структуре двухфазной латуни наблюдаем светлые зерна фазы  $\alpha$  - твердого раствора на темном фоне  $\beta'$ -фазы – упорядоченного твердого раствора на базе соединения  $\text{CuZn}$ . Из простых однофазных латуни изготавливают проволоку, ленты, листы, трубы, фурнитуру, что требует больших степеней деформации при производстве даже без нагревания. В частности, латунь Л96 применяют для изготовления радиаторных и конденсаторных трубок. Из простых двухфазных латуни (Л159) заготовки производят только способом горячей деформации (листы, прутки, трубы, штамповки). Специальные латуни применяют для изготовления широкого ряда ответственных деталей с высокими свойствами, в том числе антифрикционными, в морском, химическом машиностроении, для теплотехнической аппаратуры, крепежных изделий и арматуры, зубчатых колес, втулок и т.д. В настоящее время применяемые в промышленности бронзы весьма многообразны, в данной работе будут рассмотрены только некоторые группы. Оловянные бронзы – это традиционные сплавы, которые из-за высокой стоимости и дефицитности олова часто заменяют так называемыми безоловянными бронзами. Наибольшее практическое значение имеют бронзы, содержащие не более 20% олова. Диаграмма состояния медь-олово достаточно сложна, указывает на существование в зависимости от состава и температуры весьма разнообразных фаз и структурных составляющих. Однако структура сплавов, полученных в реальных производственных условиях, очень отличается от равновесной. До 5-6% олова в сплавах существует однофазный раствор замещения олова в меди ( $\alpha$ -фаза). При большем содержании олова в структуре появляется эвтектид ( $\alpha+\delta$ ), где  $\delta$ -фаза – электронное соединение  $\text{Cu}_3\text{1Sn}_8$  со сложной кубической решеткой. Он имеет высокую твердость и хрупкость, его появление в сплаве вызывает резкое снижение пластичности и вязкости, повышает твердость и износостойкость. В микроструктуре двухфазных бронз эвтектид выглядит в виде темных образований по границам светлых зерен твердого раствора. Широкий интервал кристаллизации обуславливает у оловянных бронз большую склонность к дендритной ликвации, низкую жидкотекучесть, рассеянную усадочную пористость и поэтому невысокую герметичность отливок. Для улучшения свойств, в том числе технологических, а также для уменьшения стоимости бронзы легируют. Цинк растворяется в меди, улучшает литейные свойства бронз, удешевляет их. Свинец повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием. Фосфор, являясь раскислителем бронз, улучшает их жидкотекучесть, твердость, упругие и антифрикционные свойства, при этом ухудшает технологическую пластичность. Он образует фосфид меди  $\text{Cu}_3\text{P}$ . Никель способствует измельчению структуры, повышению механических свойств, коррозионной стойкости, плотности отливок и уменьшению ликвации. Оловянные бронзы превосходят медь и латуни по коррозионной стойкости, особенно в морской воде. Основными видами термической обработки являются гомогенизация и промежуточный отжиг, направленные на облегчение обработки давлением. Примерный состав и свойства некоторых бронз приведены в табл.1. Деформируемые бронзы (БрОФ6,5-0,15) применяют для изготовления упругих элементов (мембран, пружин), сеток в аппаратостроении. Бронзы с повышенным содержанием олова (литейные), особенно с добавками фосфора, используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников кранов, шестерен, червячных винтов и других деталей, работающих на трение. Алюминиевые бронзы получили наибольшее распространение как более дешевые заменители оловянных; имеют более высокие прочностные свойства, чем латуни и оловянные бронзы. Структура алюминиевых бронз соответствует диаграмме состояния системы медь-алюминий. При комнатной температуре в меди может раствориться примерно 9% алюминия, однако в реальных сплавах из-за ликвации предельная концентрация фазы  $\alpha$ -твердого раствора замещения алюминия в меди снижается до 8% и даже менее. При большем содержании алюминия в сплавах появляется эвтектид ( $\alpha + \gamma_2$ ), который получается в результате распада высокотемпературной фазы  $\beta$ . В результате этого прочность сплавов

повышается, а пластичность начинает падать. Оптимальные механические свойства имеют сплавы, содержащие от 5 % до 8 % алюминия. Узкий интервал кристаллизации определяет лучшую жидкотекучесть, меньшую склонность к ликвации, большую плотность отливок, но значительную усадку при кристаллизации и ряд других недостатков по сравнению с оловянными бронзами. Для улучшения свойств сплавы легируют. Железо повышает прочностные свойства бронз, как и 45 марганец, который одновременно повышает и пластичность, увеличивая способность к холодной обработке давлением и позволяя проводить ее для сплавов с содержанием алюминия более 7 %. Никель повышает механические свойства, коррозионную стойкость и жаропрочность бронз, делает возможным проведение упрочняющей термической обработки по режиму закалка с последующим старением. Одни алюминиевые бронзы применяют только как деформируемые (БрА5, БрАЖМц10-3-1,5), другие - только как литейные (БрАЖН11-6-6), третьи - и как деформируемые, и как литейные сплавы (БрА9Мц2Л). Деформируемые полуфабрикаты применяют в состоянии поставки, после дорекристаллизационного (для повышения упругих свойств) и рекристаллизационного отжига. Термически упрочняемой является бронза БрАЖН10-4-4 (закалка от 980 °С и старение при 400 °С), эта бронза сохраняет удовлетворительную прочность до температур от 400 °С до 500 °С. Наиболее пластичная и наименее прочная – бронза БрА5. Ее применяют для изготовления пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской воде, разменной монеты. Бронзу БрА10 применяют для фасонных отливок, прессованных изделий. Бронзы с большим (от 9 %) содержанием алюминия и добавками железа, никеля, марганца кроме твердого раствора имеют в структуре включения эвтектоида (до 35 %) и железосодержащей фазы  $FeAl_3$ , потому обладают повышенными прочностью и антифрикционностью. Из них изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, зубчатые колеса, седла клапанов, подшипники и т.д. Бериллиевые бронзы Отличаются уникальным сочетанием свойств: высокими пределами упругости и прочности, высокой тепло- и электропроводностью, коррозионной стойкостью в сочетании с повышенным сопротивлением усталости, ползучести и изнашиванию. Ценным свойством является отсутствие искры при ударе. Основным недостатком этих бронз является их высокая стоимость. Бериллий обладает уменьшающейся растворимостью в меди при понижении температуры (от 2,7 % до 0,2 % при комнатной температуре). В структуре бронзы БрБ2 при комнатной температуре в отожженном состоянии присутствует твердый раствор замещения бериллия в меди  $\alpha$  и включения  $\gamma$  - фазы на основе интерметаллида  $CuBe$ . Эта бронза эффективно упрочняется термической обработкой. После закалки с температур от 750 °С до 790 °С (соответствующих однофазной области) в воде структура бериллиевых бронз представлена пересыщенным твердым раствором, что позволяет легко деформировать ее без нагревания. Последующее старение при 330 °С в течение 2-5 ч вызывает распад пересыщенного раствора закалки и формированию дисперсных включений  $\gamma'$ -фазы, что приводит к повышению прочности. Еще большее упрочнение достигается в результате применения режима НТМО. Легирование бронз никелем (от 0,2 % до 0,5 %) и титаном (от 0,1 % до 0,25 %) позволяет снизить содержание дефицитного дорогого бериллия до 1,9 % без заметного снижения механических свойств (БрБНТ 1,7, БрБНТ 1,9). Из бериллиевых бронз применяют детали особо ответственного назначения: упругие элементы точных приборов, детали, работающие на износ (кулачки, шестерни, червячные колеса), подшипники, работающие при повышенных скоростях, давлениях и температурах, инструмент, не дающий искры. Свинцовые бронзы Свинцовые бронзы имеют наилучшие антифрикционные свойства и самую высокую теплопроводность из всех сплавов на основе меди, поэтому их широко применяют для изготовления высоконагруженных подшипников скольжения, работающих при высоких скоростях (в авиационных двигателях, дизелях, мощных турбинах). Наибольшее применение нашли бронзы с содержанием свинца от 25% до 30 %. Медь и свинец в твердом состоянии образуют эвтектику, структура сплава состоит из кристаллов меди и включений свинца, которые располагаются по границам зерен или заполняют междендритные пространства. Прочность и твердость свинцовых бронз невысока, поэтому их наплавляют на стальные трубы или ленты и уже из них изготавливают подшипники. Алюминий и его сплавы Алюминий – металл серебристо-белого цвета, имеет температуру плавления 660 °С. Кристаллическая решетка – гранцентрированный куб с периодом 0,40412 при комнатной температуре. Плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>, что позволяет отнести его к легким металлам. Алюминий имеет высокую тепло- и электропроводность, уступая серебру, меди и золоту; хорошо полируется. На поверхности металла находится оксидная пленка, защищающая его от действия влажной атмосферы и многих органических и

минеральных кислот-окислителей. В щелочных средах быстро растворяется. Производится алюминий особой чистоты А999, высокой чистоты А995, А99, А97, А95 и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, А0 (количество примесей возрастает соответственно от 0,001 % до 1 %). Наиболее вредной примесью является железо, образующее соединение  $FeAl_3$ , которое выделяется в виде игл и резко снижает пластичность и коррозионную стойкость алюминия. При наличии кремния могут образовываться в зависимости от состава два тройных соединения  $\alpha(Fe-Al-Si)$  и  $\beta(Fe-Al-Si)$ , имеющие высокую хрупкость и снижающие пластичность. Технический алюминий в отожженном состоянии имеет прочность 70-80 МПа, относительное удлинение около 35 %. Алюминий применяется для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется легкость, свариваемость, пластичность, коррозионная стойкость (рамы, двери, трубопроводы, фольга, цистерны, посуда). Он применяется для производства теплообменников, в электротехнике - для конденсаторов, проводов, кабелей, шин, для производства рефлекторов и т.д.

47 Алюминиевые сплавы К преимуществам большинства промышленных алюминиевых сплавов можно отнести невысокую плотность (до 2,85 г/см<sup>3</sup>), высокую удельную прочность, хорошую коррозионную стойкость, тепло- и электропроводность. В качестве основных легирующих элементов в алюминиевых сплавах применяют медь, магний, кремний, марганец, цинк, реже литий, никель, титан, бериллий, цирконий, железо и др. Большинство легирующих элементов образуют с алюминием ограниченные твердые растворы замещения с переменной растворимостью, а также промежуточные фазы с алюминием и между собой – двойные, тройные и многокомпонентные интерметаллиды. В зависимости от способа производства заготовок принято делить сплавы на деформируемые, литейные и спеченные, которые строго говоря являются разновидностью деформируемых. Сплавы могут быть не упрочняемыми и упрочняемыми термообработкой. Существует более подробное деление сплавов в соответствии с их свойствами (нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности и коррозионной стойкости, антифрикционные и т.д.). Литейные алюминиевые сплавы Эти сплавы применяются для фасонного литья. Наиболее широко распространены сплавы силумины на основе системы Al-Si (простые и сложные), для которых характерны малые интервалы кристаллизации и очень хорошие литейные свойства. В качестве литейных применяют также сплавы на основе систем Al-Cu, Al-Mg и другие более сложные сплавы, которые по составу похожи на аналогичные деформируемые, но содержат несколько больше Cu, Mg, а также тугоплавкие добавки (титан, никель). Однако эти сплавы обладают худшими литейными свойствами, поэтому далее будут рассмотрены только силумины. Маркировка литейных сплавов производится в соответствии с их химическим составом. Силумины подразделяют на двойные (простые) и специальные, в которых помимо кремния содержатся в небольшом количестве и другие легирующие элементы (медь, магний, марганец, никель). Структура простых силуминов определяется диаграммой состояния Al-Si. Кремний имеет переменную растворимость в алюминии (от 1,6 % до 0,1% при комнатной температуре), при содержании кремния 14% формируется эвтектика, состоящая из  $\alpha$ -фазы - твердого раствора кремния в алюминии и игольчатых кристаллов кремния -  $\beta$ -фазы. Она имеет грубое строение, что дает низкие значения прочности и пластичности сплавов (при содержании кремния 12 % предел прочности примерно 80 МПа, относительное удлинение 2 %). Улучшить свойства термической обработкой не удастся, поскольку простые силумины относят к числу термически не упрочняемых сплавов. Для повышения свойств применяется модифицирование силуминов добавками натрия, лития, стронция. Часто вводят натрий в виде смеси солей  $2/3 NaF + 48 1/3 NaCl$  в количестве примерно 2 %, чтобы в расплаве оказалось необходимых 0,01% Na (иногда его количество увеличивают до 0,08 %). Это приводит к резкому измельчению кристаллов эвтектического кремния, эвтектика становится мелкой, следствием чего является увеличение прочности и одновременно пластичности более чем в два раза. При этом понижается температура кристаллизации эвтектики более чем на 10 °С, и эвтектическая точка сдвигается в область меньших концентраций (11,6 % кремния). Поэтому эвтектический до модифицирования силумин приобретает после модифицирования структуру доэвтектического сплава со светлыми кристаллами первичного твердого раствора на темном фоне дисперсной эвтектики. Применяют модифицирование для сплавов с содержанием кремния более 6 %. Маркируют силумины в соответствии со средним химическим составом. Из дополнительных легирующих элементов в силуминах наибольшее значение имеют магний и медь, введение которых делает сплавы термически упрочняемыми. Магний образует фазу  $Mg_2Si$ , а при введении одновременно меди и магния могут существовать упрочняющие фазы S ( $Al_2CuMg$ ) и др.

Эвтектический силумин АК12, не упрочняемый термообработкой, не образует усадочной пористости, его рекомендуют применять для герметичных деталей приборов и агрегатов невысокой нагруженности. Однако образование концентрированных усадочных раковин вызывает трудности при отливке крупных и сложных по конфигурации деталей. Примером доэвтектического силумина является более прочный термоупрочняемый сплав АК9ч. Для него применяют закалку от 530 °С с выдержкой 2-6 ч и охлаждением в горячей воде и старение при 175 °С в течение 15 ч (этот режим термообработки характерен для большинства специальных силуминов). Применяют его для наиболее ответственных нагруженных крупногабаритных деталей, например, картеров двигателей внутреннего сгорания. Высоколегированный заэвтектический силумин АК21М2,5Н2,5 относят к группе поршневых сплавов (для изготовления поршней цилиндров двигателей внутреннего сгорания). В структуре этих сплавов присутствуют кристаллы первичного кремния на фоне эвтектики. Эти сплавы, предназначенные для работы при повышенных температурах 250-270°С, отличаются высокой жаропрочностью, износостойкостью и низким коэффициентом термического расширения. Магний и его сплавы Магний – металл с температурой плавления 650 °С, имеет гексагональную плотноупакованную решетку с соотношением  $c/a$  1,6235. Плотность составляет 1,74 г/см<sup>3</sup>. Тепло- и электропроводность магния хуже, чем у алюминия. Поверхность магния покрыта толстой пленкой оксида, которая не обладает достаточными защитными свойствами. Магний легко растворяется в органических и разбавленных минеральных кислотах, корродирует в морской воде, устойчив в органических жидкостях (бензин и т.д.). В дисперсном состоянии может самовоспламеняться на воздухе. Наиболее вредные примеси – железо, медь, никель, снижающие коррозионную стойкость, а железо – и без того невысокую пластичность. Технический магний (марки Мг96, Мг95, Мг90) имеет в деформированном и отожженном состоянии предел прочности 180 МПа. относительное удлинение от 15 % до 17 %. Как конструкционный материал в чистом виде не применяется. Магниево-алюминиевые сплавы Эти сплавы нашли применение в связи с малой плотностью (менее 2 г/см<sup>3</sup>) и достаточно высокой удельной прочностью. Их делят на деформируемые (МА) и литейные (МЛ). Цифры в марке – условный порядковый номер. Легирующие элементы образуют с магнием твердые растворы ограниченной переменной концентрации и различные интерметаллиды. В сплавы невысокой и средней прочности входят алюминий, цинк, которые упрочняют раствор и делают возможной упрочняющую термообработку сплавов, а также марганец, устраняющий вредное влияние железа. Цирконий существенно (до 100 раз) измельчает зерно, поэтому присутствует в составе высокопрочных и жаропрочных сплавов. РЗМ и иттрий повышают жаропрочность сплавов. Могут дополнительно присутствовать литий, кадмий, серебро, индий, бериллий. Магниево-алюминиевые сплавы подвергают гомогенизации при 400-490 °С в течение 10-24 ч, причем для деформируемых сплавов ее часто совмещают с их нагревом под обработку давлением, а высокопрочные сплавы закалывают от температур горячей деформации для сохранения эффекта наклепа. Рекристаллизационный отжиг проводят при 250-350 °С для устранения наклепа в деформированных заготовках. Особенности упрочняющей термической обработки магниевых сплавов объясняются малой скоростью диффузионных процессов в магнии. Выдержки при нагреве под закалку длительные (4-24 ч), охлаждение проводят на спокойном воздухе и иногда в кипящей воде. Старение применяют только искусственное (кроме сплавов с литием) продолжительностью 15-20 ч, в большинстве случаев выделяются сразу стабильные фазы (кроме сплавов с литием и неодимом). В сплавах с Al и Zn эффект упрочнения не превышает 30 %, а в сплавах с Nd и Li – более существенный. Высокопрочный деформируемый сплав МА14 подвергают искусственному старению при 170°С в течение 10-24 ч после охлаждения от температур горячей деформации (режим Т5). В структуре присутствуют дисперсные выделения фазы MgZn<sub>2</sub> на фоне  $\alpha$ -твердого раствора на базе магния. Применяют этот сплав для изготовления высоконагруженных деталей, работающих до 250 °С. Литейные магниевые сплавы по составам близки к деформируемым, уступая им по свойствам. Улучшение структуры и свойств достигается модифицированием, перегревом, повышением чистоты шихтовых материалов. Широко применяется сплав МЛ5, в котором сочетаются высокие механические и технологические свойства. Для него применяют закалку на воздухе от температур гомогенизации 420 °С (12 - 14 ч) и последующее старение при 175 °С в течение 16 ч. Структура его состоит из твердого раствора легирующих элементов в магнии и выделений фазы Mg<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>. Применяют его для изготовления нагруженных деталей, работающих, в том числе и в морской атмосфере (картеры, коробки передач, масляные насосы, тормозные барабаны, кронштейны, штурвалы). Сплав МЛ10 отличается

высокими свойствами при комнатной температуре, высокой жаропрочностью и технологическими свойствами. Он может длительно работать при температурах 250-350 °С, кратковременно до 400 °С. Для сплава применяют закалку на воздухе от 540 °С 8-12 ч и старение при 205 °С в течение 12-15 ч. В структуре сплава кроме твердого раствора на основе магния присутствуют дисперсные выделения упрочняющей фазы Mg<sub>9</sub>Nd. Применяют этот сплав для изготовления нагруженных деталей различных конструкций, двигателей, от которых требуется повышенная герметичность и стабильность размеров при высоких температурах. Титан – металл серого цвета, с температурой плавления 1668 °С, имеет при комнатной температуре плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>. Известны две полиморфные (аллотропические) модификации титана: до 882,5°С существует α -Тi с плотноупакованной гексагональной решеткой, а при более высоких температурах - β -Тi с объемноцентрированной кубической решеткой. Технически чистый титан производят марок ВТ1-00 (сумма примесей не более 0,1 %) и ВТ1-0 (сумма примесей не более 0,3 %). Предел прочности титана ВТ1-0 составляет 450-600 МПа, предел текучести 380-500 МПа, относительное удлинение 20-25 %. Присутствие в составе титана и его сплавов примесей азота, кислорода, углерода и особенно водорода значительно снижает пластичность (присутствие водорода вызывает так называемую водородную хрупкость, поэтому его количество не должно превышать 0,002-0,008%), коррозионную стойкость и технологические свойства титана. Аналогичным образом, но в меньшей степени, влияют на свойства железо и кремний. Титан хладостоек, характеризуется отличной коррозионной стойкостью в органических и большинстве минеральных кислот, простой и морской воде, хорошо деформируется и сваривается. При нагревании активно поглощает газы, применяется в качестве геттерного материала. Сплавы на основе титана

51 Титановые сплавы по сравнению с титаном обладают более высокой прочностью и жаропрочностью при достаточно хорошей пластичности, коррозионной стойкости и невысокой плотности (не более 5,1 г/см<sup>3</sup>). Легирующие элементы в титановых сплавах принято делить на три группы: α -стабилизаторы повышают температуру полиморфного превращения α -Тi в β -Тi, к ним относят алюминий; β –стабилизаторы понижают температуру полиморфного превращения. К этой группе относятся изоморфные элементы V, Mo, Ta, Nb и эвтектоидообразующие, в числе которых переходные металлы Fe, Mn, Cr. Последние оказывают наиболее эффективное упрочняющее действие. Эвтектоидный распад вызывает резкое охрупчивание сплавов, поэтому его стараются избегать. Нейтральные добавки (Sn, Zr, Hf, Th) мало влияют на температуру полиморфного превращения, улучшают свойства сплавов при нормальных и повышенных температурах. Алюминий присутствует во всех сплавах, поскольку не только упрочняет α-фазу и снижает плотность сплава, но и повышает термическую стабильность β-фазы. По структуре в равновесном состоянии различают α-сплавы; псевдо-α-сплавы; (α + β) –сплавы; β – сплавы; псевдоβ-сплавы (α -фаза – твердый раствор замещения легирующих элементов в α –Тi, β-фаза – твердый раствор замещения легирующих элементов в β -Тi). β –сплавы не нашли широкого распространения.. Титановые сплавы маркируют условным образом. В промышленности широко применяются деформируемые титановые сплавы, а также литейные и порошковые, которые в большинстве являются аналогами деформируемых сплавов по составу.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическим руководством.
2. Исследовать под микроскопом микроструктуры сплавов цветных металлов из лабораторной коллекции, определить структурные составляющие, используя фотоальбом и текст методического указания.
3. Ознакомиться по справочным данным с термической обработкой, свойствами и применением этих сплавов.
4. Оформить отчет, в котором схематично изобразить и описать микроструктуру каждого из изученных сплавов, привести данные по их химическому составу, режимам упрочняющей термообработки, свойствам и применению.

#### Контрольные вопросы

1. Какие группы медных сплавов вы знаете?
2. Какие легирующие элементы вводят в латуни? С какой целью? 3. В чем достоинства и недостатки оловянных бронз?
4. Какие бронзы заменяют оловянные?
5. Какова упрочняющая термическая обработка бериллиевой бронзы?

6. Какие группы алюминиевых сплавов вы знаете? К каким системам они относятся?
7. Из чего состоит упрочняющая термообработка алюминиевых сплавов?
8. Какие из литейных алюминиевых сплавов обладают лучшими литейными свойствами?
9. С какой целью и чем модифицируют силумины?
10. Каковы особенности упрочняющей термической обработки магниевых сплавов?
11. Какие группы легирующих элементов существуют в магниевых сплавах? Какое влияние на свойства они оказывают?
12. Какие группы легирующих добавок в титановых сплавах вы знаете?
13. Какова термическая обработка титановых сплавов?
14. Какие группы промышленных сплавов на основе титана вы знаете?
15. Что такое баббиты?
16. Какими свойствами обладают баббиты?
17. Какие баббиты вы знаете?

**Форма представления результата:** выполненная работа

**Критерии оценки:** зачет/незачет

**Тема 8.1 Медь и её сплавы. Алюминий и его сплавы. Сплавы на основе титана Практическая работа №10. Выбор марки сплавов цветных металлов для конкретных деталей**

*Цель работы:* подобрать сплавы цветных металлов для деталей машин

**ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Запишите условные обозначения легирующих элементов или их название в марках цветных металлов и сплавов (таблица 1)

Таблица 1

Наименование элемента	Обозначение	Наименование элемента	Обозначение
Алюминий			Н
Бериллий		Олово	
	Бо	Свинец	
Железо		Серебро	
	Кд		Су
	К		Т
Магний		Фосфор	
Марганец		Хром	
	М		Ц
Мышьяк		Редкоземельные	

1. Определите химический состав сплавов цветных металлов. Заполните таблицу 2

Таблица 2

Результаты работы по классификации и маркировке цветных сплавов

Марка материала	Наименование материала	Расшифровка материала
-----------------	------------------------	-----------------------

3. Расшифруйте марку **БрОЦС 4-4-4**

Номера вариантов ответов				
1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Бронза, 4% олова, 4% цинка, 4% свинца	Оловянистая бронза, 4% олова, 4% цинка, 4% свинца	Латунь, 4% олова, 4% цинка, 4% свинца	Бронза свинцовая, 4% олова, 4% цинка, 4% свинца	Бронза, 4% медь, 4% олова, 4% свинца

4. Что такое латунь?

- а) сплав меди с цинком
- б) сплав железа с никелем
- в) сплав меди с оловом
- г) сплав алюминия с кремния

#### **Контрольные вопросы**

1. Какие металлы относятся к цветным металлам?
2. На какие пять групп подразделяются цветные металлы?
3. Как подразделяются сплавы на основе меди?
4. Какие сплавы называются латунями и как они маркируются?
5. Какие сплавы называются бронзами и как они маркируются?
6. Какие сплавы на основе алюминия относятся к литейным и деформируемым сплавам и как они маркируются?
7. Что такое титан? Как маркируются титановые сплавы?
8. Способы получения титана
9. Магниевого сплавы и как они маркируются?
10. Способы получения магния