

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| Лабораторная работа №1. Изучение основ микроструктурного анализа металлов и сплавов с применением оптического микроскопа..... | 5  |
| Лабораторная работа №2. Технология термообработки углеродистой стал.....  | 9  |
| Часть I. Основы теории и практика термообработки стали.....   | 9  |
| Часть II. Исследование структуры закаленной и отожженной углеродистой стали.....  | 13 |
| Лабораторная работа №3. Механические свойства и пластическая деформация металлов и сплавов.....                               | 15 |
| Литература.....   | 23 |

## Введение

Настоящее пособие к выполнению лабораторных работ предназначено для студентов – будущих инженеров в области технической эксплуатации различных металлоконструкций оборудования аэропортов, заправочных комплексов, авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, а также транспортного оборудования и УВД. Поэтому в рамках отведенного учебными программами времени основной целью лабораторного практикума является исследование свойств основных групп современных материалов, применяемых в металлоконструкциях авиационной отрасли в приборном оборудовании воздушных судов в условиях комплексного воздействия на них эксплуатационных факторов. Особое внимание при этом уделяется формированию у обучаемых понимания физической сущности процессов, которые приводят к изменению рабочих характеристик элементов металлоконструкций и устройств в процессе длительной их эксплуатации, а также умению анализировать причины отказа и принимать решение о выборе и замене материалов авиационного оборудования.

При подготовке настоящего руководства использован материал, изложенный в следующих работах:

1. Тихомиров И.Н., Тимошин И.А., Мымриков А.В., Тутнова Е.В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по электроматериаловедению. - М.: МГТУ ГА, 1996.
2. Дубинин Г.Н., Воскобойникова Л.С., Тутнова Е.В. Руководство к лабораторным работам по курсу «Авиационное материаловедение».- М.: МГТУ ГА, 2008.

## **Лабораторная работа №1**

### **Изучение основ микроструктурного анализа металлов и сплавов с применением оптического микроскопа**

**Цель работы:** Ознакомится с основами микроструктурного анализа элементов металлоконструкций и деталей при производстве экспертных исследований авиационной техники.

**Задачи работы:**

1. Изучить устройство, возможности и принцип работы металломикроскопа.
2. Изучить диаграмму состояния системы сплавов железо-углерод.
3. Описать микроструктуры шлифов различных сталей и чугунов, сопровождая фотографии структур данными о фазовом составе исследуемых сплавов.

#### **Микроструктурный анализ сплавов системы «железо-углерод»**

Среди разнообразных методов исследования и испытаний, необходимых для получения достаточно полной информации о свойствах металлов и сплавов, очень важное значение имеют структурные методы. Они позволяют, используя надежно установленные связи между структурой и свойствами материалов, с одной стороны, и между структурой и технологией изготовления деталей и соединений, с другой стороны, судить о качестве деталей и соединений и соответствии металла и технологи их изготовления конструкторско-технологическим требованиям. В конечном счете это позволяет повысить надежность изделий. Кроме того, анализ структуры необходим при экспертных исследованиях причин отказов (особенно аварий и поломок), а также в научных исследованиях при поиске наиболее эффективных конструктивных решений технологических процессов.

Под **структурой металлов** понимается их внутреннее строение на различных уровнях, например: строение кристаллической решетки какой-либо фазы; строение сложной составляющей, представляющей несколько фаз, и особенности состава и строения изделия в целом (макроструктура). При этом, понимая, что образование структуры металлов и сплавов происходит не только при переходе металлов из жидкого состояния в твердое, но и в твердом состоянии при различных внешних воздействиях (температура, давление и т.д.). Известно, что изменение структуры и фазового состава металлов и сплавов ведет к изменению свойств.

**Фазой** называют части сплава, которые имеют одинаковый состав, строение (следовательно, и свойства) и отделены от других частей поверхностями раздела. Каждая фаза в металлическом сплаве может быть представлена совокупностью многих кристаллов, называемых зернами. В сплавах какая-либо фаза может быть и неодинаковой по химическому составу в разных частях зерна или изделия. В этом случае химический состав по сечению

зерна или детали изменяется непрерывно, но тип кристаллической решетки остается неизменным во всех точках тела, принадлежащих к одной фазе.

**Структурная составляющая** – часть структуры сплава, характеризующаяся одинаковым средним химическим составом и однообразными расположением и формой зерен образующих ее фаз (или фазы). Структурные составляющие могут возникать в результате фазовых превращений и технологических процессов.

Знакомство с содержанием и методикой проведения микроструктурных исследований в настоящей лабораторной работе проведем на примере анализа структуры железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов).

Фазовый состав и структурные составляющие железоуглеродистых сталей в равновесном состоянии описываются диаграммой состояния железо-углерод (рис.1.1). Контур стальной части диаграммы железо-углерод впервые установил выдающийся русский ученый Д.К. Чернов.

Диаграмма состояний Fe-C ограничивается сплавами, содержащими 6,67% C, поскольку при этой концентрации образуется химическое соединение – карбид железа  $Fe_3C$  или цементит, который удобно рассматривать как второй компонент системы, поскольку сплавы с большим содержанием углерода не пригодны для практического применения. Сплавы, содержащие до 2,14% углерода, называются **сталями**, а сплавы, содержащие от 2,14% до 6,67% углерода, - **чугунами** (рис.1.1).

В структуре сплавов системы *Fe-C* различают следующие составляющие:

- **цементит**, или карбид железа,  $Fe_3C$  – промежуточная фаза постоянного состава, содержащая 6,67% углерода. Кристаллическая решетка цементита орторомбическая;

- **феррит** - твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе ( $Fe_\alpha$ ) или в  $\beta$ -железе ( $Fe_\beta$ ). Кристаллическая решетка феррита кубическая объемно-центрированная.

- **аустенит** - твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе ( $Fe_\gamma$ ). Кристаллическая решетка аустенита кубическая гранецентрированная.

*Линии диаграммы:* *AC* – начало кристаллизации аустенита; *CD* – начало кристаллизации первичного цементита; *AE* – конец кристаллизации аустенита; *ECF* – эвтектическая линия; *GS* – начало образования феррита из аустенита; *SE* – линия предельного содержания углерода в аустените; *GP* – конец перекристаллизации аустенита в феррит; *PQ* – линия предельного содержания углерода в феррите или начала выделения третичного цементита; *PSK* – перлитная, или эвтектоидная, линия.

**Эвтектика** – механическая смесь кристаллов аустенита и цементита при 1147°C.

**Перлит** – механическая смесь кристаллов феррита и цементита образуется при 727°C во время охлаждения аустенита, содержащего 0,8% углерода.

При охлаждении чугунов на линии *PSK* в результате образования перлита из аустенита эвтектики образуется **ледебурит**, включающий перлит и цементит

эвтектики.

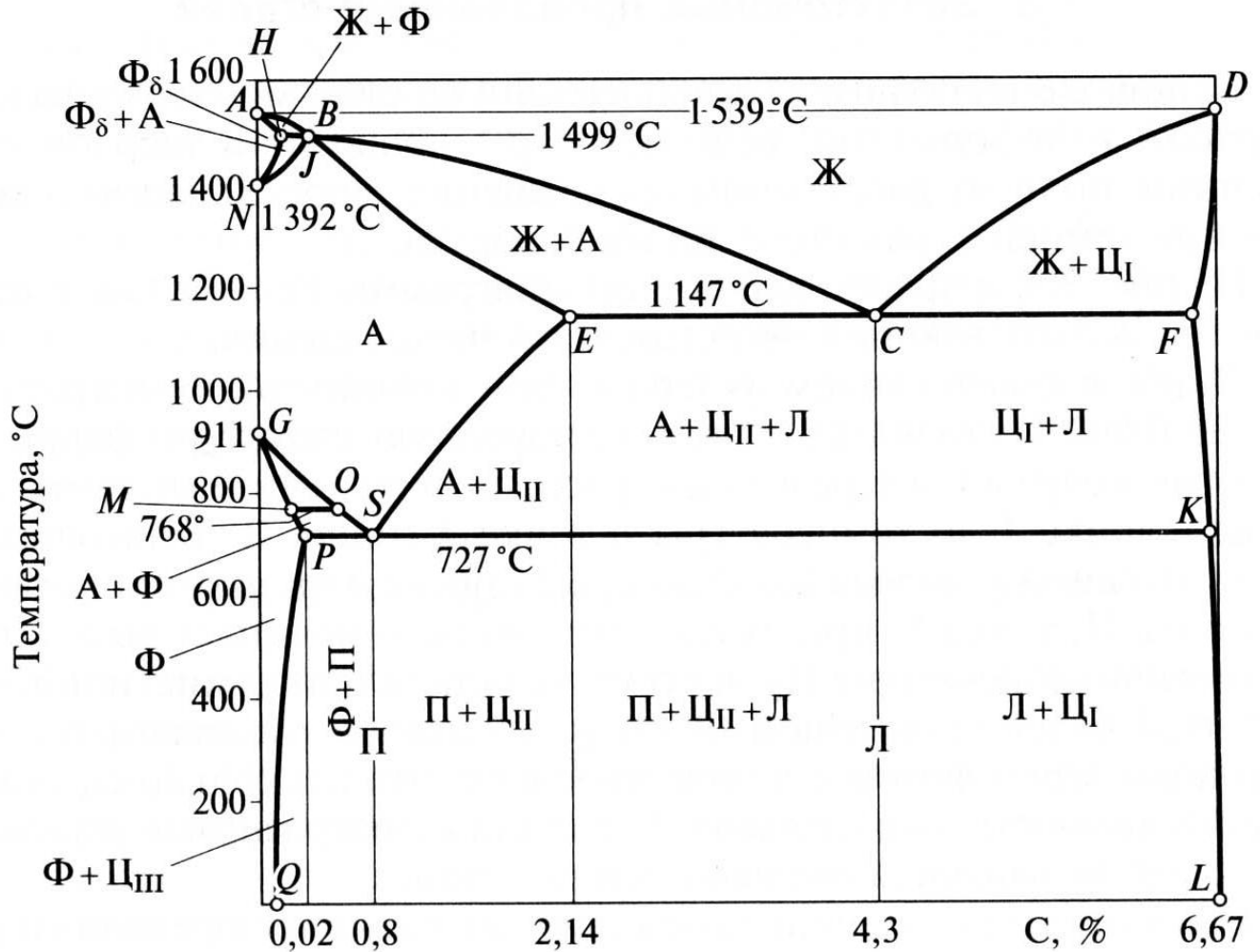


Рис.1.1 Диаграмма состояния системы железо-углерод

### Аппаратура и методика исследования

Микроструктурный анализ заключается в изучении структуры материала с помощью оптического металломикроскопа при увеличении от 100 до 2000 раз, которые устроены по принципу наблюдения объектов в отраженном свете. Принцип получения изображения структуры различных сплавов изучается по оптической схеме металломикроскопа.

Изучение микроструктуры производится на микрошлифах – образцах, вырезаемых из исследуемой детали. Предварительная подготовка шлифов включает вырезку и подготовку образцов для удобного обследования, шлифование наждачной бумагой с зернами абразива различных размеров, полирование на специальных станках с использованием окиси никеля или хрома. После полирования шлифы промываются водой и спиртом. Приготовленные шлифы для защиты от окисления хранят в эксикаторах.

Микроструктурный анализ проводится вначале на нетравленных, а затем на травленных шлифах. Исследование нетравленных шлифов позволяет выявить степень загрязнения металлов, обнаружить микротрещины, поры и другие

подобные дефекты.

С целью исследования собственной структуры материала шлифы подвергают легкому травлению. Травление шлифов проводится в малоконцентрированных реактивах при комнатной температуре и незначительной продолжительности травления (р-р 4% азотной кислоты в спирте в течение 40 секунд). В результате такой обработки шлифа за счет того, что более интенсивно растворяются места шлифа, имеющие более низкий электродный потенциал, выделяются границы зерен, различные фазовые и структурные составляющие. В разной степени растворившиеся участки по-разному рассеивают световые лучи и поэтому при наблюдении с помощью микроскопа одни участки, например, границы зерен и фазы, более подвергшиеся травлению, кажутся более темными, чем остальные.

### **Методические указания по выполнению лабораторной работы**

После ознакомления с принципом действия металломикроскопа и методикой изготовления шлифов, студенту предоставляется комплект шлифов различных сплавов системы Fe-C для изучения и описания микроструктуры. Представленные в отчете фотографии микроструктур должны быть описаны. Структурные составляющие указываются стрелками. Отчет должен содержать чертеж диаграммы состояния Fe-C и ее анализ. Структурные составляющие должны быть объяснены. В бланке отчета ответить на все поставленные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определения следующих структурных составляющих в сплавах системы железо-углерод: а) феррит; б) аустенит; в) перлит.
2. Пользуясь правилом фаз построить кривые охлаждения для чистого железа и сплавов с 0,6%; 0,8%; 1,2%; 3,4%С.
3. В чем состоит задача микроструктурного анализа?
4. Какую величину увеличения можно реализовать на современных металломикроскопах?
5. Из каких подготовительных операций состоит процесс подготовки микрошлифа?
6. Что можно увидеть в микроскоп на нетравленном микрошлифе?
7. С какой целью микрошлифы подвергаются слабому травлению?
8. Что можно изучать с помощью металломикроскопа на микрошлифе, подвергнутом легкому травлению?

## Лабораторная работа №2 Технология термообработки углеродистой стали

**Цель работы:** Ознакомление с основными видами термической обработки – отжиг, нормализация, закалка, отпуск стали.

### Задачи работы:

1. Выявление влияния температуры закалки, скорости охлаждения при закалке и температуры отпуска на строение (структуру) и свойства среднеуглеродистой стали.
2. Исследование микроструктуры (строение) среднеуглеродистой термически обработанной стали с целью определения режима термической обработки.

### Часть I

#### Основы теории и практика термообработки стали

**Полный отжиг доэвтектоидной стали** заключается в нагреве стали до температуры выше  $A_{c3}$  на 30–50°C (рис.2.1), выдержке при данной температуре и последующем медленном охлаждении (вместе с печью). После отжига получают сталь со структурой феррит и перлит.

**Отжиг заэвтектоидной стали**, во избежание перегрева, проводят при температуре на 30–50°C выше  $A_{c1}$ . Получают структуру, состоящую из перлита и цементита вторичного.

**Нормализация** состоит в нагреве доэвтектоидной стали до температуры выше точки  $A_{c3}$  на 30–50°C, а заэвтектоидной стали выше  $A_{cm}$  на 30–50°C, выдержке и охлаждении на воздухе. После нормализации получается более тонкая структура эвтектоида – перлита. Такой перлит называют сорбитообразным.

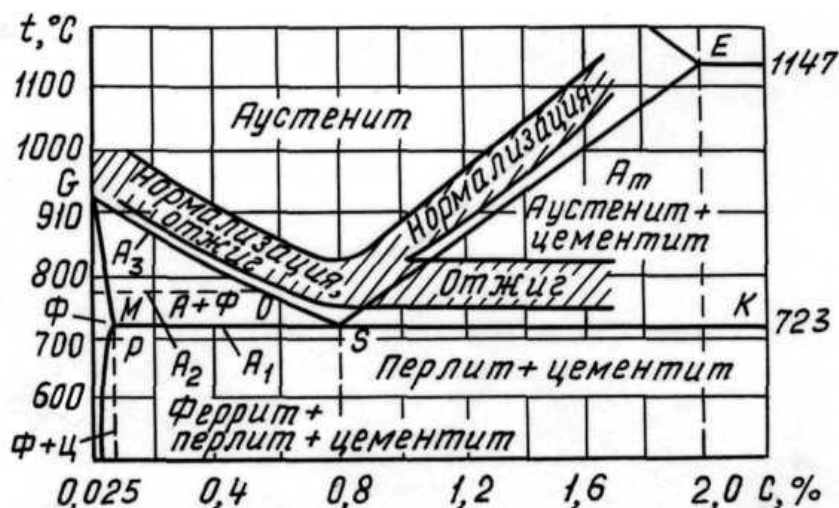


Рис.2.1. Выбор температуры закалки, отжига и нормализации углеродистых сталей по диаграмме состояния железо-углерод

**Закалка** состоит в нагреве стали выше точки  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$ , выдержке при этой температуре и последующем быстром охлаждении (в воде, масле,

растворах солей и т.д.). Это **полная закалка**. При нагреве стали выше  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$  она имеет структуру аустенит, который при охлаждении с различными скоростями превращается в соответствующие закалочные структуры - мартенсит, троостит или сорбит.

При увеличении скорости охлаждения снижаются температуры критических точек стали (рис.2.2), образуются различные структуры: перлит; сорбит; троостит; мартенсит + троостит; мартенсит.

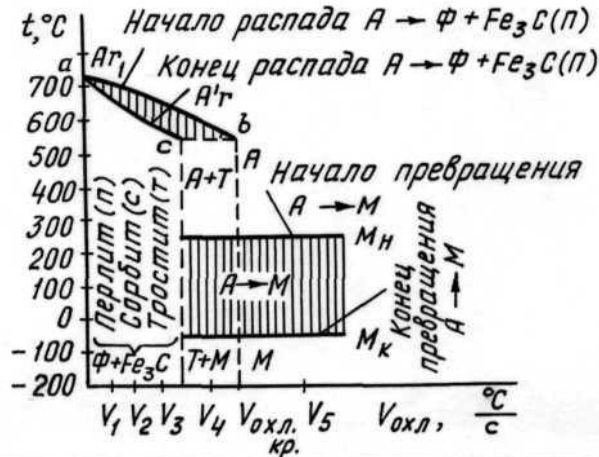


Рис.2.2. Диаграмма снижения критических точек стали, содержащей 0,8% углерода, при закалке

При скорости охлаждения  $V_1$  происходят два процесса: *диффузия углерода*, сопровождающаяся образованием частиц цементита, и *полиморфное превращение* решетки ГЦК аустенита в ОЦК феррита.

При увеличении скорости охлаждения наблюдается снижение критических точек и уменьшение размеров частиц феррита и цементита в перлите.

Структуры троостита и сорбита, полученные при отпуске, имеют зернистое строение в отличие от троостита и сорбита, полученных при закалке и имеющих пластинчатое строение. Зернистые структуры имеют более высокие предел текучести и ударную вязкость.

**Отпуск стали** - это термическая обработка, при которой происходит распад неустойчивых структур, полученных в результате закалки. Отпуск стали производят путем нагрева до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержки и охлаждения. Отпуск закаленной на мартенсит стали приводит к повышению пластичности, вязкости и уменьшению твердости и прочности. Сталь приобретает более устойчивые структуры троостит или сорбит.

При температурах 150–200°C производится **низкий отпуск** и образуется структура мартенсит отпуска.

При температурах 350–500°C производится **средний отпуск** и образуется структура троостит отпуска.

При температурах **высокого отпуска** (500–680°C) образуется структура сорбит отпуска. При этом твердость и прочность становятся меньше, чем у троостита, а пластичность и ударная вязкость - возрастают.



### Технология термической обработки стали

Основными технологическими факторами, определяющими качество закалки, являются температура закалки, время выдержки при температуре закалки, среды для нагрева и охлаждения и способ охлаждения.

Температуру закалки выбирают в зависимости от содержания углерода такой, чтобы после закалки получить максимальную твердость. Для стали 45 она назначается на 30–50°C выше  $A_{c3}$ . Время выдержки в печи выбирается таким, чтобы обеспечить прогрев и завершение фазовых превращений, при этом не должно быть чрезмерного роста зерна аустенита и обезуглероживания.

Охлаждение при закалке должно обеспечить получение структуры мартенсита в пределах заданного сечения детали. Охлаждение не должно вызвать трещин, деформаций, чрезмерных напряжений растяжения в поверхностном слое. Для получения мартенситной структуры охлаждающая среда должна быть такой, чтобы скорость охлаждения была больше критической. Скорость охлаждения при закалке зависит от охлаждающей среды (табл.2.1.).

Таблица 2.1

Скорость охлаждения стали в различных средах

| Закалочная среда                        | Скорость охлаждения, °C/с |                 |
|---|---------------------------|-----------------|
|   | от 650 до 550°C           | от 300 до 200°C |
| Вода при 18°C                           | 600                       | 270             |
| Вода при 74°C                           | 300                       | 200             |
| 10% раствор <i>NaOH</i> в воде при 18°C | 1200                      | 300             |
| Минеральное масло                       | 100-150                   | 20-50           |

Твердость мартенсита среднеуглеродистой стали составляет 600 НВ.

Часто мартенсит является промежуточной структурой при термической обработке многих стальных авиационных деталей, которые вначале закалывают на мартенсит, а затем отпускают на троостит или сорбит.

Троостит может быть получен путем закалки стали в мягких закалочных средах (в масле, подогретой воде и др.) либо путем отпуска предварительно закаленной на мартенсит стали. Часто троостит наблюдается в структуре вместе с мартенситом. Твердость троостита среднеуглеродистой стали составляет 350–450 НВ, а по сравнению с мартенситом он имеет более высокую ударную вязкость.

Сорбит получают обычно при высоком отпуске закаленной на мартенсит стали или путем закалки стали в сравнительно мягких средах (горячая вода, подогретое масло и т.д.). По сравнению с перлитом зерна феррита и цементита в сорбите существенно мельче. Сорбит сочетает высокую вязкость с достаточной прочностью. Твердость сорбита среднеуглеродистой стали составляет 300 НВ, а ударная вязкость 0,8-1,2 МДж/м<sup>2</sup>.

Заэвтектоидные стали под закалку нагревают выше  $A_{c1}$  на 30–50°C, то есть подвергают неполной закалке. После закалки заэвтектоидной стали в воде

получают мелкоигольчатый мартенсит и вторичный цементит.

Отпуск является окончательной операцией термической обработки. Для уменьшения внутренних напряжений проводят низкий отпуск с нагревом закаленной на мартенсит стали до температур 150–250°C. Получают структуру отпущенный мартенсит. При этом прочность падает, пластичность повышается.

Для получения структуры троостит (или троосто-мартенсит) проводят средний отпуск закаленной на мартенсит стали при температуре 350–500°C.

Для получения структуры сорбит проводят высокий отпуск при температурах 500–680°C. При этом мартенсит превращается в сорбит отпуска, почти полностью снижаются остаточные напряжения, возникшие при закалке, возрастают пластичность и вязкость стали при достаточно высокой прочности. Изменяя режим отпуска, можно получить материал с заранее заданными механическими свойствами.

При термической обработке стали могут возникать различные дефекты. Наиболее распространенными являются: перегрев, пережог, обезуглероживание, напряжения и трещины, изменения формы, недостаточная твердость.

### **Методические указания по выполнению I части лабораторной работы**

Для занятия в термическом отделении лаборатории студентам предоставляются муфельные электрические печи, нагретые до различных температур, образцы из стали 45, ванны с закалочными средами, приборы Роквелла для измерения твердости и наждачная бумага для чистки образцов от окалины.

Студенты предварительно определяют твердость стали марки 45 в исходном состоянии на приборе Роквелла, а затем производят термическую обработку образцов: закалку с различных температур в воде и закалку с температуры 850°C в масле и на воздухе, а также отпуск при различных температурах. По полученным экспериментальным данным в журнале строят три кривые. *Первую кривую* – зависимость твердости образцов после закалки в воде от температуры закалки 600, 690, 750, 850 и 1000°C. *Вторую кривую* – строят по значениям твердости образцов после закалки с температуры 850°C в воде, масле и на воздухе в зависимости от скорости охлаждения. *Третью кривую* – строят по значениям твердости образцов закаленной на мартенсит стали от температуры отпуска при 200, 350, 500 и 600°C.

В журнале необходимо объяснить влияние температуры закалки, скорости охлаждения при закалке, температуры отпуска на структуру и твердость стали.

## Часть II

### Исследование структуры закаленной и отожженной углеродистой стали

Структуру мелкоигльчатого мартенсита получают путем нагрева стали до температуры на  $30-50^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$ , выдержки и быстрого охлаждения в холодной воде. При этом мелкозернистый аустенит превращается в мелкоигльчатый мартенсит с максимальной твердостью (рис.2.3).

При значительном перегреве стали выше  $A_{c3}$  зерно аустенита укрупняется, и при резком охлаждении в холодной воде крупнозернистый аустенит превращается в крупноигльчатый мартенсит (рис.2.4), с низкой твердостью и ударной вязкостью.

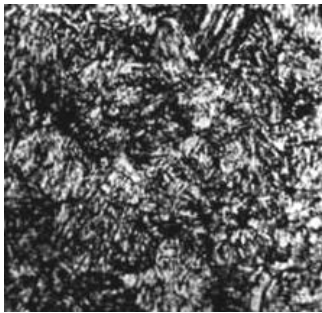


Рис.2.3. Микроструктура мартенсита мелкоигльчатого (x300)

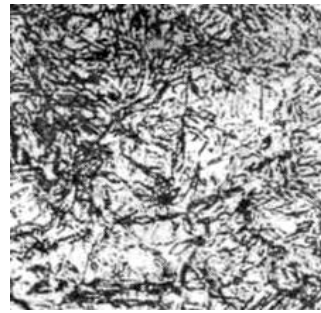


Рис.2.4. Микроструктура мартенсита крупноигльчатого (x300)

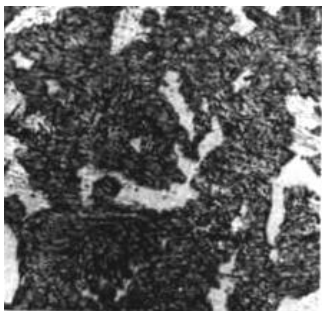


Рис.2.5. Микроструктура доэвтектоидной стали марки 45 после неполной закалки: мартенсит (темный) и феррит (x300)



Рис.2.6. Микроструктура тростомартенсита: тростит (темный) и мартенсит (x300)

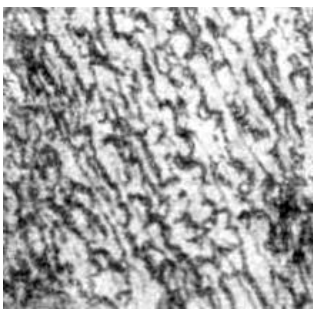


Рис.2.7. Электронная микрофотография тростита (x10000)

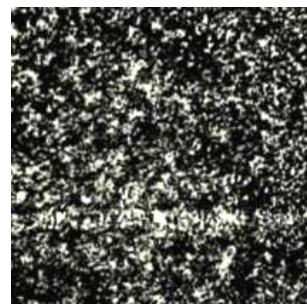


Рис.2.8. Микроструктура сорбита (x300)

Структуру стали мартенсит + феррит получают при нагреве стали до температуры выше  $A_{c1}$  и ниже  $A_{c3}$ , например, до  $750^{\circ}\text{C}$ , когда нагретая сталь имеет строение феррит + аустенит, выдержке и последующем охлаждении в холодной воде. При этом аустенит превращается в мартенсит, а феррит сохраняется в структуре без изменений (рис.2.5). Структура мартенсита более темная, а феррита – светлая.

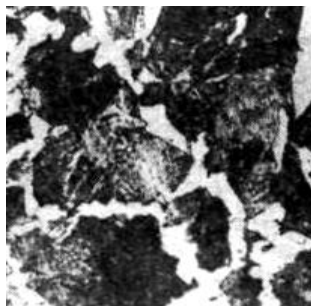


Рис.2.9. Микроструктура стали марки 45 после нормализации: сорбитообразный перлит и феррит (светлый) (x300)

Структуру троосто-мартенсита (рис.2.6) получают путем нагрева стали 45 до температуры на  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$ , выдержки и последующего охлаждения в более мягких закалочных средах, в холодном масле или подогретой воде. Троостит имеет более темную окраску, а мартенсит – более светлую. Для того чтобы более четко рассмотреть частицы высокодисперсной смеси феррита и цементита, структуру троостита изучают на электронном микроскопе (рис.2.7).

Структуру сорбита стали 45 можно получить при закалке с температуры на  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$  в горячем масле или кипящей воде (рис.2.8). Эту структуру называют сорбит закалки. Для получения сорбита отпуска закаленную на мартенсит сталь подвергают высокому отпуску при температурах  $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$ . При этом твердость стали снижается, а вязкость возрастает.

Структуру сорбитообразного перлита и феррита получают путем нагрева стали 45 до температуры на  $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c3}$  (рис.2.9.), выдержки и охлаждения на воздухе, то есть при нормализации.

### **Методические указания по выполнению части II лабораторной работы**

Для занятия в лаборатории студентам предоставляются металлографические микроскопы, комплект микрошлифов стали марки 45 после различных видов термической обработки; набор фотографий микроструктур стали, карточка, в которой указана марка стали, содержание углерода, число твердости по Бринеллю, а также набор укрупненных фотографий микроструктур, диаграмма состояния сплавов системы железо-углерод.

В лаборатории студенты практически изучают строение термически

обработанной углеродистой стали 45 и определяют вероятный режим термической обработки.

Студент должен ответить на следующие основные вопросы и выполнить задания:

Дать определение структур: мартенсита, троостита, сорбита.

Назвать режимы термической обработки для получения структур мартенсита мелкоигольчатого и грубоигольчатого, троостита и сорбита.

Какая структура стали 45 получается после закалки в воде с температур 750, 850 и 1000°C?

Какая структура стали марки 45 получается после отпуска при температурах 200, 450 и 600°C?

Нарисовать диаграмму снижения критических точек при закалке стали, содержащей 0,8% С.

Нарисовать дилатометрическую кривую отпуска стали, содержащей 0,8% С.

Нарисовать кривую изменения твердости стали 45 после закалки в воде с температур 690, 750, 850 и 1000°C.

После выполнения работы с каждым микрошлифом студент должен указать в журнале режим вероятной термической обработки стали 45.

### **Лабораторная работа №3**

#### **Механические свойства и пластическая деформация металлов и сплавов**

**Цель занятия:** Изучение механических характеристик металлов при статическом сжатии и механизма пластической деформации.

Знакомство с методикой определения твердости по Бринелю, Роквеллу, Виккерсу и исследование влияния основных факторов на твердость.

#### **Задачи работы:**

1. Изучить микроструктуры образцов из малоуглеродистой стали во время испытания на сжатие и определить предел текучести при сжатии.

2. Определение твердости четырех образцов из углеродистых сталей с различным содержанием углерода после отжига и закалки и двух отожженных образцов из цветных металлов латуни Л68 и дуралюмина Д16.

#### **Механические свойства**

Механическими свойствами называют параметры, характеризующие поведение материалов под действием механических нагрузок.

**Прочность** – способность материалов сопротивляться пластической деформации и разрушению.

Численные выражения механических свойств обычно называют механическими характеристиками. При определении значений механических характеристик пользуются понятиями напряжение, деформация.

**Напряжением** называют приложенную к телу нагрузку, отнесенную к единице площади сечения. Напряжение выражают в  $\text{Н/мм}^2$  либо в МПа. ( $1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,806 \text{ Н/мм}^2$ ;  $1 \text{ Н/мм}^2 = 1 \text{ МПа}$ )

При растяжении цилиндрического стержня под влиянием осевой нагрузки первоначальная длина стержня  $l_0$  увеличивается до  $l_i$ .

Абсолютная деформация:  $\Delta l = l_i - l_0$ .

Относительная деформация:  $\varepsilon = \Delta l / l_0$ .

Рассмотрим диаграмму растяжения малоуглеродистой стали (рис.3.1). Первый участок  $OA$  диаграммы растяжения характеризуют пределами упругости и пропорциональности.

**Упругость** – свойство материала внутренними силами восстанавливать первоначальную форму, искаженную внешним воздействием, после прекращения этого воздействия.

В области упругих деформаций связь между напряжением  $\sigma$  и деформацией  $\varepsilon$  описывается **законом Гука**  $\sigma = E\varepsilon$ .

Коэффициент пропорциональности  $E$  называется модулем **нормальной упругости** или **модулем Юнга**.

**Предел упругости**  $\sigma_{0,05}$  – напряжение, соответствующее появлению остаточных деформаций, равных 0,05% от первоначальной длины образца.

**Предел пропорциональности**  $\sigma_{\text{пц}}$  – напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой «нагрузка – удлинение», в точке  $P_{\text{пц}}$  с осью нагрузок увеличивается на 50% от своего значения на упругом (линейном) участке.

Вблизи точки  $A$  определяют предел текучести.

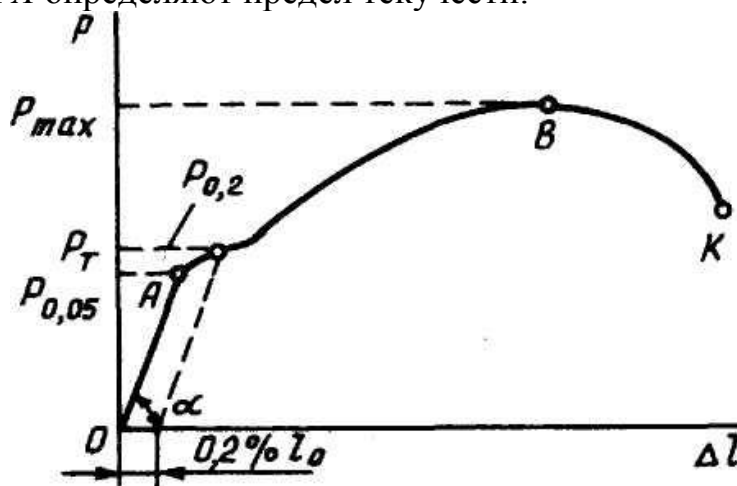


Рис.3.1. Диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали

**Предел текучести физический**  $\sigma_T$  – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей

нагрузки.

**Предел текучести условный  $\sigma_{0,2}$**  – это напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2% расчетной длины образца  $l_0$ . Нагрузку  $P_{0,2}$  при условном пределе текучести определяют в точке пересечения диаграммы с прямой, проведенной параллельно линии  $OA$  из точки на оси абсцисс, удаленной от начала координат на 0,2%  $l_0$ . Предел текучести характеризует сопротивляемость материала малым пластическим деформациям и является важным показателем прочности.

На участке  $AB$  диаграммы имеет место равномерная по всему образцу деформация, которая остается после снятия нагрузки. В точке  $B$  диаграммы нагрузка достигает максимального значения  $P_{\max}$ . Эту величину используют для определения  $\sigma_B$  - временного сопротивления разрыву:  $\sigma_B = P_{\max}/F_0$

**Временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_B$**  – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрушению образца, характеризует наибольшую нагрузку, которую может выдержать материал, и является одной из важных характеристик его прочности.

На участке  $BK$  диаграммы происходит уменьшение нагрузки, хотя максимальные истинные напряжения растут. Это происходит потому, что деформация локализуется на небольшом участке образца. Образуется шейка. В точке  $K$  образец разрушается. В результате испытания на растяжение определяют и характеристики пластичности металла.

**Пластическая деформация** – остаточное изменение формы или размеров нагруженного тела, не сопровождающееся нарушением сплошности.

**Пластичность** – свойство материала претерпевать большую пластическую деформацию без разрушения.

$$\text{Относительное удлинение: } \delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100, \%$$

где  $l_0$  – расчетная длина образца до испытания;  $l_k$  – длина расчетной части образца после испытания до разрушения.

$$\text{Относительное сужение: } \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100, \%$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до испытания;  $F_k$  – минимальная площадь сечения после разрыва.  $\delta$  и  $\psi$  являются мерами пластичности материала.

**Твердость** – свойство материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела.

Сущность метода испытания состоит в том, что в образец (деталь) вдавливают специальный твердый наконечник - индентер (из закаленной стали, алмаза или твердого сплава) различной формы (шарик, конус, пирамида). После

снятия нагрузки остается отпечаток, величина которого характеризует твердость. По значению твердости материала можно составить представление об уровне его свойств. Для измерения твердости вдавливанием используют методы Бринелля - ГОСТ 9012-59, Роквелла - ГОСТ 9013-59 и Виккерса - ГОСТ 2999-75. В зависимости от целей испытания, свойств металла, размеров образца выбирают форму, размер и материал индентора, величину и длительность приложения нагрузки.

### **Определение твердости по Бринеллю.**

Твердость по Бринеллю выражается отношением приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности сферического отпечатка  $F$  (рис.3.2.а). При определении твердости используют в качестве индентора стальные шарики.

Площадь сферического отпечатка:  $F = \pi D \left( \frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - d^2} \right)$ ,

где:  $D$  - диаметр шарика;  $d$  - диаметр отпечатка в мм.

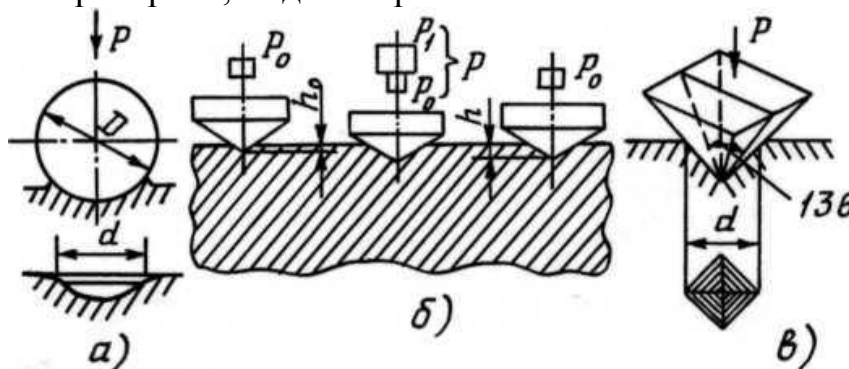


Рис.3.2. Схема измерения твердости: а - методом Бринелля; б - методом Роквелла; в - методом Виккерса

Диаметр шарика выбирают в зависимости от твердости испытываемого материала: чем тверже материал, тем меньше должен быть диаметр шарика.

Результаты испытания записывают следующим образом. Если испытания проводили шариком диаметром 10 мм под нагрузкой 29400 Н (3000 кгс) и выдержке, равной 10 секунд, то число твердости записывается с символом *HB*. Например, твердость стали 350 *HB*. Если условия испытания иные, то это показывается соответствующими индексами. Например, число твердости 230, полученное при испытании шариком диаметром 5 мм при нагрузке 7360 Н (750 кгс), выдержке, равной 10 секундам, записывается так: 230 *HB*-5/750/10.

Метод Бринелля применяют для определения твердости металлов, если величина твердости не превышает 450 *HB*.

### **Определение твердости по Роквеллу**

Величина твердости по Роквеллу выражается разницей между условной глубиной внедрения  $h_0$  и глубиной проникновения  $h$  под действием дополнительной нагрузки  $P$  (после снятия дополнительной нагрузки), при



сохранении предварительной  $P_0$  (рис.3.2б).

Для всех случаев измерения твердости по Роквеллу предварительная нагрузка  $P_0 = 98,1$  (10 кгс). При измерении твердости применяют алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик с диаметром 1,588 мм. За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм. Общая нагрузка  $P = P_0 + P_1$  составляет: для шарика 981 Н (100 кгс) - шкала *B* - *HRB*; для алмазного конуса 1471 Н (150 кгс) - шкала *C* - *HRC* или 588 Н (60 кгс) - шкала *A* - *HRA*. По шкале *B* (красного цвета) определяют твердость сравнительно мягких материалов с твердостью от 60 до 230 *HB*, по шкалам *C* и *A* (черного цвета) - материалов, имеющих твердость от 230 до 700 *HB*.

### **Определение твердости по Виккерсу**

Твердость по Виккерсу выражается отношением испытательной нагрузки  $P$  к площади боковой поверхности отпечатка четырехгранной пирамиды (рис.3.2в).

При измерении твердости в образец вдавливаются алмазная пирамида с углом между противоположными гранями, равным  $136^\circ$ . Применяются следующие нагрузки: 9,8 Н (1 кгс); 19,6 Н; 49,05 Н; 98,1 Н (10 кгс); 196 Н и 294 Н (130 кгс). Для нагрузки 294 Н и выдержки 10–15 секунд твердость обозначают 500 *HV*. Для других условий, например,  $P = 10$  кгс и  $\tau = 40$  секунд – 220 *HV*·10/40.

Метод Виккерса используется для определения твердости поверхностно-упрочненных деталей, имеющих сложную конфигурацию, например цементированных или азотированных зубьев шестерен.

### **Методические указания по выполнению лабораторной работы**

В порядке подготовки к лабораторному занятию в первой части **«Испытания на сжатие и определение предела текучести при сжатии»** студент в журнале для лабораторных работ должен дать понятия напряжения, деформации, прочности, теоретической прочности. Начертить кривую растяжения малоуглеродистой стали, описать механизмы упругой и пластической деформации. Сформулировать закон Гука, а также ответить на следующие вопросы и выполнить задания: Что такое деформация, напряжение (истинное и условное), виды напряжения? Что такое прочность, теоретическая прочность? Начертить кривую растяжения малоуглеродистой стали, объяснить ее участки. Сформулировать закон Гука. Объяснить механизм упругой деформации. Объяснить механизм пластической деформации. Как и почему изменяются механические свойства при пластической деформации?

Испытание на сжатие ведут на прессе Гагарина. Испытанию подвергают

цилиндрический образец, изготовленный из малоуглеродистой отожженной стали. На его образующей имеется срез шириной 3–5 мм, который обработан как обычный микрошлиф. Вблизи образца укреплен специальный металлографический микроскоп таким образом, что имеется возможность непрерывного наблюдения за структурой стали в процессе сжатия. Структура образца состоит из большого количества пластичных зерен феррита и небольших участков перлита. С началом нагружения ведут непрерывное наблюдение за изменением микроструктуры образца. В процессе испытания на диаграммном аппарате идет запись диаграммы сжатия. При напряжениях, примерно равных пределу текучести, линии сдвигов ясно различимы. Вначале они возникают на отдельных зернах феррита. По мере дальнейшего увеличения нагрузки возрастает число зерен с линиями скольжения, а также число линий в каждом зерне. Вследствие объемного характера деформации линии скольжения искривляются и принимают волнообразную форму, плоскость микрошлифа деформируется и дальнейшее наблюдение деформации с помощью микроскопа прекращают.

С ростом нагрузки зерна вытягиваются в направлении, перпендикулярном направлению действия силы. Форма и размеры образца при этом сильно изменяются, формируется текстура. Испытания прекращаются. Изучение микроструктуры деформированной стали проводят дополнительно, используя еще один микроскоп и микрошлифы трех образцов. Третий образец изготовлен из стали, которая деформирована при максимальной нагрузке.

После выполнения данной части работы следует на диаграмме сжатия определить условный предел текучести и описать особенности структур отожженной и деформированной стали.

При подготовке ко второй части занятия **«Определение твердости»** студенты должны изучить методы определения твердости на приборах Бринеля, Роквелла и Виккерса и в журнале для лабораторных занятий дать характеристику твердости и основных понятий в определении твердости материалов указанными методами, и ответить на следующие вопросы: Что такое твердость? Преимущества и недостатки данного метода по сравнению с другими механическими испытаниями. Каковы принципы определения твердости по методам Бринеля, Роквелла и Виккерса? Как определить временное сопротивление стали 45, если твердость по Роквеллу составляет 65 HRC? Как определить твердость по Бринелю, если дана твердость 2,5 НВмм?

***Определение твердости образцов из латуни, дуралюмина и отожженной стали на приборе Бринеля***

Наиболее распространенным прибором для испытания на твердость по Бринеллю является автоматический рычажный пресс. Для мягких материалов -

образцов из латуни, дуралюмина и отожженной стали - применяют шарик диаметром 5 мм. Для образцов из латуни и дуралюмина применяют нагрузку 7357,5 Н (750 кгс), для стальных – 29430 Н (3000 кгс).

Полученный в результате вдавливания шарика на поверхности образцов отпечаток (лунку) измеряют при помощи лупы (отсчетного микроскопа) (рис.3.3.а). Лупа имеет шкалу (рис.3.3.б) с ценой деления 0,1 мм. Нижней опорной частью ее плотно устанавливают на испытательную поверхность образца над отпечатком. Один край отпечатка совмещают с началом шкалы и определяют деление шкалы (рис.3.3.в), с которым совпадает противоположный край отпечатка. Эта величина соответствует длине диаметра отпечатка.

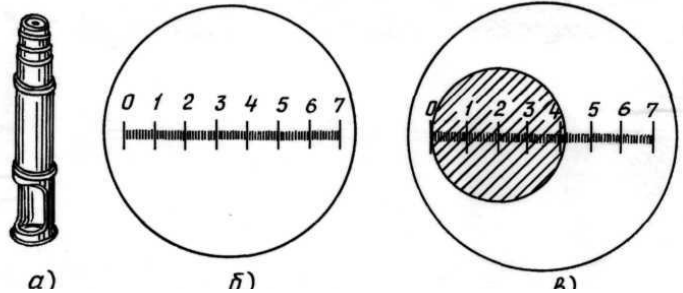


Рис.3.3. Лупа для измерения отпечатков: а - внешний вид; б - шкала лупы; в - отпечаток на шкале лупы

Замер производят три раза на каждом образце. Все полученные значения и среднее арифметическое длины диаметра отпечатка записывают в протокол испытания. По специальной таблице переводят диаметр (среднее арифметическое) отпечатка в число твердости *НВ*.

#### **Определение твердости образцов из латуни, дуралюмина и отожженной стали на приборе Роквелла**

Испытание на твердость по Роквеллу проводят на приборах ТК-2. Поскольку образцы изготовлены из мягких материалов, то в качестве индентера выбирают стальной шарик. Шарик вдавливают в образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок - предварительной  $P_0$ , равной 98,1 Н (10 кгс), и основной  $P$ , равной 981 Н (100 кгс).

Образец устанавливают на стол, который при вращении по часовой стрелке маховика поднимается вверх до момента касания образцом шарика. При дальнейшем вращении маховика шарик начнет внедряться в испытуемый образец, при этом малая и большая стрелки циферблата прибора поворачиваются.

Маховик вращают до тех пор, пока малая стрелка индикатора не дойдет до красной точки, а большая стрелка устанавливается в произвольном положении, при этом создается предварительная нагрузка 10 кгс. Затем производят точную установку большой стрелки индикатора на нуль. Независимо от применяемого индентера (алмазный конус или шарик) с концом большой стрелки индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы. Приведение в действие основной нагрузки ( $P$ ) осуществляется с помощью

ручного привода или от электродвигателя рычажной системой. Под действием основной нагрузки шарик глубже внедряется в образец, при этом большая стрелка индикатора поворачивается против часовой стрелки.

Через 4 секунды основная нагрузка автоматически или вручную снимается и остается только предварительная. При этом большая стрелка индикатора поворачивается по часовой стрелке и указывает число твердости по Роквеллу. Отсчет производят по красной шкале *B*. Вращением маховика против часовой стрелки стол опускают и образец освобождают от действия предварительной нагрузки.

### ***Определение твердости образцов из закаленной стали на приборе Роквелла***

Поскольку образцы изготовлены из твердых материалов, то в качестве индентора применяется алмазный конус, основная нагрузка – 1372 Н (140 кгс). В этом случае общая нагрузка составит 1471 Н (150 кгс). Методика испытания образцов производится по схеме, описанной ранее. Отсчет значений твердости производят по черной шкале *C*.

### ***Определение твердости образцов из закаленной стали на приборе Виккерса при нагрузке 49,05 Н***

Испытания на твердость по Виккерсу производят на приборах типа Виккерса. Продолжительность выдержки образца под нагрузкой регистрируется сигнальной лампочкой. При испытании цементированных или других тонких слоев металла нагрузка должна быть тем меньше, чем тоньше слой.

Измерение диагонали отпечатка осуществляется измерительным микроскопом, имеющим в окуляре три штриха, два основных и один дополнительный, пунктирный, применяемый при серийных

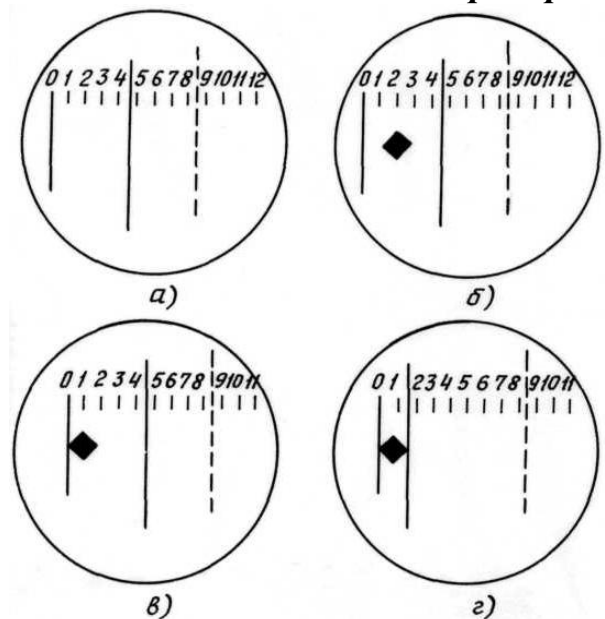


Рис.3.4. Схема измерения отпечатка

испытаниях (рис.3.4а). Основные штрихи должны быть раздвинуты на расстояние, больше диагонали отпечатка (рис.3.4б). Вращением большого левого винта окуляра микроскопа (рис.3.5) подводят левый штрих к левому углу отпечатка (рис.3.4в). Затем вращением правого микрометрического винта (рис.3.5) подводят правый штрих к правому углу отпечатка (рис.3.4г). Определяют число делений на шкале и на микрометрическом винте. Этот результат соответствует величине диагонали отпечатка. При применении

объектива с увеличением  $10^x$  одно деление шкалы соответствует 100 мкм, а одно деление на лимбе микрометрического винта - 1 мкм.

После измерения одной диагонали отпечатка образец поворачивают на  $90^\circ$  и измеряют вторую диагональ. Вычисляют среднее арифметическое длины двух диагоналей отпечатка. Пользуясь специальными таблицами, определяют по среднему значению диагонали отпечатков число твердости *HV*. Полученные результаты записывают в протокол испытаний.

После окончания измерений и определений чисел твердости производят сравнение полученных значений с табличными путем их перевода. По полученным средним значениям твердости рассчитывают значения временного сопротивления для отожженных материалов по формулам, указанным в журнале для лабораторных занятий.

Для отожженных и закаленных образцов углеродистых сталей студенты строят зависимость твердости от содержания углерода и объясняют различия в изменении твердости для отожженной и закаленной стали.

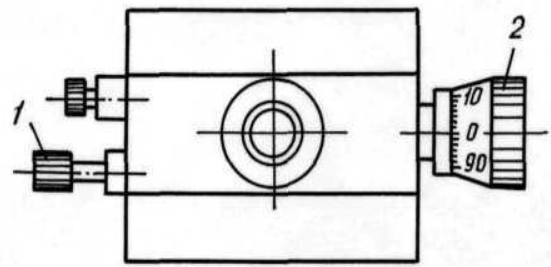


Рис.3.5. Схема микрометрического окуляра микроскопа: 1 - левый винт; 2 - правый микрометрический винт

## Литература

1. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 560 с.

2. **Колесов С.Н., Колесов И.С.** Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студентов вузов – Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2007. - 536 с.

3. **Материаловедение и технология конструкционных материалов:** учебник для студ. высш. учеб. заведений. В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др.; Под общ. ред. В.Б. Арзамасова. – 2-е, стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 448с.

4. **Тихомиров И.Н., Тутнова Е.В.** Материаловедение: пособие по выполнению лабораторных работ.– М.: МГТУ ГА, 2010. - 68 с.