

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра машиностроения и транспорта**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

Е.И. Луковникова

«31» мая 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**Б1.В.ДВ.03.01**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Технология машиностроения**

Программа прикладного бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств от 11 августа 2016 г № 1000 и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» от 01.04.2019 г. № 196 для очной формы обучения для набора 2019 года

<b>СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ</b>		<b>Стр.</b>
<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		3
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>		3
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....		4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....		4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....		5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....		5
4.3 Лабораторные работы.....		44
4.4 Семинары / практические занятия.....		44
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		44
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		45
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>		46
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		46
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>		46
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>		47
9.1 Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ.....		47
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата .....		49
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		50
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>		50
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>		51
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>		55
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>		56
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>		57

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно- технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является – формирование у обучающихся профессиональных знаний и навыков, необходимых для дальнейшей работы по специальности, а также привлечь их к научному исследованию различных проблем, связанных с инструментальными материалами. Ознакомиться с методиками исследования структуры свойств и качества металлов и сплавов.

Задачами изучения дисциплины является:

- развитие способности участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ПК-18	способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.	<b>знать:</b> – программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий; <b>уметь:</b> – разрабатывать программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления; <b>владеть:</b> – навыками осуществления метрологической поверки средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.03.01 Физические методы исследования металлов и сплавов является дисциплиной по выбору вариативной части.

Дисциплина Физические методы исследования металлов и сплавов базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как:

- Материаловедение;
- Контроль качества изделий в машиностроении;
- Метрология, стандартизация и сертификация.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Физические методы исследования металлов представляет основу для изучения дисциплин:

- Технология машиностроения;
- Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки;
- При подготовке выпускной квалификационной работы.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Семинары / Практические занятия	Самостоятельная работа		
Очная	4	7	180	68	17	51	-	85	-	экзамен
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			7
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	<b>68</b>	<b>17</b>	<b>68</b>
Лекции (Лк)	17	17	17
Лабораторные работы (ЛР)	51	-	51
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	<b>85</b>	<b>-</b>	<b>85</b>
Подготовка к лабораторным работам	65	-	65
Подготовка к экзамену в течение семестра	20	-	20
<b>III. Промежуточная аттестация экзамен</b>	<b>27</b>	<b>-</b>	<b>27</b>
Общая трудоемкость дисциплины ..... час.	<b>180</b>	<b>-</b>	<b>180</b>
зач. ед.	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>5</b>

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость, (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	
<b>1.</b>	<b>Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве</b>	<b>33</b>	<b>5</b>	<b>-</b>	<b>28</b>
1.1	Свойства материалов, применяемых в машиностроении и инструментальном производстве	11	2	-	9
1.2	Классификация материалов, их эксплуатационные свойства, область применения	12	2	-	10
1.3	Требования, предъявляемые к инструментальным материалам	10	1	-	9
<b>2.</b>	<b>Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала</b>	<b>58</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>28</b>
2.1	Определение механических свойств металлов и сплавов	20	2	8	10
2.2	Определение физических, химических, технологических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов	19	2	8	9
2.3	Исследование поверхностного слоя металлов и сплавов	19	1	9	9
<b>3.</b>	<b>Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов</b>	<b>62</b>	<b>7</b>	<b>26</b>	<b>29</b>
3.1	Визуальные и измерительные методы исследования металлов и сплавов	16	2	8	6
3.2	Магнитные методы исследования металлов и сплавов	8	2	-	6
3.3	Исследование металлов и сплавов проникающими веществами	16	1	9	6
3.4	Ультразвуковые методы исследования металлов и сплавов	16	1	9	6
3.5	Радиационные методы исследования металлов и сплавов	6	1	-	5
<b>Итого</b>		<b>153</b>	<b>17</b>	<b>51</b>	<b>85</b>

### 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

**Раздел 1. Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве**

**Тема 1.1. Свойства материалов, применяемых в машиностроении и инструментальном производстве**

(Лекция-дискуссия – 2 час.)

*Свойства конструкционных материалов*

Физико-механические свойства конструкционных материалов подразделяются на:

- конструкционные;
- технологические;
- эксплуатационные
- Конструкционные свойства. К конструкционным свойствам относятся:
  - прочность;
  - упругость;
  - пластичность;
  - твердость;
  - ударная вязкость.

Эти свойства определяют прочность и долговечность машины.

Прочность – это способность материала сопротивляться деформации и разрушению.

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием внешних сил. Деформации подразделяются на упругие и пластические. Упругие деформации исчезают после окончания действия сил, а пластические остаются.

Пластичность – способность материала деформироваться. Пластичность обеспечивает конструктивную прочность деталей под нагрузкой и нейтрализует влияние концентраторов напряжений – отверстий, вырезов и т.п. При пластическом деформировании металла одновременно с изменением формы изменяется ряд свойств, в частности при холодном деформировании повышается прочность, но снижается пластичность.

Большинство механических характеристик материалов определяют в результате испытания образцов на растяжение (ГОСТ 1497-84).

При растяжении образцов с площадью поперечного сечения  $F_a$  и рабочей (расчетной) длиной  $l_0$  строят диаграмму растяжения в координатах: нагрузка  $P$  – удлинение  $\Delta l$  образца (рисунок 1).

Диаграмма растяжения характеризует поведение металла при деформировании от момента начала нагружения до разрушения образца. На диаграмме выделяют три участка:

- упругой деформации – до нагрузки  $P_{упр}$ ;
- равномерной пластической деформации от  $P_{упр}$  до  $P_{max}$ ;
- и сосредоточенной пластической деформации от  $P_{max}$  до  $P_k$ .

Если образец нагрузить в пределах  $P_{упр}$ , а затем полностью разгрузить и измерить его длину, то никаких последствий нагружения не обнаружится.

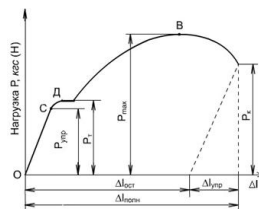


Рисунок 1 – Диаграмма растяжения металла

Такой характер деформирования образца называется упругим. При нагружении образца более  $P_{упр}$  появляется остаточная (пластическая) деформация.

Пластическое деформирование идет при возрастающей нагрузке, так как металл упрочняется в процессе деформирования. Упрочнение металла при деформировании называется наклепом.

При дальнейшем нагружении пластическая деформация, а вместе с ней и наклеп все более увеличиваются, равномерно распределяясь по всему объему образца.

После достижения максимального значения нагрузки  $P_{max}$  в наиболее слабом месте появляется местное утонение образца – шейка, в которой в основном и протекает дальнейшее пластическое деформирование. В связи с развитием шейки, несмотря на продолжающееся упрочнение металла, нагрузка уменьшается от  $P_{max}$  до  $P_k$ , и при нагрузке  $P_k$  происходит разрушение образца. При этом упругая деформация образца  $\Delta l_{упр}$  исчезает, а пластическая  $\Delta l_{ост}$  остается.

При деформировании твердого тела внутри него возникают внутренние силы. Величину сил, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения образца, называют напряжением. Размерность напряжения МПа.

Отмеченные выше нагрузки на кривой растяжения ( $P_{упр}$ ,  $P_e$ ,  $P_{max}$ ,  $P_k$ ) служат для определения основных характеристик прочности (напряжений):

- предела упругости  $\sigma_y$ ;
- предела текучести  $\sigma_s$ ;
- временного сопротивления  $\sigma_e$  (предела прочности) и истинного сопротивления разрушению.

Временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_e$  – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Твердость – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора). О твердости судят либо по глубине проникновения индентора, либо по величине отпечатка от вдавливания. Во всех случаях происходит пластическая деформация материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость.

Наибольшее распространение получили методы определения твердости Бринелля, Роквелла, Виккерса и микротвердости. Схемы испытаний представлены на Рисунке 2.

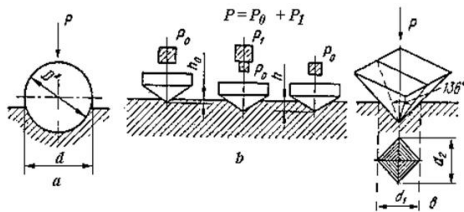


Рисунок 2 – Схема определения твердости материала: по Бринеллю (а), по Роквеллу (б), по Виккерсу (в).

Твердость по Бринеллю определяют на твердометре Бринелля. В качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром  $D$  2,5; 5; 10 мм, в зависимости от толщины изделия.

Полученный отпечаток измеряется в двух направлениях при помощи лупы Бринелля. Твердость определяется как отношение приложенной нагрузки  $P_0$  к сферической поверхности отпечатка.

Метод Роквелла основан на вдавливании в поверхность под определенной нагрузкой наконечника в виде шарика или алмазного конуса. Для мягких материалов (до НВ 230) используется стальной шарик диаметром  $1/16''$  (1,6 мм), для более твердых материалов – конус алмазный.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка  $P_0$  (100 н) для плотного соприкосновения наконечника с образцом. Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ , в течение некоторого времени действует общая рабочая нагрузка  $P$ . После снятия основной нагрузки определяют значение твердости по глубине остаточного вдавливания наконечника  $h$  под нагрузкой  $P_0$ .

Твердость по Виккерсу определяется по величине отпечатка индентора: алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ .

Твердость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности отпечатка. Нагрузка  $P$  составляет 50...1000 н. Диагональ отпечатка  $d$  измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе.

Преимущество данного способа в том, что можно измерять твердость любых материалов, тонких изделий, поверхностных слоёв. Метод обеспечивает высокую точность при высокой чувствительности.

Способ микротвердости – используется для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплава, очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). Метод аналогичен способу Виккерса. Индентор – пирамида меньших размеров, нагрузки при вдавливании  $P$  составляют 5...500 н.

Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению. Испытания на ударную вязкость производят на маятниковых копрах. Испытуемые образцы имеют надрезы определенной формы и размеров. Образец устанавливают на опорах копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на определенную высоту.

Характеристикой вязкости является ударная вязкость  $a_u$ , (удельная работа разрушения). Технологические свойства конструкционных материалов

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться различным способам холодной и горячей обработки.

К технологическим свойствам металлов и сплавов относятся: литейные свойства;

деформируемость; свариваемость;

обрабатываемость режущим инструментом.

Эти свойства позволяют производить формоизменяющую обработку и получать заготовки и детали машин.

Литейные свойства характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок. Литейные свойства определяются способностью расплавленного металла или сплава к заполнению литейной формы (жидкотекучесть), степенью химической неоднородности по сечению полученной отливки (ликвация), а также величиной усадки – сокращением линейных размеров при кристаллизации и дальнейшем охлаждении.

Способность материала к обработке давлением – это способность материала изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок не разрушаясь (обработка без снятия стружки). Она контролируется в результате технологических испытаний, проводимых в условиях, максимально приближенных к производственным. Листовой материал испытывают на перегиб и вытяжку сферической лунки. Проволоку испытывают на перегиб, скручивание, на навивание. Трубы испытывают на раздачу, сплющивание до определенной высоты и изгиб. Критерием годности материала является отсутствие дефектов после испытания.

Свариваемость – это способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества при сварке. Свойство оценивается по качеству сварного шва.

Обрабатываемость резанием – характеризует способность материала поддаваться обработке режущим инструментом. Оценивается по стойкости инструмента и по качеству обработанной поверхности.

Технологические свойства часто определяют выбор материала для конструкции. Разрабатываемые материалы могут быть внедрены в производство только в том случае, если их технологические свойства удовлетворяют необходимым требованиям.

Современное автоматизированное производство, предъявляет к технологическим свойствам материала особые требования: проведение сварки на больших скоростях, ускоренное охлаждение отливок, обработка резанием на повышенных режимах и т. п. при обеспечении необходимого условия – высокого качества получаемой продукции.

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях: износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения;

коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных и щелочных сред;

жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре;

жаропрочность – это способность материала сохранять прочность и твердость при высоких температурах;

хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах;

антифрикционность – способность материала прирабатываться к другому материалу.

Эти свойства определяются специальными испытаниями в зависимости от условий работы изделий. При выборе материала для создания конструкции необходимо учитывать конструкционные, технологические и эксплуатационные свойства.

*Свойства предъявляемые к инструментальным материалам*

Режущие инструменты работают в условиях значительных силовых нагрузок, высоких температур, трения и износа. Поэтому инструментальные материалы должны обладать определенными эксплуатационными и физико-механическими свойствами. Материал режущей части инструмента обладает большой твердостью и высокими значениями допустимых напряжений на изгиб, растяжение, сжатие и кручение. Твердость режущей части инструмента должна значительно превышать твердость материала обрабатываемой заготовки.

Высокие прочностные свойства необходимы для того, чтобы инструмент обладал сопротивляемостью соответствующим деформациям в процессе резания, а достаточная вязкость материала позволяла воспринимать ударную динамическую нагрузку. Инструментальные материалы должны обладать высокой *красностойкостью* (теплостойкостью), т.е. способностью сохранять твердость при нагреве. Красностойкость оценивают температурой, при которой происходит резкое снижение твердости материала.

Важнейшей характеристикой материала режущей части инструмента служит *износостойкость*. Чем выше износостойкость, тем медленнее изнашивается инструмент и тем выше его размерная стойкость. Это значит, что заготовки, последовательно обработанные одним и тем же инструментом, будут иметь минимальное рассеивание размеров обработанных поверхностей. Материалы для изготовления инструментов должны по возможности иметь наименьшее процентное содержание дефицитных элементов.

Всем перечисленным требованиям в той или иной степени отвечают следующие материалы: инструментальные стали, твердые сплавы, синтетические сверхтвердые и керамические материалы, абразивные и алмазные материалы.

## **Тема 1.2. Классификация материалов, их эксплуатационные свойства, область применения (Лекция-дискуссия – 2 час.)**

### *Инструментальные стали*

Углеродистые инструментальные стали содержат 1.0...1,3 % С. для изготовления инструментов применяют качественные стали У10А, У11А, У13А. После термической обработки стали имеют красностойкость 200...240 оС. При этой температуре твердость стали резко уменьшается, и инструменты не могут выполнять работу резания. Допустимые скорости резания не превышают 0.2...0.3 м/с. Из этих сталей изготавливают метчики, плашки, ножовочные полотна, сверла и зенкеры малых диаметров.

Легированные инструментальные стали - это углеродистые инструментальные стали, легированные хромом, вольфрамом, ванадием, кремнием и другими элементами. После термообработки легированные стали

имеют красностойкость 220...260 оС. По сравнению с углеродистыми легированные стали имеют повышенную вязкость в закаленном состоянии и более высокую прокаливаемость, меньшую склонность к деформациям и появлению трещин при закалке. Допустимая скорость резания 0.25...0.5 м/с. Для изготовления протяжек, сверл, метчиков, плашек, разверток используют, стали 9Х ВГ, ХВГ, ХГ, 6ХС, 9ХС.

Быстрорежущие стали содержат 5,5...19 % W, 0,7...1,2 % С; 2...10 % Со и V. Для изготовления инструментов используют стали Р9, Р12, Р18, Р6М3, Р6М5, Р9Ф5, Р14Ф2, Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф2. Во всех быстрорежущих сталях массовая доля хрома - 4%, поэтому в обозначении марки букву Х не указывают. Режущий инструмент из быстрорежущей стали, после термической обработки имеет красностойкость 600...640 оС и обладает повышенной износостойкостью, поэтому может работать со скоростями резания до 2 м/с.

Для экономии быстрорежущих сталей режущий инструмент изготавливают сборным или сварным. Режущую часть инструмента делают из быстрорежущей стали, которую сваривают или соединяют механически с присоединительной частью из конструкционных сталей 45, 50, 40Х.

### *Твердые сплавы*

К твердым сплавам относятся инструментальные материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, соединяемых металлической связкой. Эти материалы изготавливают методами порошковой металлургии. Порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, прессуют и спекают при 1400...1550 оС. При спекании кобальт растворяет часть карбидов и плавится. В результате получается плотный материал, структура которого на 80...85 % состоит из карбидных частиц, соединяемых связкой.

Твердые сплавы применяют в виде пластинок определенной формы и размеров, которые делят на три

групп:

вольфрамовые - ВК2, ВК3, ВК3М, ВК8 и др;

- титановольфрамовые - Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12В;

- титанотанталовольфрамовые - ТТ7К12, ТТ10К8Б.

Пластинки твердого сплава обладают высокими износостойкостью и красностойкостью (800...1250 °С), что позволяет вести обработку со скоростями резания до 15 м/с. Пластинки припаивают к державкам или корпусам инструментов медными, латунными припоями или крепят механическими способами.

Твердые сплавы группы ВК используют для обработки заготовок из хрупких металлов, и неметаллических материалов, а сплавы второй группы (ТВК) - для обработки заготовок из пластичных и вязких металлов и сплавов. Мелкозернистый твердый сплав ВК 6М применяют для

обработки заготовок из трудно обрабатываемых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, твердых чугунов, бронз, закаленных сталей, сплавов титана, керамики и др.

Карбидные сплавы третьей группы (ТТК) отличаются от групп сплавов ВК и ТВК повышенными износостойкостью, прочностью и вязкостью. Их применяют для обработки заготовок из трудно обрабатываемых сталей аустенитного класса.

#### *Синтетические сверхтвердые и керамические материалы*

Наиболее широкое применение среди сверх твердых материалов (СТМ) получили материалы на основе кубического нитрида бора (Эльбор, Гексанит - Р, Киборит и др.). Их выпускают в виде пластин различной геометрической формы, которыми оснащают режущие инструменты. СТМ применяют для тонкого, чистового точения и фрезерования закаленных сталей и чугунов.

Инструментальные керамические материалы можно разделить на группы, различающиеся химическим составом, методом производства и областями рационального использования. Оксидную "белую" керамику, состоящую из  $Al_2O_3$  с легирующими добавками  $MgO$ ,  $ZrO_2$  и др., применяют для чистовой и получистовой обработки незакаленных сталей и серых чугунов со скоростями резания до 15 м/с. Оксидно-карбидную "черную" керамику, состоящую из  $Al_2O_3$ ,  $TiC$ ,  $ZrO_2$  и других карбидов тугоплавких металлов, применяют для обработки ковких, высокопрочных и отбеленных модифицированных чугунов и закаленных сталей. Керамику на основе нитрида кремния применяют для получистовой обработки чугунов.

#### *Абразивные и алмазные материалы*

Абразивные материалы - это мелкозернистые порошковые вещества, которые используют для изготовления шлифовальных кругов, головок, брусков и пр. В промышленности используют искусственные абразивные материалы: электрокорунды, карбиды кремния и бора, оксид хрома, искусственные алмазы и др. Инструменты из абразивных материалов позволяют обрабатывать заготовки со скоростью резания 15...100 м/с. Эти инструменты применяют главным образом для окончательной обработки заготовок, когда к ним предъявляют повышенные требования по точности и шероховатости обработанных поверхностей.

Алмаз является самым твердым материалом, имеет высокие красностойкость и износостойкость, у него практически отсутствует адгезия с другими материалами. Этот инструментальный материал используют для изготовления алмазных инструментов (круги, пилы, ленты, бруски) и алмазных доводочных порошков. Кристаллами алмазов оснащают резцы и сверла. Алмазные резцы наиболее широко применяют при тонком точении или растачивании заготовок из сплавов алюминия, бронз, латуней и неметаллических материалов. Алмазный инструмент применяют для обработки заготовок из керамики, жаропрочных сталей и сплавов, полупроводниковых материалов и др. Обработку этим инструментом ведут со скоростями резания до 20 м/с. Поверхности изделий, обработанных в этих условиях, имеют низкую шероховатость и высокую точность размеров.

#### *Обрабатываемые конструкционных материалов*

Внедрение новых материалов и технологий изготовления изделий, совершенствование существующих видов резания вызывают необходимость оценки обрабатываемости. Это технологическое свойство материала заготовки определяет способность подвергаться обработке резанием.

Обрабатываемость материала резанием можно оценить одним или несколькими показателями. К ним относятся: допускаемая скорость механической обработки, стойкость режущего инструмента, силы, возникающие при резании, свойства обработанной поверхности, условия отвода стружки из зоны резания и т.п.

В зависимости от вида резания и условий обработки те или иные технологические показатели становятся определяющими. Например, при черновой обработке помимо получения максимальной скорости резания важны значения составляющих силы резания и условия транспортировки стружки из зоны резания. При чистовой обработке помимо скорости резания определяющими являются шероховатость обработанной поверхности и глубина наклепанного слоя; степень наклепа; величина и знак остаточных напряжений в этом слое.

Наиболее достоверный метод оценки обрабатываемости материала - определение ее опытным путем по всему указанному комплексу показателей. Это позволяет при проектировании детали подобрать материал, удовлетворяющий не только эксплуатационным требованиям, но и обеспечивающий минимальную стоимость механической обработки резанием.

Производительность и себестоимость обработки зависят главным образом от допустимой скорости резания, поэтому для любого вида резания основным показателем обрабатываемости является допустимая скорость резания. Лучшей обрабатываемостью обладает тот материал, который при прочих равных условиях допускает более высокую скорость резания. Количественно обрабатываемость оценивают коэффициентом относительной обрабатываемости, представляющим собой отношение

$$K_v = V/V_э$$

Где  $V_э$  – скорость резания эталонного материала при заданных условиях обработки, необходимая для получения определенной стойкости инструмента  $T$ ;  $V$  – значение скорости резания рассматриваемого материала при тех же условиях обработки, необходимое для получения той же стойкости.

Обрабатываемость материалов как технологическое свойство определяется в основном их химическим составом, структурным состоянием, механическими и теплофизическими характеристиками материала заготовки. При этом значение  $K_v$  для конкретных материалов при работе разными инструментами могут существенно отличаться. Это связано с условиями стружкообразования, стружкоотвода, возникновением вибрации и др.

Обрабатываемый материал существенно влияет на износ инструмента, который, в свою очередь, зависит от режима резания, сил и температур в зоне обработки, а также от свойств инструментального материала. Поэтому значения обрабатываемости одного и того же материала отличаются друг от друга не только при точении, сверлении, фрезеровании и т.д., но и в зависимости от того, из какого материала изготовлен инструмент.

Все конструкционные технологические металлы и сплавы условно разбиты на 14 групп обрабатываемости. Это разделение на группы выполнено в основном по химическому составу и эксплуатационным свойствам. Внутри каждой группы значение  $K_v$  изменяется в зависимости от твердости и предела прочности материала данной группы. Следует отметить, что разделение на группы обрабатываемости является достаточно условным, но позволяет систематизировать и значительно сократить объем рекомендаций по выбору оптимальных условий механической обработки резанием различных материалов.

В качестве эталона обрабатываемости для углеродистых и низколегированных сталей принимают сталь

45 после нормализации или отжига. Для высоколегированных сталей и сплавов на основе никеля и титана в качестве эталона принята сталь 12X18H10T, для чугуна - серый чугун СЧ20, алюминиевых сплавов – дюралюминий Д16, меди и ее сплавов – бронза БрА9Ж9, магниевых сплавов - МЛ5.

Обрабатываемость материалов определяет возможность применения тех или иных технологических процессов обработки резанием и формирования поверхностного слоя с новыми требуемыми характеристиками, а также стоимость продукции.

### **Тема 1.3. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам (Лекция-дискуссия – 1 час.)**

При резании контактные площадки инструмента подвергаются интенсивному воздействию высоких силовых нагрузок и температур, величины которых имеют переменный характер, а взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды приводит к протеканию интенсивных физико-химических процессов: адгезии, диффузии, окисления, коррозии и др.

С учетом необходимости сопротивления контактных площадок режущего инструмента микро- и макроразрушению в указанных условиях, к свойствам инструментальных материалов предъявляется ряд специальных требований, выполнение которых определяет место их эффективного применения для режущих инструментов. Основные требования к инструментальным материалам следующие:

1. Инструментальный материал должен иметь высокую твердость.

Твердость инструментального материала должна быть выше твердости обрабатываемого не менее чем в 1,4 - 1,7 раза.

2. При резании металлов выделяется значительное количество теплоты и режущая часть инструмента нагревается. Поэтому, инструментальный материал должен обладать высокой теплостойкостью. Способность материала сохранять высокую твердость при температурах резания называется теплостойкостью. Для быстрорежущей стали – теплостойкость еще называют красностойкостью (т.е. сохранение твердости при нагреве до температур начала свечения стали)

Увеличение уровня теплостойкости инструментального материала позволяет ему работать с большими скоростями резания.



## Раздел 2. Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала

### Тема 2.1. Определение механических свойств металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 2 час.)

К основным механическим свойствам металлов относятся прочность, вязкость, пластичность, твердость, выносливость, ползучесть, износостойкость. Они являются главными характеристиками металла или сплава.

Рассмотрим некоторые термины, применяемые при характеристике механических свойств. Изменения размеров и формы, происходящие в твердом теле под действием внешних сил, называются деформациями, а процесс, их вызывающий, — деформированием. Деформации, исчезающие при разгрузке, называются упругими, а не исчезающие после снятия нагрузки — остаточными или пластическими.

Напряжением называется величина внутренних сил, возникающих в твердом теле под влиянием внешних сил.

Под прочностью материала понимают его способность сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок. О прочности судят по характеристикам механических свойств, которые получают при механических испытаниях. К статическим испытаниям на прочность относятся растяжение, сжатие, изгиб, кручение, вдавливание. К динамическим относятся испытания на ударную вязкость, выносливость и износостойкость. Эластичностью называется способность материалов упруго деформироваться, а пластичностью — способность пластически деформироваться без разрушения.

Вязкость — это свойство материала, которое определяет его способность к поглощению механической энергии при постепенном увеличении пластической деформации вплоть до разрушения материала. Материалы должны быть одновременно прочными и пластичными.

Твердость — это способность материала сопротивляться проникновению в него других тел. Выносливость — это способность материала выдерживать, не разрушаясь, большое число повторно-переменных нагрузок.

Износостойкость — это способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

Ползучесть — это способность материала медленно и непрерывно пластически деформироваться (ползти) при постоянном напряжении (особенно при высоких температурах).

Напряженное состояние — это состояние тела, находящегося под действием уравновешенных сил, при установившемся упругом равновесии всех его частиц. Остаточные напряжения — это напряжения, остающиеся в теле, после прекращения действия внешних сил, или возникающие при быстром нагревании и охлаждении, если линейное расширение или усадка слоев металла и частей тела происходит неравномерно.

Внутренние напряжения образуются при быстром охлаждении или нагревании в температурных зонах перехода от пластического к упругому состоянию металла. Эти температуры для стали соответствуют 400—600°. Если образующиеся внутренние напряжения превышают предел прочности, то в деталях образуются трещины, если они превышают предел упругости, то происходит коробление детали.

Предел прочности при растяжении в  $\text{кг/мм}^2$  определяется на разрывной машине как отношение нагрузки  $P$  в  $\text{кГ}$ , необходимой для разрушения стандартного образца, к площади поперечного сечения образца в  $\text{мм}^2$ .

Предел прочности при изгибе в  $\text{кГ/мм}^2$  определяется разрушением образца, который устанавливается на двух опорах, нагруженного по середине сосредоточенной нагрузкой  $P$ .

Для установления пластичности материала определяют относительное удлинение  $\delta$  при растяжении или прогиб  $f$  при изгибе.

Относительное удлинение  $\delta$  в % определяется на образцах, испытываемых на растяжение. На образец наносят деления и измеряют между ними расстояние до испытания ( $l_0$ ) и после разрушения ( $l$ ) и определяют удлинение

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

Прогиб при изгибе в  $\text{мм}$  определяется при помощи прогибомера машины, указывающего прогиб  $f$ , образующийся на образце в момент его разрушения.

Ударная вязкость в  $\text{кГм/см}^2$  определяется на образцах, подвергаемых на копре разрушению ударом отведенного в сторону маятника. Для этого работу деформации в  $\text{кГм}$  делят на площадь поперечного сечения образца в  $\text{см}^2$ .

Твердость по Бринелю (НВ) определяют на зачищенной поверхности образца, в которую вдавливают стальной шарик диаметром 5 или 10  $\text{мм}$  под соответствующей нагрузкой в 750 или 3000  $\text{кГ}$  и замеряют диаметр  $d$  образовавшейся лунки. Отношение нагрузки в  $\text{кГ}$  к площади лунки  $\pi d^2/4$  в  $\text{мм}^2$  дает число твердости.

Показатели для механических свойств для основных сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Механические свойства основных промышленных сплавов

Название сплава	Предел прочности при растяжении в $\text{кГ/мм}^2$	Удлинение (при $l = 0 = 5 d_0$ ) в %	Твердость по Бринелю НВ	Примерное назначение
Техническое железо	23	30	90	Мембраны
Чугун серый	12—38	до 0,25	143—220	Отливки фасонные
Чугун высокопрочный	30—60	0,5—10	170—262	Ответственные отливки
Сталь малоуглеродистая (мягкая)	32 — 70	11 — 28	100—130	Котельное железо трубы, котлы
Сталь среднеуглеродистая (средней твердости)	50—70	12 — 16	170 — 200	Оси, шатуны, валы, рельсы
Сталь твердая после закалки и отпуска	110—140	до 9	400—600	Инструмент ударный и режущий
Бронза оловянистая	15 — 25	3—10	70—80	Детали, работающие на истирание и подверженные коррозии
Бронза алюминиевая	40—50	10	120	То же
Латунь однофазная	25 — 35	30-60	42—60	Патронно-гильзовое производство
Латунь двухфазная	35—45	30—40	—	Детали, изготовленные горячей штамповкой
Силумин	21—23	1 — 3	65—100	Детали в авиастроении и автостроении
Сплавы магния	24 — 32	10—16	60—70	То же

#### Напряжение, деформация, тензор

Реальные твердые тела часто анизотропны, поэтому их механические свойства зависят от направления приложения силы. Такие свойства называются тензорными. В этом случае закон Гука уже недостаточен, и необходимо применять обобщенный закон Гука, который устанавливает линейную зависимость между компонентами тензора напряжений и тензора деформаций. Нашей задачей будет ввести понятия тензоров напряжений и деформаций и записать обобщенный закон Гука.

Механическое напряжение есть мера внутренних сил, возникающих в деформированном под действием внешних сил теле.

Введем понятие вектора механических напряжений  $\sigma$ . По модулю он равен отношению силы  $dF$ , действующей на элементарную площадку  $dS$ , окружающую некоторую произвольно выбранную внутри твердого тела точку  $M$ , через которую проведено сечение  $S$ , к величине этой площадки. Выделим  $\sigma$  — нормальную и  $\tau$  — тангенциальную (касательная) составляющие вектора напряжения

Вообще говоря, различают истинные и условные напряжения. Истинные напряжения представляют собой отношение силы, приложенной к образцу, к фактическому значению площади сечения. Если такие силы способны вызвать деформацию, достаточную для изменения площади

сечения, то будет меняться истинное напряжение.

Условное напряжение – это отношение действующей силы к первоначальной площади сечения во всем интервале деформаций, вплоть до разрушения. Иначе говоря, если в выведенном из состояния равновесия твердом теле выделить элемент объема, то на его поверхность со стороны окружающих его частей тела будут действовать силы, пропорциональные площади поверхности этого элемента объема.

*Измерение упругой деформации, методики определения напряжений, используемое оборудование.*

Испытание на растяжение является наиболее распространенным видом исследования материалов, так как при нем наиболее ярко выявляются характеристики прочности и пластичности материалов. ГОСТ 1497-84

«Металлы. Методы испытаний на растяжение» устанавливает методы статических испытаний на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них для определения основных механических характеристик материалов. Для большинства материалов в пределах упругого деформирования до предела пропорциональности между напряжениями и деформациями имеет место прямо пропорциональная зависимость, которая была установлена Робертом Гуком. В условиях осевого растяжения, когда только по двум граням выделенного из объема материала элемента действуют нормальные напряжения. При этом нормальное напряжение прямо пропорционально относительной продольной деформации:  $\epsilon = \sigma / E$  (1) Данная зависимость получила название закона Гука при растяжении-сжатии. Коэффициент  $E$  называется модулем упругости или модулем Юнга.

Модуль упругости характеризует жесткость материала и имеет размерность напряжения - паскаль (Па). Образец изготовлен в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Метод испытаний на растяжение» на металлорежущем станке, сохранены поверхностные слои проката. Длина рабочей части образца  $l_0 = 65$  мм, диаметр  $d = 6,5$  мм. При изготовлении образцов должны быть выполнены следующие требования: высококачественность сечения образца по его длине, соосность и высокое качество поверхности (малая шероховатость, отсутствие царапин и надрезов).

Метод тензометрии. Метод тензометрии, являющийся основным в экспериментальном определении напряжений при испытаниях, заключается в измерении при помощи специальных точных приборов, называемых тензометрами, деформаций в какой-либо точке (зоне) элемента конструкции и нахождении по величине этих деформаций, используя зависимость Гука, величин напряжений. Деформации, измеряемые на отрезке, длина которого до деформации называется базой  $l_0$ , при работе в упругой стадии характеризуются малыми величинами.

Тензометрами измеряют абсолютное удлинение (укорочение)  $\Delta l$  и по ним определяют среднюю относительную деформацию

Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база  $l_0$  должна быть по возможности короткой.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить  $\Delta l$  на базе, расположенной вдоль элемента. По полученной в результате измерений  $\epsilon$  и известному модулю упругости  $E$  вычисляют величину  $\sigma = E \epsilon$ .

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях.

Когда известны направления главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , достаточно провести измерения на базах, расположенных вдоль  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Определив главные деформации  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , вычисляют величины главных напряжений по формулам:

Положительный угол следует откладывать по ходу часовой стрелки. Подставив  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  из формул (III.2) или (III.3) в формулы (III.1), получают значения напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

Метод хрупких покрытий. Суть метода хрупких покрытий состоит в следующем. На поверхность тонким (0,05—0,10 мм) слоем наносят специальный лак, который при высыхании образует хрупкое покрытие. В процессе приложения нагрузки в покрытии возникают трещины, перпендикулярные действию главных растягивающих напряжений  $\sigma_1$ . Таким образом, полученные трещины являются траекториями главных напряжений  $\sigma_1$ . По последовательности появления трещин судят о характере изменения напряженного состояния в процессе нагружения и наиболее напряженных зонах.

При определении главных сжимающих напряжений лаком покрывают элемент в нагруженном состоянии. После высыхания лака элемент разгружают. В процессе разгрузки в лаковом покрытии появляются трещины, перпендикулярные действию главных сжимающих напряжений, возникающих при загрузке элемента. Трещины совпадают с траекторией  $\sigma_1$ . Таким образом, по трещинам в покрытии можно построить траектории главных напряжений. Значение главных напряжений определяют либо непосредственным тензометрированием, либо по тензочувствительности лакового покрытия, определяемой относительным удлинением  $\epsilon_{тр}$ , при котором возникает трещина.

При непосредственном тензометрировании (после испытаний на образование трещин в лаковом покрытии) измеряют главные напряжения в наиболее характерных точках. Этот способ дает достаточно надежные результаты по величинам напряжений и выявляет общую картину распределения главных напряжений.

Тогда в случае линейного напряженного состояния напряжение от нагрузки  $P$  в этих точках составит  $\sigma = P/A$ . Лаковые покрытия изготавливают на основе канифоли, целлулоида, нитроклетчатки. Например,

канифольно-целлулоидный лак представляет собой раствор канифоли с добавлением целлулоида в спирте или другом растворителе. Перед нанесением лака поверхность элемента тщательно очищают. Для лучшего наблюдения за появлением и развитием трещин поверхность после очистки покрывают раствором нитроклетчатки в этилацетате с добавлением алюминиевой пудры. Лак наносят ровным слоем плоской кистью или пульверизатором.

Точность количественных результатов при этом методе сравнительно невысока (до 10—20%).

Поляризационно-оптический метод. Поляризационно-оптический метод применяют при исследованиях элементов, работающих в сложном напряженном состоянии. При этом используют так называемые оптически активные прозрачные материалы (стекло, целлулоид, желатин, бакелит и др.), которые обладают свойством двойного преломления светового луча при напряженно-деформированном состоянии. Для исследования напряженного состояния из оптически активного материала изготавливают модель узла или детали конструкции, которую просвечивают в специальной установке, называемой полярископом. Схема полярископа представлена на рис. 40.

*Определение твердости металлов и сплавов.*

Метод Бринелля. Метод измерения твердости металлов по Бринеллю регламентирует ГОСТ 9012 - 59 (ИСО 6506 - 81, ИСО 410 - 82).

Сущность метода заключается во вдавливании шарика (стального или из твердого сплава) в образец (изделие) под действием силы, приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка после снятия силы.

Твердость по Бринеллю обозначают символом HB или HBW:

HB - при применении стального шарика (для металлов и сплавов твердостью менее 450 единиц);

HBW - при применении шарика из твердого сплава (для металлов и сплавов твердостью более 450 единиц).

Символу HB (HBW) предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр, а после символа указывают диаметр шарика, значение приложенной силы (в кгс), продолжительность выдержки, если она отличается от 10 до 15с.

Примеры обозначений:

250 HB 5/750 - твердость по Бринеллю 250, определенная при применении стального шарика диаметром при силе 750 кгс (7355 Н) и продолжительности выдержки от 10 до 15с;

575 HBW 2,5/187,5/30 - твердость по Бринеллю 575, определенная при применении шарика из твердого сплава диаметром при силе 187,5 кгс (1839 Н) и продолжительности выдержки 30с.

При определении твердости стальным шариком или шариком из твердого сплава диаметром при силе 3000 кгс (29420 Н) и продолжительности выдержки от 10 до 15с твердость по Бринеллю обозначают только числовым значением твердости и символом HB или HBW.

Пример обозначения: 185 HB, 600 HBW.

Метод Виккерса. Метод измерения твердости черных и цветных металлов и сплавов при нагрузках от 9,807 Н (1 кгс) до 980,7 Н (100 кгс) по Виккерсу регламентирует ГОСТ 2999 - 75\*.

Измерение твердости основано на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец (изделие) под действием силы, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка, оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки.

Твердость по Виккерсу при условиях испытания - силовое воздействие 294,2 Н (30 кгс) и время выдержки под нагрузкой 10...15с, обозначают цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HV.

10...15с.

Пример обозначения: 500 HV - твердость по Виккерсу, полученная при силе 30 кгс и времени выдержки

При других условиях испытания после букв HV указывают нагрузку и время выдержки.

Пример обозначения: 220 HV10/40 - твердость по Виккерсу, полученная при силе 98,07 Н (10 кгс) и времени выдержки 40 с.

Общего точного перевода чисел твердости, измеренных алмазной пирамидой (по Виккерсу), на числа твердости по другим шкалам или на прочность при растяжении не существует. Поэтому следует избегать таких переводов, за исключением частных случаев, когда благодаря сравнительным испытаниям имеются основания для перевода.

Метод Роквелла. Метод измерения твердости металлов и сплавов по Роквеллу регламентирует ГОСТ 9013 – 59\*.

Сущность метода заключается во внедрении образца (или изделия) алмазного конусного (шкалы А, С,

Д) или стального сферического наконечника (шкалы В, Е, F, G, H, К) под действием последовательно прилагаемых предварительной и основной сил и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основной силы.

Твердость по Роквеллу обозначают символом HRC указанием шкалы твердости, которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр.

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

С целью обеспечения единства измерений введен государственный специальный эталон для воспроизведения шкал твердости Роквелла и Супер-Роквелла и передачи их при помощи образцовых средств измерений (рабочих эталонов) рабочим средствам измерений, применяемым в стране (ГОСТ 8.064 - 94).

Диапазоны шкал твердости по Роквеллу и Супер-Роквеллу, воспроизводимых эталоном, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны шкал твердости по Роквеллу и Супер-Роквеллу, воспроизводимых эталоном по ГОСТ 8.064– 94

Шкалы		Диапазоны измерений
Роквелла	А	70 - 93 HRA
	В	25 - 100 HRB
	С	20 - 67 HRC
Супер-Роквелла	N 15	70 - 94 HRN 15
	N 30	40 - 86 HRN 30
	N 45	20 - 78 HRN 45
	T 15	62 - 93 HRT 15
	T 30	15 - 82 HRT 30
	T 45	10 - 72 HRT 45

Таблица 3

Сравнение чисел твердости металлов и сплавов по различным шкалам

ВиккерсHV	Бринелль HB	РоквеллHRB	св, МПа	ВиккерсHV	Бринелль HB	РоквеллHRC	св, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
100	100	52,4	333	245	245	21,2	815
105	105	57,5	350	250	250	22,1	835
110	110	60,9	362	255	255	23,0	855
115	115	64,1	382	260	260	23,9	865
120	120	67,0	402	265	265	24,8	880
125	125	69,8	410	270	270	25,6	900
130	130	72,4	430	275	275	26,4	910
135	135	74,7	450	280	280	27,2	930
140	140	76,6	470	285	285	28,0	950
145	145	78,3	480	290	290	28,8	970
150	150	79,9	500	295	295	29,5	980
155	155	81,4	520	300	300	30,2	1000
160	160	82,8	530	310	310	31,6	1030
165	165	84,2	550	320	319	33,0	1060
170	110	85,6	565	330	328	34,2	1090
175	175	87,0	580	340	336	35,3	1120
180	180	88,3	600	350	344	36,3	1150
185	185	89,5	620	360	352	37,2	1180
190	190	90,6	640	370	360	38,1	1200
195	195	91,7	650	380	368	38,9	1230
200	200	92,8	665	390	376	39,7	1260
205	205	93,8	685	400	384	40,5	1290
210	210	94,8	695	410	392	41,3	1305
215	215	95,7	715	420	400	42,1	1335
220	220	96,6	735	430	408	42,9	1365
225	225	97,5	745	440	416	43,7	1385
230	230	98,4	765	450	425	44,5	1410
235	2 35	99,2	785	460	434	45,3	1440
240	240	100,0	795	470	443	46,1	1480

*Влияние различных факторов на твердость материала*

Твердость является структурной характеристикой материала, ее связь с электронной структурой сложна и неоднозначна. Более очевидно влияние на твердость температуры и пористости.

При увеличении температуры твердость материала снижается из-за увеличения подвижности дислокаций и, как следствие, роста

пластических деформаций. Температурная зависимость твердости и критического напряжения сдвига для хрупких материалов может быть представлена следующим образом:

при высоких температурах  $H \sim t = AT1/3\exp(U / 3kT)$ ; при низких температурах  $H \sim t = (Q - kT \cdot \ln M) / V$ , где  $H$  – твердость, МПа;

$t$  – напряжение сдвига, МПа;

$U$  – энергия активации процесса скольжения дислокаций, Дж;  $Q$  – тепловая энергия материала, Дж;

$V$  – активационный объем, м<sup>3</sup>;

$k$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>;

$A$  и  $M$  – параметры, зависящие от свойств материала и скорости деформации.

По данным А.Р. Андриевского, показанным на примере тугоплавких соединений, в частности, карбида вольфрама, пористость в интервале до 4% (пористость природных каменных материалов группы гранита и керамического фарфорового черепка), практически, не оказывает влияние на твердость, однако при 13% пор (обычный тяжелый бетон) влияние пор весьма существенно, особенно при высоких температурах.

## Тема 2.2. Определение физических, химических, технологических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 2 час.)

К физическим свойствам относят:

- цвет;
- плотность;
- температуру плавления;
- теплопроводность.

Цвет – способность металлов отражать излучение с определенной длиной волны. Например, медь имеет розовато-красный цвет, алюминий – серебристо-белый.

Плотность металла определяется отношением массы к единице объема. По плотности металлы делят на легкие (менее 4500 кг/м<sup>3</sup>) и тяжелые.

Температура плавления – температура, при которой металл переходит из твердого состояния в жидкое. По температуре плавления различают тугоплавкие (вольфрам – 3416 °С, тантал – 2950 °С и др.) и легкоплавкие (олово – 232 °С, свинец – 327 °С). В единицах СИ температуру плавления выражают в градусах Кельвина (К).

Теплопроводность – способность металлов передавать тепло от более нагретых участков тела к менее нагретым. Большой теплопроводностью обладают серебро, медь, алюминий. В единицах СИ теплопроводность имеет размерность Вт/(м·К).

Способность металлов проводить электрический ток оценивают двумя противоположными характеристиками – электрической проводимостью и электрическим сопротивлением.

Электропроводность оценивается в системе СИ в сименсах (См). Электросопротивление выражают в омах (Ом). Хорошая электропроводность необходима, например, для токонесущих проводов (их изготавливают из меди, алюминия). При изготовлении электронагревательных приборов и печей необходимы сплавы с высоким электросопротивлением (из нихрома, константана, манганина). С повышением температуры металла его электропроводность уменьшается, а с понижением – увеличивается.

Магнитные свойства выражаются в способности металлов намагничиваться. Высокими магнитными свойствами обладают железо, никель, кобальт и их сплавы, которые называют ферромагнитными. Материалы с магнитными свойствами применяют в электротехнической аппаратуре и для изготовления магнитов.

Химические свойства характеризуют способность металлов и сплавов сопротивляться окислению или вступать в соединение с различными веществами: кислородом воздуха, растворами кислот, растворами щелочей и др.

К химическим свойствам относят:

- коррозионную стойкость
- жаростойкость

Коррозионная стойкость – способность металлов сопротивляться химическому разрушению под действием на их поверхность внешней агрессивной среды (коррозия происходит при вступлении в химическое взаимодействие с другими элементами).

Жаростойкость – способность металлов сопротивляться окислению при высоких температурах. Химические свойства учитывают в первую очередь для изделий или деталей, работающих в химически агрессивных средах:

- емкости для перевозки химических реактивов;
- трубопроводы химических веществ;
- приборы и инструменты в химической промышленности.

Технологические свойства характеризуют способность материала подвергаться различным способам холодной и горячей обработки.

1. Литейные свойства – характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок.

Жидкотекучесть – характеризует способность расплавленного металла заполнять литейную форму.

Усадка (линейная и объемная) – характеризует способность материала изменять свои линейные размеры и объем в процессе затвердевания и охлаждения. Для предупреждения линейной усадки при создании моделей используют нестандартные метры.

Ликвация – неоднородность химического состава по объему.

Способность материала к обработке давлением – это способность материала изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок не разрушаясь. Она контролируется в результате технологических испытаний, проводимых в условиях, максимально приближенных к производственным. Листовой материал испытывают на перегиб и вытяжку сферической лунки. Проволоку испытывают на перегиб, скручивание, на навивание. Трубы испытывают на раздачу, сплющивание до определенной высоты и изгиб. Критерием годности материала является отсутствие дефектов после испытания.

Свариваемость – это способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества. Оценивается по качеству сварного шва.

Способность к обработке резанием – характеризует способность материала поддаваться обработке различным режущим инструментом. Оценивается по стойкости инструмента и по качеству поверхностного слоя.

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

1. Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.
2. Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных, щелочных сред.
3. Жаростойкость – это способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре.
4. Жаропрочность – это способность материала сохранять свои свойства при высоких температурах.
5. Хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах.
6. Антифрикционность – способность материала прирабатываться к другому материалу.

Методы определения коэффициента теплопроводности: конвекция

Теплопроводность – это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела (или тел) к менее нагретым частям (или телам), осуществляемый хаотически движущимися частицами тела (атомами, молекулами, электронами и т.п.)

Для измерения теплопроводности жидкостей и газов используются некоторые методы, применяемые для твердых тел, и ряд специфических.

а) Метод плоского слоя.

Конструкция измерительной ячейки, используемой для определения теплопроводности жидкостей, аналогична конструкции установки, изображенной на рис. 1. Особенностью реализации метода для жидкостей – контроль появления конвекции в исследуемом слое. Для исключения

этого эффекта рекомендуется располагать рабочие поверхности строго горизонтально и осуществлять подвод теплоты к исследуемому слою только сверху. Для измерения теплопроводности жидкостей может быть использован метод продольного теплового потока (см. рис. 2).

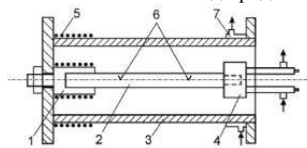


Рисунок 2 – Схема установки:  
1 – блок нагревателя; 2 – образец; 3 – опорный цилиндр; 4, 7 – холодильники;  
5 – нагреватель опорного цилиндра; 6 – термопары

Теплостойкость (Красностойкость) полимеров - способность не размягчаться при повышении температуры. Количественная характеристика теплостойкости - температура, при которой в условиях воздействия постоянной нагрузки деформация образца не превышает некоторую величину.

Стандартный метод определения точки размягчения по Вика. (D1525-70) Метод пригоден для большинства термопластов. Не рекомендуется для этилцеллюлозы, пластифицированного ПВХ, ПВДХ и др. материалов с широким диапазоном размягчения (по Вика).

Метод позволяет сравнивать теплостойкость термопластов; результаты определений различных лабораторий отличаются не более чем на 4С. Точность внутри одной лаборатории обычно  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Есть два метода повышения температуры: метод А - со скоростью  $5\pm 5^{\circ}\text{C}$  в час. и метод В - со скоростью  $120\pm 12^{\circ}\text{C}/\text{час}$ .

Точка размягчения по Вика - это температура, при которой тупая игла сечения  $1\text{мм}^2$  проникает в образец термопласта на 1 мм при стандартной скорости повышения температуры.

Аппаратура - баня с нагреваемой жидкостью и термометром.

Жидкость - силиконовое масло, глицерин, этиленгликоль, минеральное масло. Жидкость должна иметь низкую вязкость. Вес, прикладываемый к игле,  $1\text{кг}+40-0\text{ г}$ . Термометр градуирован с точностью  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Игла  $1+0,05-0,02\text{ мм}^2$ . Для иглы подходит стальная проволока  $f\ 1,143\text{ мм}$ . Длина иглы  $5...12,5\text{ мм}$ .

Проводят два измерения, результаты измерений не должны отличаться более чем на  $20\text{С}$ . Применяемые образцы: ширина  $12,7\text{ мм}$ , толщина  $3,2\text{ мм}$ . В протоколе приводят среднее из двух измерений.

Теплостойкость по Вика для аморфных полимеров коррелирует с температурой стеклования, а для кристаллических полимеров с температурой плавления.

Плотность — скалярная физическая величина, определяемая как отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму или площади (поверхностная плотность). Для обозначения плотности обычно используется символ ( $\rho$ ).

При реализации весового метода определяют вес и объем тела (вычисляют или погружают в жидкость). Данный способ используют при определении плотности мелкозернистых веществ. При этом вместо воды, плохо смачивающей поверхность и растворяющей многие вещества, используют спирт, бензол, толуол. Измерение объема вытесненной жидкости заменяют измерением ее взвешиванием.

Используют ареометрический метод, основанный на измерении выталкивающей силы. Метод предусматривает последовательное взвешивание исследуемого тела в воздухе и при его погружении в жидкость. Истинное значение массы тела определяют путем вычитания веса нити подвески с учетом выталкивающей силы нити.

Метод уравнивания веса и подъемной силы используют при определении плотности мелкозернистых и порошковых веществ, помещая их в химически не взаимодействующую с ними жидкость. Путем изменения плотности жидкости доводят ее плотность до состояния равновесия с телом, погруженным в жидкость.

### Тема 2.3. Исследование поверхностного слоя металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 1 час.)

Другим важнейшим показателем качества детали, обеспечивающим выполнение ею служебного назначения, и выполнение которого связано с существенными затратами при изготовлении деталей, является качество поверхностного слоя.

Под поверхностным слоем детали понимается как сама поверхность, полученная в результате обработки, так и слой материала, непосредственно прилегающий к ней.

Детали работают в разнообразных условиях. В зависимости от назначения изделия и условий его работы детали могут подвергаться коррозионному воздействию, воспринимать большие нагрузки, испытывать контактное взаимодействие с другими деталями и т. д. Поэтому детали должны обладать контактной жесткостью, сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью, износостойкостью и другими свойствами, во многом зависящими от качества поверхностного слоя. Например:

— скорость и характер изнашивания детали в значительной степени зависят от высоты неровностей поверхности, их направления, твердости поверхностного слоя и др.;

— прочность неподвижных посадок сопрягаемых деталей непосредственно связана с шероховатостью сопрягаемых поверхностей;

— сопротивление усталости деталей зависит от шероховатости их поверхностей, наличия отдельных повреждений, способствующих концентрации напряжений и т. д.

В связи с изложенным наружный слой детали, как правило, по своим физико-химическим свойствам отличается от свойств основного материала детали. Он формируется при изготовлении и эксплуатации и по глубине может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров. Поверхностный слой характеризуется геометрическими характеристиками и физико-химическими свойствами (рис. 4).

Под геометрическими характеристиками поверхностного слоя понимают макроотклонение, волнистость, шероховатость и субшероховатость.

Макроотклонение 1 поверхности - это неровность высотой  $10\sim 2... 103\text{ мкм}$  на всей ее длине или ширине.

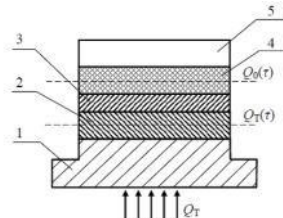


Рисунок 4 – Схема поверхностного слоя детали:  
1 – основание; 2 – пластина; 3 – контактная пластина; 4 – исследуемый образец; 5 – стержень

Рис. 4. Схема поверхностного слоя детали:

1 - макроотклонение; 2 - волнистость; 3 - шероховатость; 4 - субшероховатость; 5 - адсорбированная зона; 6 - зона оксидов; 7 - границная зона материала; 8 - зона материала с измененными физико-химическими свойствами Волнистость 2 поверхности — совокупность неровностей высотой примерно  $\text{мкм}$  с шагом большим, чем базовая длина /, используемая для ее измерения.

Под шероховатостью 3 поверхности понимают совокупность неровностей высотой  $10\sim 2... 103\text{ мкм}$  с шагом меньшим, чем базовая длина, используемая для ее измерения.

Субшероховатость 4 - это субмикронеровности высотой примерно  $10\ 3\ 10\ 2\ \text{мкм}$ , накладываемые на шероховатость поверхности.

Верхняя зона 5 толщиной около  $10... 100\ \text{мкм}$  - это адсорбированный из окружающей среды слой молекул и атомов органических и неорганических веществ (например, воды, СОЖ, растворителей, промывочных жидкостей).

Промежуточная зона 6 толщиной примерно

$1... 3... 1\ \text{мкм}$  представляет собой продукты химического воздействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

Граничная зона 7 имеет толщину, равную нескольким межатомным расстояниям со значительно измененными кристаллической и электронной структурой и химическим составом.

Зона 8 имеет толщину примерно 10–10 мкм с измененными физико-химическими свойствами по сравнению со свойствами основного материала, где под физико-химическими свойствами поверхностного слоя понимают остаточные напряжения, наклеп и структуру.

Поверхностные остаточные напряжения оцениваются макронапряжениями 1-го рода, макронапряжениями 2-го рода и статическими искажениями решетки (напряжения 3-го рода).

Поверхностные напряжения или наклеп оцениваются степенью деформирования, глубиной наклепа, степенью наклепа, градиентом наклепа и макродеформацией решетки.

Структура поверхностного слоя оценивается: размером зерна; плотностью дислокаций; концентрацией вакансий; размером блоков; углом разориентации блоков; размером областей когерентного рассеяния; сред - неквадратическим смещением атомов, вызванным статическими искажениями решетки; среднеквадратическим смещением атомов, вызванным их тепловыми колебаниями.

Оценка геометрических характеристик и физико-химических свойств может быть непараметрической и параметрической.

Непараметрическая оценка заключается в графическом изображении макроотклонения, волнистости, шероховатости, субшероховатости, структуры, распределения остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя для визуального сравнения. В частности, для непараметрической оценки шероховатости используют профилограммы, кривые опорных длин профиля, кривые распределения ординат или вершин профиля, спектрограммы профиля, топограммы и т. п.

При параметрической оценке характеристик поверхностного слоя деталей машин используются приведенные ниже параметры.

Макроотклонение (отклонение формы) характеризуется:

- максимальным макроотклонением  $f_{\max}$ , мкм;
- высотой сглаживания макроотклонения (расстояние от средней линии профиля до огибающей)  $H_p$ , мкм.

Отклонение формы нормируется значением допуска формы поверхности и рекомендована ее взаимосвязь с допуском на размер.

Волнистость характеризуется:

- средним арифметическим отклонением профиля волн  $W_a$ , мкм;
- базовой длиной  $l_w$ ;
- средней высотой волн  $W_z$ , мкм;
- наибольшей высотой профиля волн  $W_{glax}$ , мкм;
- высотой сглаживания волнистости  $W_p$ ;
- относительной опорной длиной профиля волн  $tp_w$ , %;
- средним шагом волн  $S_{mw}$ , мм;
- средним радиусом выступов волн  $R_{wcp}$ , мм.
- текущее расстояние от средней линии до вершины волны  $U$ ;
- текущее расстояние от средней линии до впадины волны  $H$ ;
- текущее значение ординаты  $y$ ;
- текущее значение шага волны  $S_{mw}$ .

Для оценки волнистости поверхности на практике используют различные отраслевые нормы и рекомендации. Так, в подшипниковой промышленности при шлифовании колец (диаметром 18...120 мм) класса Н (класса 0) волнистость по высоте составляет 40... 110 % шероховатости, а по классу С (4 - 5-й классы) — 15... 60 %.

Волнистость в зависимости от ее высоты подразделяют на девять классов: Высота волны, мкм. 1 2 4 8 16 32 64 125 250, Класс волнистости I II III IV V VI VII VIII IX

Шероховатость в соответствии с ГОСТ 2789—73 характеризуется параметрами, приведенными на рис.

- наибольшая высота профиля волн  $f_{\max}$ ;
- глубина сглаживания профиля  $R_w$ ;
- высота сглаживания профиля  $R_p$ ;
- текущая величина ординаты профиля шероховатости
- высота  $f$ -го наибольшего выступа профиля  $f_i$ ;
- высота  $i$ -й наибольшей впадины профиля  $h_i$ ;
- значение  $f$ -го шага неровностей по средней линии в пределах базовой длины  $S_i$ ;
- опорная длина  $l$ -го выступа профиля  $l_p$ , на уровне  $p$ ;
- радиус  $f$ -го выступа профиля шероховатости  $r_f$ ;
- значение  $f$ -го шага по вершинам местных выступов  $S_i$ ;
- базовая длина  $L$ .

*Металлографический анализ металлов и сплавов. Назначение метода, используемое оборудование.*

Металлография – наука о структуре металлов и сплавов; раздел металловедения. Металлография исследует закономерности образования структуры металла, изучает его макроструктуру и микроструктуру, атомно-кристаллическое строение, влияние структуры на механические, электрические, магнитные и другие свойства.

Макроструктуру металлов и сплавов в металлографии наблюдают невооруженным глазом либо при небольшом увеличении (в 30–40 раз). Макроструктура характеризуется формой и расположением крупных кристаллитов (зёрен), наличием и расположением различных дефектов металлов, распределением примесей и неметаллических включений.

Исследования микроструктуры в металлографии производят с помощью светового или электронного микроскопов, с помощью дифрактометра

Металлография позволяет устанавливать взаимосвязь между структурой и свойствами металлических материалов. Устанавливая закономерности образования структуры, металлография прогнозирует свойства новых сплавов.

Помимо закономерностей образования структуры, металлография изучает условия и причины возникновения при кристаллизации, пластической деформации и рекристаллизации текстуры металлов, которая обуславливает анизотропию свойств поликристаллического материала.

Изучение структуры металла в металлографии проводят на специально подготовленных плоских и гладких поверхностях – *шлифах*. Приготовлению шлифа заключается в шлифовке и последующей полировке металла.

Следующим этапом металлографического процесса является выявление структуры. Чаще всего это химическое *травление*. При этом поверхность шлифа подвергают воздействию специального реактива, в результате чего выявляются особенности химического и фазового состава и кристаллического строения (макроструктура и микроструктура) – границы зерен, различные фазы, неметаллические включения, поверхностные слои, поры, трещины и др. Для выявления структуры в металлографии также используют *электролитическое травление* и метод магнитной металлографии. Кроме того металлография практикует следующие способы выявления микроструктуры: тепловое травление, травление в расплавленных солях, катодное распыление, выявление микроструктуры по изменению объема.

Металлография включает в себя и *физические методы контроля и исследования металлов*, такие как рентгеноструктурный анализ, определение теплоёмкости и электросопротивления, неразрушающий контроль металлов и др.

### Качественная металлография

В металлографической практике форма сечений микрочастиц (или самих микрочастиц) оценивается главным образом чисто качественными понятиями. Например, форма микрочастиц цементита в перлите определяется как зернистая, четкообразная или пластинчатая. Имеет место качественная металлография. Часто применяется полуколичественная оценка условными баллами при помощи шкал структур, представляющих произвольный набор тех же определенных качественной металлографии, расположенных в определенной последовательности.

### Количественная металлография

Количественная металлография – это металлография, занимающаяся изучением количественных характеристик микроструктуры.

Реальное положение вещей таково, что количественная металлография стала возможна относительно недавно, в конечном итоге – благодаря автоматическим анализаторам изображений (ААИ) и находится ещё только в начале своего развития. Основные операции количественной металлографии – подсчет, измерение и классификация элементов, находящихся в поле зрения. Под элементами пространственного микроскопического строения понимаются различные микрочастицы (зёрна, кристаллиты, включения, выделения и др.), а также точечные, линейные, ареальные (плоскостные) образования (точки, линии и поверхности стыка микрочастиц).

Результатом операций количественной металлографии могут быть, в частности, количественные параметры зерна или объемные доли различных фаз в структуре сплава.

### Стереометрическая металлография

Стереометрическая металлография – это комплекс методов количественной оценки пространственного микроскопического строения металлов и сплавов. Более развернутое определение: стереометрическая металлография – это система методов анализа, позволяющая получить полное представление о действительном пространственном строении сплава по плоскостной структуре – фазовом составе сплава, дисперсности, характеризуемой величиной удельной поверхности, количестве микрочастиц в объеме, их гранулометрическом составе, геометрической форме и т. д.

В качестве обобщения можно отметить, что металлография вообще является стереологическим методом качественного и количественного исследования структуры металлов и сплавов. Качественные (описательные) методы исследования структуры позволяют описать с помощью баллов или условных обозначений тип, форму, размер и взаимное расположение обнаруженных фаз и структурных составляющих методом сравнения с ранее разработанными эталонами микроструктур. Задача количественной металлографии состоит в изучении характеристик пространственного строения структуры путем измерения численных параметров микроскопического изображения.

### Из истории развития металлографии

В России первые металлографические исследования железа и его сплавов были проведены Аносовым П.П. (1799–1851 гг.). Работая на Златоустовском металлургическом заводе (1830–1835 гг.), П.П. Аносов применил микроскоп для изучения структуры стали и ее изменений послековки и термообработки и установил существование связи между строением и свойствами стали. Именно эти годы можно считать началом зарождения металлографии в России. В 60-х годах XIX века Видманштеттен и Сорби применили микроскоп для исследования строения железа метеоритов.

Основы научного металловедения, в рамках которого существует металлография, были заложены русским металлургом Д.К. Черновым, который открыл зависимость свойств стали от температуры нагрева и охлаждения, выявил взаимосвязь структуры и свойств стали. В 1878 году Чернов Д.К. изложил свои представления о механизме кристаллизации стали.

Металлография на сегодня имеет в своём распоряжении богатый арсенал средств и методов изучения структуры и свойств металлов. Например, световые и электронные микроскопы, позволяющие совершать металлографические исследования при комнатной температуре. Для изучения изменений структуры металлов в процессе нагрева до высоких температур применяют специальные высокотемпературные микроскопы. Такую металлографию называют высокотемпературной металлографией.

### Металлографические исследования

Металлографические исследования – это комплекс испытаний и аналитических мероприятий, направленный на изучение макроструктуры и микроструктуры металлов, исследование закономерностей образования структуры и зависимостей влияния структуры на механические, электрические и другие свойства металла (сплава).

При металлографическом исследовании выполняется ряд операций, в результате которых получают достоверные данные по качественному и количественному составу материала. Любое металлографическое исследование включает в себя четыре этапа:

- Пробоотбор
- Пробоподготовка
- Собственно металлографический анализ
- Статистическая обработка результатов анализа.

Общая погрешность результатов металлографического исследования равна сумме погрешностей на каждом из вышеназванных этапов, и, конечно же, при выполнении металлографического исследования необходимо стремиться к получению результата с минимальной погрешностью.

Помимо комплекса мероприятий пробоподготовки для оптических исследований (включает в себя пробоотбор, запрессовку, шлифовку, полировку и травление), в металлографическое исследование обязательно входит процедура распознавания и анализа структуры с помощью микроскопии. Кроме того, сегодня сложно представить себе металлографическое исследование без современных систем анализа изображения (программное обеспечение для металлографических лабораторий).

Очевидно, что наиболее характерным видом металлографического исследования является выявление микроструктуры металлов, затем анализ микроструктуры металлов (сплавов), а также анализ макроструктуры.

Однако к функциям металлографической лаборатории нередко относят также исследования механических свойств металлов и сплавов. В случаях, когда на предприятии нет отдельной службы, такой как лаборатория механических испытаний, к разряду металлографических исследований относят также такие испытания, как:

- Испытание на растяжение, сжатие;
- Ударные испытания;
- Измерение твердости металлов и сплавов;
- Определение микротвердости отдельных фаз. В целях изучения закономерностей структурообразования в металлографических

исследованиях также применяют термическую обработку сплавов, при этом используют самые разные виды и режимы термообработки: отжиг, нормализация стали, закалка, отпуск, старение, обработка стали холодом.

### Оборудование для металлографических исследований

- Отрезные станки;
- Прессы для запрессовки;
- Оборудование для холодной заливки;
- Шлифовально-полировальные станки;
- Сушильные шкафы;
- Микроскопы в комплексе с системами анализа изображений;
- Твердомеры и Микротвердомеры;
- Печи, ванны, закалочные баки для термообработки.

### Оптическая микроскопия. Назначение метода. Приготовление шлифов.

#### Применяемые приборы. Влияние микроструктуры на механические свойства материала.

Микроскоп – прибор для получения увеличенного изображения объектов или деталей их структуры, не видимых невооруженным глазом. Глаз способен различать детали объекта, отстоящие друг от друга не менее чем на 0,08 мм; с помощью светового микроскопа можно видеть детали, расстояние между которыми составляет до 0,2 мкм; электронный микроскоп позволяет получить разрешение до 0,1–0,01 нм. Способность систем из двух линз увеличивать изображение предметов была известна мастерам, изготовлявшим очки. О таких свойствах полусферических и

плосковыпуклых линз знали оптики-ремесленники Нидерландов и Северной Италии в XVI в. Есть сведения, что приблизительно в 1590 г. прибор типа микроскопа был построен Янсенем (Z. Jansen) в Нидерландах.

Сначала появились простые микроскопы, состоящие из одного объектива, а затем были сконструированы более сложные, имеющие, кроме объектива, и окуляр.

Быстрое распространение и совершенствование микроскопов началось после того, как Галилей (G. Galilei), совершенствуя сконструированную им зрительную трубу, стал использовать ее как двоячный микроскоп (1609—1610), изменяя расстояние между объективом и окуляром.

Позднее, в 1624 г., добившись изготовления более короткофокусных линз, Галилей значительно уменьшил габариты своего микроскопа.

В 1625 г. членом Римской «Академии зорких» («Akademia dei lincei») И. Фабером был предложен термин «микроскоп». Первые успехи, связанные с применением микроскопа в научных биологических исследованиях, были достигнуты Гуком (R. Hooke), который первым описал растительную клетку (около 1665 г.).

А. Левенгук (A. van Leenwenhoek) с помощью микроскопа обнаружил и зарисовал сперматозоиды различных простейших, детали строения костной ткани (1673—1677).

В 1668 г. Е. Дивини, присоединив к окуляру полевую линзу, создал окуляр современного типа; в 1673 г. Гавелий ввел микрометрический винт, а Гертель предложил под столик микроскопа поместить зеркало. Таким образом, микроскоп стали монтировать из тех основных деталей, которые входят в состав современного биологического микроскопа.

В начале XVIII в. микроскопы появились в России; здесь Эйлер (Z. Euler) впервые разработал методы расчета оптических узлов микроскопа.

В XVIII и XIX вв. микроскопы продолжали совершенствоваться. В 1827 г. Амичи (G.V. Amici) впервые применил иммерсионный объектив.

В конце XVII — начале XIX в. была предложена конструкция и дан расчет ахроматических объективов для микроскопов, благодаря чему их оптические качества значительно улучшились, а увеличение объектов, обеспечиваемое таким микроскопом, возросло с 500 до 1000 раз.

В 1850 г. английский оптик Сорби (H.C. Sorby) сконструировал первый микроскоп для наблюдения объектов в поляризованном свете.

В 1872—1873 гг. Аббе (E. Abbe) разработал ставшую классической теорию образования изображений несамосветящихся объектов в микроскопе. Труды английского оптика Дж. Сиркса (1893) положили начало интерференционной микроскопии.

В 1903 г. Р. Жигмонди (R. Zsigmondy) и Зидентопф (H. Siedentopf) создали ультрамикроскоп, в 1911 г. Саньяком (M. Sagnac) был описан первый двухлучевой интерференционный микроскоп, в 1935 г. Зернике (F. Zernicke) предложил использовать метод фазового контраста для наблюдения в микроскопах прозрачных, слабо рассеивающих свет объектов. В середине XX в. был изобретен электронный микроскоп, в 1953 г. финским физиологом Вильсоном (A. Wilska) был изобретен аностральный микроскоп.

Большой вклад в разработку проблем теоретической и прикладной оптики, усовершенствование оптических систем микроскопа и микроскопической техники внесли М.В. Ломоносов, И.П. Кулибин, Л.И. Мандельштам, Д.С. Рождественский, А.А. Лебедев, С.И. Вавилов, В.П. Линник, Д.Д. Максудов и др.

#### Методы световой микроскопии

*Принцип действия и устройство металлографического микроскопа.* Для изучения микроструктуры металлов используют металлографические микроскопы (рис. 1.4). Подготовленный соответствующим образом шлиф / помещают перпендикулярно оптической оси микроскопа в плоскости, совпадающей с передней главной фокальной плоскостью объектива 2. Шлиф освещается проходящим через объектив почти параллельным оптической оси пучком света, который формируется посредством осветительной системы, состоящей из источника (лампы) 3, коллекторной линзы 4, апертурной 5 и полевой 7 диафрагм, вспомогательных линз 6, 8 и полупрозрачной пластинки 9. Световые лучи, отражающиеся от участков поверхности шлифа, приблизительно нормальных оптической оси микроскопа, попадают в объектив, а те лучи, которые отражаются от неровностей поверхности, не попадают в его поле. На конечном изображении поверхности цы зерен, которые при подготовке шлифа обычно вытравливаются в канавки, или частицы выделений, включения и поры.

Объектив создает действительное увеличенное изображение образца в передней фокальной плоскости окуляра  $S_1$ . Окуляр дополнительно увеличивает это изображение и дает окончательное мнимое увеличенное изображение образца  $S_2$  на расстоянии ~250 мм от глаз наблюдателя 11.

При фотографировании изображения или его наблюдении на экране вместо «глазных» окуляров используют специальные фотоокуляры (или гомали), которые принимают световые лучи, идущие непосредственно из объектива, и создают действительное первичное изображение на фотопластинке или экране.

*Увеличение* микроскопа равно произведению соответствующих увеличений объектива и окуляра. Основное увеличение обеспечивается объективом, оно может достигать 100. Увеличение окуляра обычно не превышает 20. Если необходимо точно определить увеличение проецируемого изображения, то в качестве объекта следует использовать пластинку с микрометрической шкалой (объект-микрометр), на которой нанесены через каждые 0,01 мм деления на общей длине 1 мм.

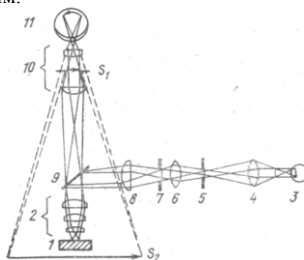


Рис. 1.4. Принципиальная схема металлографического микроскопа

*Разрешающая способность* микроскопа характеризуется минимальным расстоянием  $d$  между двумя соседними деталями структуры объекта, которые еще могут быть различены. Ограничения разрешающей способности оптических приборов связаны с дифракционными явлениями и аберрациями элементов оптических систем. Максимальная разрешающая способность микроскопа соответствует условию:

$$d = d\lambda / 2n \sin \alpha = \lambda / 2A, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света;  $n$  — показатель преломления среды между объектом и объективом (для воздуха  $n=1$ );  $\alpha$  — угловая апертура объектива, равная половине угла, под которым виден зрачок объектива из точки предмета, лежащей на оптической оси. Величина  $A = n \sin \alpha$  называется числовой апертурой и является важнейшей характеристикой объектива. Числовую апертуру объектива можно увеличить, заполняя пространство между объективом и объектом (шлифом) иммерсионным маслом (обычно кедровым) с  $n=1,52$ . Для этой цели используют специальные иммерсионные объективы.

Поскольку величина  $\alpha$  практически не бывает больше  $\sim 72^\circ$  и максимальное значение  $\sin \alpha \approx 0,95$ , максимальное значение числовой апертуры для «сухого» объектива составляет  $A = 1 \times 0,95 = 0,95$ , а для иммерсионного объектива  $A = 1,52 \times 0,95 = 1,44$ .

Для освещения объекта наиболее часто применяют белый свет, для которого можно принять  $\lambda = 0,55$  мкм. Согласно условию (1) максимальная разрешающая способность микроскопа равна:  $d \approx 0,55 \div 2 \div 1,44 \approx 0,2$  мкм.

Чтобы использовать разрешающую способность объектива, т. е. увидеть те детали структуры объекта, которые разрешаются объективом, необходимо установить соответствующее увеличение микроскопа. Увеличение микроскопа  $N$  называют *полезным*, если разрешаемые детали структуры можно наблюдать под углом зрения  $2' - 4'$ . Полезное увеличение находится в пределах  $N \approx 500A \div 1000A$  (2).

Увеличение меньше 500A не позволяет различить все детали структуры, изображение которых формируется объективом при апертуре  $A$ , а применение увеличений, превышающих 1000A, нецелесообразно, поскольку оно не дает каких-либо новых деталей в изображении структуры, а лишь приводит к ухудшению качества изображения.

При исследовании структуры металла объектив выбирают, исходя из необходимого полезного увеличения микроскопа, определяемого из выражения  $N = 200/d'$  где  $d'$  — минимальный размер интересующих деталей структуры (например, частиц какой-либо фазы), мкм; 200 —



разрешаемое расстояние для глаза наблюдателя, мкм.

Зная величину  $N$ , можно определить соответствующую числовую апертуру по формуле (2) и выбрать объектив, а затем окуляр.

Следует учитывать, что в практике металлографических исследований иногда приходится в ущерб разрешающей способности заботиться о повышении контрастности изображения и об увеличении глубины резкости, характеризуемой величиной вертикального смещения деталей микроструктуры, которое не приводит к потере фокусировки.

Эта величина обратно пропорциональна числовой апертуре и общему увеличению микроскопа, т.е. при более рельефной поверхности образца целесообразно использовать объективы с малой апертурой. Контрастность изображения растет до тех пор, пока общее увеличение микроскопа не превзойдет полезное увеличение. Поэтому увеличение окуляра не должно быть излишне высоким, так как это вызывает размытие изображения деталей структуры.

*Объектив* микроскопа состоит из нескольких линз, установленных коаксиально. Система линз обеспечивает более или менее полное устранение дефектов изображения (аббераций), к которым относятся хроматическая и сферическая абберации, астигматизм, кома, кривизна изображения и дисторсия.

Хроматическая абберация обусловлена тем, что при использовании монохроматического света лучи с меньшей длиной волны преломляются линзой сильнее, чем лучи с большей длиной волны; в результате возникают изображения разной величины, располагающиеся в различных плоскостях.

Сферическая абберация связана с различным преломлением монохроматических лучей, проходящих через различные участки линзы. В случае световых пучков с довольно большим диаметром к сферической абберации добавляются дефекты асимметрии (кома), в результате которых изображение отдельных деталей образца, располагающихся на некотором расстоянии от оси линзы, получается размытым. Вследствие астигматизма при прохождении через линзу пучка лучей от светящегося точечного источника, расположенного вне оптической оси, образуются две фокусные линии, находящиеся в разных плоскостях, а изображение точки в промежуточных плоскостях имеет форму круглого или эллиптического пятна рассеяния.

Абберация, называемая дисторсией, связана с различным увеличением деталей объекта, находящихся на разном расстоянии от оптической оси, так что изображения прямых линий оказываются искривленными и нарушается подобие в геометрической форме между предметом и его изображением. И наконец, возможно искривление изображения, при котором точечные изображения, возникающие от плоского объекта, перпендикулярного оптической оси, лежат не на плоскости, а на искривленной поверхности.

В зависимости от степени исправления аббераций и области спектра, в которой они работают, объективы металломикроскопов делятся на ахроматы, апохроматы, планохроматы и планапохроматы.

У ахроматических объективов исправлена сферическая абберация, кома и хроматическая абберация для двух цветов, наиболее важных для визуального наблюдения; кривизна изображения не исправлена. Апохроматические объективы отличаются более высокой степенью исправления сферической абберации и комы, а также обеспечивают более правильную цветопередачу. В сочетании с компенсационными окулярами эти объективы дают высокое качество изображения и особенно подходят для больших увеличений и микрофотографирования. Планахроматы и планапохроматы скорректированы соответственно так же, как ахроматические и апохроматические объективы, и, кроме того, у них исправлена кривизна изображения.

*Окуляры* микроскопов, как и объективы, характеризуются собственным увеличением, а также степенью коррекции изображения. Современные металломикроскопы снабжаются окулярами с увеличениями от 5 до 20. По роду и степени коррекции различают следующие основные типы окуляров: 1) простые, или окуляры Гюйгенса, используемые обычно при визуальной работе с объективами-ахроматами с низкой или средней апертурой; 2) компенсационные окуляры, специально рассчитанные на исправление остаточных хроматических аббераций объективов-апохроматов и применяемые с этими объективами; 3) фотоокуляры и гомали, которые предназначены для микрофотографирования или проектирования изображения на экран.

Для четкого наблюдения микроструктуры важно создать определенные условия освещения шлифа. Контрастность изображения возрастает с увеличением интенсивности освещения. Поэтому с учетом сложного пути луча в микроскопе и значительных потерь света применяемые источники света должны обладать достаточной мощностью при сравнительно малых габаритах. Для этих целей в современных металломикроскопах обычно используют кварцевые лампы с йодным циклом (галогенные лампы), а для получения наибольшей интенсивности — ксеноновые лампы высокого давления. Для уменьшения потерь интенсивности падающего света в некоторых микроскопах вместо полупрозрачной пластинки в ход лучей вводят призму.

Увеличение светопропускания и повышение контрастности изображения достигаются также в результате применения просветленной оптики, обеспечивающей устранение рефлексов при отражении.

*Методы микроскопического исследования металлов*

Большинство металлографических исследований проводят с применением светлопольного (вертикального) освещения (см. рис. 1.4). Для дополнительного повышения контрастности применяют другие виды освещения.

*Метод косого освещения.* При этом методе в создании изображения участвуют преимущественно косые лучи, не параллельные оптической оси системы. Повышение контраста при косом освещении связано, во-первых, с увеличением роли дифрагированных на разных элементах структуры объекта лучей в формировании изображения и, во-вторых, с образованием теней от рельефа поверхности объекта. Поэтому косое освещение целесообразно применять при достаточно резком рельефе поверхности шлифа, так как только при этом условии выступающие участки будут отбрасывать тень на остальную поверхность, которая дает меньшее отражение лучей. Косое освещение достигается обычно включением между объективом и полупрозрачной пластинкой призмы косого освещения или смещением, по отношению к оптической оси системы апертурной диафрагмы, вращением которой изменяется плоскость падения света на объект.

*Метод темнопольного освещения.* При темнопольном освещении в отличие от светлопольного свет не проходит через объектив. Пройдя через кольцевую диафрагму / (рис. 1.5), свет отражается от кольцевого зеркала 2, установленного на месте полупрозрачной пластинки, и попадает на зеркальную отражающую параболическую поверхность специального конденсора темного поля 5, который устанавливается на объектив или монтируется в одной оправе с ним (эпиобъектив). Такая система создает косое освещение объекта, при котором освещающий пучок имеет большую апертуру, чем в случае светлопольного освещения. Темнопольное изображение является обратным по отношению к светлопольному

(углубления и выступы становятся светлыми на однородном темном фоне), поскольку в объектив попадают лучи, отраженные неровностями поверхности. Этот тип освещения дает высококонтрастные изображения, четко выявляет зернистую структуру металла, границы между отдельными фазами, натуральный цвет неметаллических включений и дефекты на отполированной поверхности микрошлифа (царапины, поры, трещины).

*Исследование в поляризованном свете.* Поскольку большинство металлов, а также металлических и неметаллических фаз являются оптически анизотропными, в металлографических исследованиях часто целесообразно использовать поляризованный свет. С этой целью перед коллекторной линзой помещают поляризатор (призму Николя или поляроид). Создающийся в поляризаторе плоскополяризованный свет после отражения от объекта проходит через анализатор, расположенный между объективом и окуляром или над окуляром. Если объект оптически изотропен, то при соответствующем взаимном положении поляризатора и анализатора («положение скрещения») можно добиться полного поглощения света. Однако если кристаллиты одной или разных фаз оптически анизотропны, то при скрещенных полярофильтрах полного поглощения не происходит и отдельные кристаллы оказываются светлыми, т.е. получается видимое контрастное изображение. Эта преимущественная освещенность отдельных кристаллов объясняется эффектами эллиптической поляризации и вращением плоскости поляризации.

Структурные составляющие, которые имеют кубическую решетку, изотропны, поэтому их легко отличить от других составляющих. С помощью поляризованного света на нетравленных образцах анизотропных материалов можно изучать их микроструктуру и определять размер зерна. Этот метод позволяет также наблюдать интерметаллические фазы в легированных сталях. Но наиболее часто металлографическое исследование в поляризованном свете применяют для идентификации неметаллических включений в сталях, так как эти включения имеют характерные цвета или изменяют цвет при вращении предметного столика микроскопа. Для облегчения идентификации имеются специальные таблицы [11].

Конструкция металломикроскопа, приспособленного для исследования в поляризованном свете, предусматривает включение и выключение полярофильтров и вращение анализатора в пределах  $0-90^\circ$ .

Для изучения структуры металлов и природы неметаллических включений в поляризованном свете требуется высокое качество поверхности

шлифа", отсутствие заметного рельефа и следов механической обработки.

**Метод фазового контраста.** Контрастность изображения рельефных структур может быть дополнительно повышена при использовании системы фазового контраста, имеющейся в некоторых металломикроскопах, или отдельной фазовоконтрастной приставки к микроскопу. Неровности поверхности шлифа создают разность фаз отраженных световых лучей, которая усиливается системой, состоящей из кольцевой диафрагмы 1 и фазовой пластинки 2 (рис. 1.6). Кольцевую диафрагму устанавливают так, что ее изображение располагается в задней фокальной плоскости объектива и совпадает с кольцом фазовой пластинки, толщина которой иная, чем у остальной части пластинки. В результате этого световые лучи, проходящие через кольцо, сдвигаются по фазе (обычно на  $90^\circ$ ) относительно лучей, дифрагированных поверхностью образца и проходящих через пластинку за пределами кольца. Помимо этого, кольцо фазовой пластинки поглощает значительную часть проходящего через него света, что обеспечивает оптимальный контраст и резкость изображения. Для введения системы фазового контраста в оптическую систему микроскопа включается линза Бертрана, с помощью которой добиваются совмещения изображения апертурной диафрагмы с кольцом фазовой пластинки.

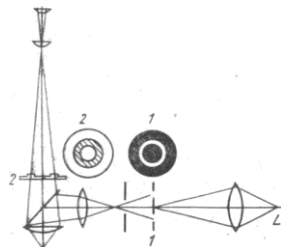


Рис. Схема метода фазового контраста: L — источник света; 5 — объект

С помощью фазовоконтрастного метода удается обнаружить разность в уровнях рельефа поверхности до  $\sim 50$  . Этот метод особенно полезно использовать для изучения границ зерен, двойников, линий скольжения и дисперсных выделений.

**Метод интерференционного контраста.** Небольшие изменения микрорельефа поверхности можно обнаружить с помощью интерференционного микроскопа или микроинтерферометра. Последний прибор позволяет, кроме того, количественно оценивать изучаемый рельеф, что особенно важно для исследования структурного механизма пластической деформации. Используют методы двухлучевой и многолучевой интерферометрии. В первом случае (интерферометр Линника) свет от источника L расщепляется полупрозрачной пластинкой T на два пучка (рис. 1.7).

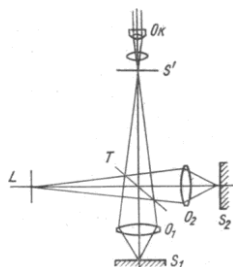


Рис. Принципиальная схема метода двухлучевой интерферометрии: Ok — окуляр

Один пучок, отраженный от пластинки T, падает на исследуемую поверхность  $S_1$ , а другой пучок, прошедший через пластинку T, освещает эталонную оптически плоскую поверхность зеркала  $S_2$ . Лучи, отраженные от поверхностей  $S_1$  и  $S_2$  проходят через объективы  $O_1$  и  $O_2$  и образуют в плоскости  $S'$  накладывающиеся одно на другое изображения поверхностей  $S_1$  и  $S_2$ .

При наличии разности хода двух пучков должно возникать чередование максимумов и минимумов освещенности. Наблюдаемая интерференционная картина позволяет оценить глубину рельефа с точностью до  $1/20$  длины волны.

При использовании многолучевой интерферометрии образец помещают на эталонную поверхность тщательно отполированной и посеребрянной оптически плоской пластинки. Если осуществить плотный контакт образца и пластинки и осветить их монохроматическим световым пучком, то образуются очень тонкие интерференционные полосы. Чувствительность и точность метода увеличиваются в десятки раз и достигают  $1/250$  длины волны.

Необходимо учитывать, что применение методов фазового и интерференционного контрастов требует особо тщательной подготовки микрошлифов. Шлифы должны иметь высококачественную гладкую полированную (реже слабо протравленную) поверхность, на которой отсутствуют заметный рельеф и поверхностный наклеп. Для удаления деформированного поверхностного слоя, особенно в случае легко наклепывающихся сплавов, после механического полирования целесообразно применять окончательное слабое электролитическое полирование.

В последних моделях металлографических микроскопов вместо описанных методов фазового и интерференционного контраста используется система дифференциального интерференционного контраста (система Номарского), позволяющая получать цветные объемные изображения структурных составляющих, которые трудно выявить обычными методами, а также исследовать без травления микрошлифы различных материалов.

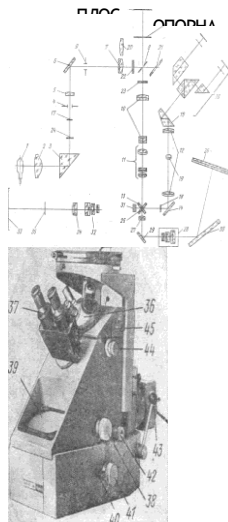
#### *Основные типы и конструктивные особенности металлографических микроскопов*

В зависимости от назначения металлографические микроскопы имеют различные пределы увеличения и позволяют использовать те или иные виды освещения, а также некоторые специальные методы металлографического исследования. Микроскопы, предназначенные для металлографического контроля металлопродукции в заводских условиях, оценки качества приготовления микрошлифов и других рядовых работ (рабочие микроскопы), обычно позволяют наблюдать и фотографировать структуры в светлом и темном полях и в поляризованном свете при увеличении до 1000—1500. Современные исследовательские микроскопы рассчитаны на предельное (достигаемое в видимом свете) увеличение и, как правило, являются универсальными, т. е. предусматривают возможность использования всех перечисленных выше методов исследования. Кроме того, металлографические микроскопы могут быть снабжены приспособлениями для измерения микротвердости, приставками для нагрева образца в вакууме и счетными устройствами для использования методов количественной металлографии.

**Микроскоп ММР-4 (рис. 1.8).** Рабочий металлографический микроскоп ММР-4 предназначен для наблюдения и фотографирования микроструктуры металлов в светлом поле при прямом и косом освещении, темном поле, поляризованном свете и методом фазового контраста.

В комплекте оптики микроскопа ММР-4 объективы-планахроматы смонтированы на револьверной головке 36, обеспечивающей их быструю замену. Наряду с компенсационными окулярами с увеличением 10, установленными в бинокулярной насадке 37, микроскоп снабжен панкратической системой линз, позволяющей изменять увеличение микроскопа в 2—3 раза вращением рукоятки 38 без дополнительной фокусировки. Общее увеличение микроскопа от 50 до 1500.

Оптическая схема микроскопа показана на рис. 1.8, а. Свет от источника 1 (лампы накаливания с йодным циклом типа КИМ9-75) проходит через коллектор 2 и призмой 3 проецируется в плоскость апертурной диафрагмы 4; далее линзой 5, зеркалом 6, линзой 7 и полупрозрачной пластинкой 8 изображение источника 1 и апертурной диафрагмы проецируется в плоскость опорного торца под объектив. Полевая диафрагма 9 помещается в фокальной плоскости второй осветительной линзы 7 и проецируется ею в бесконечность, а после объектива — в плоскость предмета. Лучи, пройдя объектив и отразившись от шлифа, вновь проходят через объектив, пластинку 8 и телеобъективом 10 собираются в промежуточной плоскости, являющейся плоскостью предмета для панкратической системы 11. Затем лучи отражаются от зеркал 13 и 14, проходят через линзы оборачивающей системы 12 и призму 15 и поступают в бинокулярную насадку 16.



**Рис. Оптическая схема (а) и общий вид (б) микроскопа ММР-4**

1 — источник света; 2 — коллектор; 3 — призма; 4 — апертурная диафрагма; 5 — линза; 6 — зеркало; 7 — линза; 8 — полупрозрачная пластинка; 9 — полевая диафрагма; 10 — телеобъектив; // — панкратический окуляр; 12 — линзы оборачивающей системы; 13, 14 — зеркала; 15 — призма; 16 — призмы бинокулярной насадки; 17 — кольцевая диафрагма; 18 — фазовая пластинка; 19 — линза Бертрана; 20 — кольцевая диафрагма темного поля; 21 — кольцевое зеркало; 22 — поляризатор; 23 — анализатор; 24 — набор светофильтров; 25 — зеркало; 26 — экран; 27 — линза; 28 — гомаль; 29, 30 — зеркала; 31 — линза; 32 — гомаль; 33 — фотопластинка; 34 — линза; 35 — фотопленка; 36 — револьверная головка; 37 — бинокулярная насадка; 38 — рукоятка панкратического окуляра; 39 — экран; 40 — рукоятка включения фазовой пластинки; 41 — рукоятка переключения зеркал 13 и 25; 42 — рукоятка микрометрической подачи; 43 — рукоятка перемещения столика; 44 — рукоятка включения поляризатора и анализатора; 45 — рукоятка включения темнопольного освещения

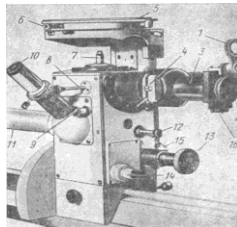
При наблюдении в темном поле вместо линзы 7 и пластинки 8 в ход лучей включаются линза 20 (кольцевая диафрагма) и кольцевое зеркало 21. При работе в поляризованном свете в ход лучей одновременно вводятся поляризатор 22 и анализатор 23.

При использовании метода фазового контраста в осветительную систему включается кольцевая диафрагма 17, а в систему наблюдения — фазовая пластинка 18.

При настройке системы фазового контраста между линзами оборачивающей системы включается линза Бертрана 19.

При фотографировании в ход лучей вместо зеркала 13 вводится зеркало 25; при наблюдении изображения на экране 26 зеркала 13 и 25 выключаются. Изображение проецируется линзой 27 и гомалью 28 с помощью зеркал 29 и 30 на экран 26 или линзой 31 и гомалью 32 на фотопластинку 33 размерами 9X12 см или с помощью линзы 34 на пленку 35 фотоаппарата «Зоркий-4К».

*Горизонтальный микроскоп МИМ-8м.* Исследовательский микроскоп МИМ-8м дает увеличение до 1350 при визуальном наблюдении и до ~1700 при фотографировании, обеспечивая высокую четкость изображения. В микроскопе применяют ахроматические и апохроматические объективы. Общий вид центральной части микроскопа МИМ-8м и его оптическая схема показаны на рис. 1.9 и 1.10.

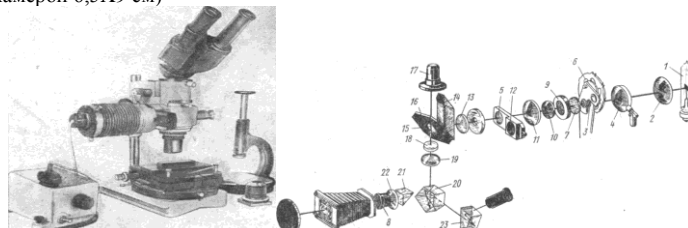


**Рис. Микроскоп МИМ-8м (центральная часть):**

1 — поляризатор; 2 — апертурная диафрагма; 3 — осветительный тубус; 4 — передвижная рамка с полевой и кольцевой диафрагмой; 5 — столик микроскопа; 6 — винты перемещения столика; 7 — объектив; 8 — рукоятка призмы косоугольного освещения; 9 — рукоятка анализатора; 10 — окуляр; 11 — фототубус; 12 — рукоятка перевода призмы визуального наблюдения для фотографирования; 13 — рукоятка механизма грубой подачи; 14 — барабанчик механизма микрометрической подачи; 15 — рукоятка зажимного винта; 16 — винт перемещения апертурной диафрагмы

В настоящее время микроскоп МИМ-8м заменен более совершенной моделью МИМ-9. Этот микроскоп с увеличением при визуальном наблюдении от 20 до ~1700 позволяет использовать все виды освещения, включая фазовый и интерференционный контраст. В нем автоматизированы раздвижка меха фотокамеры и обработка экспозиции при фотографировании, а также грубая подача предметного столика.

*Микроскоп ММУ-3 (рис. 1.11)* Упрощенная модель металломикроскопа с нижним расположением предметного столика. С его помощью можно осуществлять визуальное наблюдение в светлом и темном полях и поляризованном свете при увеличениях 100, 300 и 500. В микроскопе имеется переходная втулка для стандартных микрофотонасадок МФН-12 (с фотокамерой «Зоркий-4»), МФН-8 (с пластиночной фотокамерой 9X12 см) или МФН-7 (с пластиночной фотокамерой 6,5X9 см)



**Рис. Микроскоп ММУ-3**

1 — источник света (лампа К-30, 170 Вт); 2 — коллектор; 3 — теплопоглотитель (для предохранения поляризатора); 4 — откидная линза (для работы в темном поле); 5 — кольцевая диафрагма; 6 — светофильтры; 7 — поляризатор; 8 — гомаль или окуляр; 9 — апертурная диафрагма; 10, 11 — линза осветительного тубуса; 12 — полевая диафрагма; 13 — линза осветительного тубуса; 14 — призма косоугольного освещения; 15 — полупрозрачная пластинка; 16 — кольцевое зеркало; 17 — объектив; 18 — анализатор; 19 — ахроматическая линза; 20 — призма визуального тубуса; 21 — призма фототубуса; 22 — ахроматическая линза; 23 — неподвижная

Наряду с отечественными микроскопами в исследовательских и заводских лабораториях широко применяются микроскопы фирмы «Karl

Zeiss, Jena» (ГДР); особенно горизонтальный исследовательский микроскоп «Нео-фот-21» (рис. 1.12). Этот микроскоп снабжен высококачественными объективами — планахроматами и планапохроматами, дает увеличение от 10 до 2000 и предусматривает различные виды освещения, включая фазовый контраст, а также имеет приспособление для измерения микротвердости. Микроскоп снабжен встроенным устройством автоматического экспонирования для крупноформатной камеры (съемка на пластинки 13X18 см и 9X X12 см). Кроме того, возможна съемка с помощью малоформатной камеры на пленку 24X36 мм с использованием отдельного экспозиционного автоматического устройства. Дополнительные удобства работы на микроскопе: быстрый переход с одного вида освещения на другой, быстрая смена объективов с помощью механизма быстрого подъема предметного столика и возможность изменения кратности увеличения без смены окуляров посредством специального переключателя. С помощью двух сменных опак-иллюминаторов можно осуществлять наблюдение и фотографирование в светлом и темном полях при увеличениях от 10 до 50. Для облегчения металлографического контроля можно использовать дополнительное\* устройство, позволяющее одновременно наблюдать исследуемый шлиф и эталонные снимки (например, соответствующие различному номеру зерна) при одинаковом увеличении и формате изображений.

*Измерение микротвердости* [11, 12]. Дополнительные данные о природе и свойствах различных структурных составляющих сталей и сплавов получают путем измерения микротвердости. Для этой цели используют специальные приборы (обычно ПМТ-3 и ПМТ-5) или приспособления к световым микроскопам. Наиболее распространенный метод измерения микротвердости основан на измерении линейной величины диагонали отпечатка  $d$  от вдавливания алмазной пирамиды с углом между гранями  $136^\circ$  под нагрузкой от 0,02—2Н. В зависимости от твердости исследуемой фазы и величины нагрузки диагональ отпечатка может изменяться от нескольких до нескольких сот микрометров, что позволяет изучать структурные составляющие размером до  $\sim 10$  мкм.

Величину нагрузки при измерении микротвердости выбирают, исходя из размеров изучаемых структурных составляющих. Для правильного испытания необходимо, чтобы рас стояние между отпечатками и от края отпечатка до границы зерна или частицы было не менее  $2d$ , что ограничивает размер отпечатка (величину нагрузки). Однако в том случае, если испытываемая фаза находится в матрице с близкими механическими свойствами, допускается большая величина отпечатка, так как следует учитывать, что с уменьшением нагрузки микротвердость обычно повышается, особенно в интервале нагрузок ниже 0,2Н (это может существенно снизить точность измерений).

На микротвердость металлов и сплавов могут в значительной мере влиять такие факторы, как подготовка поверхности образца, анизотропия свойств материала и микронеоднородность структуры, связанная, например, с ликвацией или неравномерной степенью деформации различных зерен. Для исключения влияния наклепа поверхностного слоя шлифа, особенно в случае сравнительно мягких материалов, следует применять электролитическое полирование образцов.

Анизотропия механических свойств кристаллов может приводить к неодинаковой величине отпечатков на различно ориентированных по отношению к плоскости шлифа кристаллитах, к различию диагоналей одного и того же отпечатка и к неодинаковой степени изогнутости различных сторон отпечатка. При количественном изучении отклонений отпечатков от правильной квадратной формы можно получить важную информацию об анизотропии пластической деформации кристаллов.

Применение метода измерения микротвердости в металловедческих исследованиях связано в основном с проблемами оценки свойств и идентификации отдельных фаз и структурных составляющих, имеющих малый объем. Этот метод широко используют при исследовании поверхностных покрытий и слоев, а также влияния различной механической, термической или химико-термической обработки на поверхностные свойства материалов. При изудиффузии, взаимодействия металлов с различными средами, ликвации и других процессов.

*Электронная микроскопия. Спектральный анализ. Растровая, просвечивающая микроскопия. Методика исследования, приборы. Подготовка образцов для исследования.*

Электронная микроскопия, совокупность методов исследования с помощью электронных микроскопов (МЭ) микроструктуры тел (вплоть до атомно-молекулярного уровня), их локального состава и локализованных на поверхностях или в микрообъемах тел электрических и магнитных полей (микрполей). Наряду с этим прикладным значением Э. м. является самостоятельным научным направлением, предмет и цели которого включают: усовершенствование и разработку новых МЭ и других корпускулярных микроскопов (например, протонного микроскопа) и приставок к ним; разработку методик препарирования образцов, исследуемых в МЭ; изучение механизмов формирования электроннооптических изображений; разработку способов анализа разнообразной информации (не только изображений), получаемой с помощью МЭ.

Объекты исследований в Э. м. — большей частью твёрдые тела. В просвечивающих МЭ (ПЭМ), в которых электроны с энергиями от 1 кэВ до 5 МэВ проходят сквозь объект, изучаются образцы в виде тонких плёнок, фольги (рис. 1), срезов и т. п. толщиной от 1 нм до 10 мкм (от 10 до 105  $\mu$ ). Поверхностную и приповерхностную структуру массивных тел с толщиной существенно больше 1 мкм исследуют с помощью непросвечивающих МЭ: растровых (РЭМ) (рис. 2), зеркальных, ионных проекторов и электронных проекторов.

Можно изучать порошки, микрокристаллы, частицы аэрозолей и т. д., нанесённые на подложку: тонкую плёнку для исследования в ПЭМ или массивную подложку для исследования в РЭМ. Поверхностная геометрическая структура массивных тел изучается и методом реплик: с поверхности такого тела снимается отпечаток в виде тонкой плёнки углерода, коллодия, формвара и др., повторяющий рельеф поверхности и рассматриваемый в ПЭМ. Обычно предварительно на реплику в вакууме напыляется под скользящим (малым к поверхности) углом слой сильно рассеивающего электроны тяжёлого металла (например, Pt), оттеняющего выступы и впадины геометрического рельефа. При исследовании методом так называемого декорирования не только геометрической структуры поверхностей, но и микрополей, обусловленных наличием дислокаций (рис. 3), скоплений точечных дефектов (см. Дефекты в кристаллах), ступеней роста кристаллических граней, доменной структуры (см. Домены) и т. д., на поверхность образца вначале напыляется очень тонкий слой декорирующих частиц (атомы Au, Pt и др., молекулы полупроводников или диэлектриков), осаждающихся преимущественно на участках сосредоточения микрополей, а затем снимается реплика с включениями декорирующих частиц.

Специальные газовые микрокамеры — приставки к ПЭМ или РЭМ — позволяют изучать жидкие и газообразные объекты, неустойчивые к воздействию высокого вакуума, в том числе влажные биологические препараты. Радиационное воздействие облучающего электронного пучка довольно велико, поэтому при исследовании биологических, полупроводниковых, полимерных и т. п. объектов необходимо тщательно выбирать режим работы МЭ, обеспечивающий минимальную дозу облучения.

Наряду с исследованием статическим, не меняющихся во времени объектов Э. м. даёт возможность изучать различные процессы в динамике их развития: рост плёнок, деформацию кристаллов под действием переменной нагрузки, изменение структуры под влиянием электронного или ионного облучения и т. д. (исследования "in situ"). Вследствие малой инерционности электрона можно исследовать периодические во времени процессы, например перемагничивание тонких магнитных плёнок, переполаризацию сегнетоэлектриков, распространение ультразвуковых волн и т. д., методами стробоскопической Э. м.: электронный пучок "освещает" образец импульсами, синхронными с подачей импульсного напряжения на образец, что обеспечивает фиксацию на экране прибора определенной фазы процесса точно так же, как это происходит в светооптических стробоскопических приборах (рис. 4). Предельное временное разрешение при этом может, в принципе, составлять около 10-15 сек для ПЭМ (практически реализовано разрешение  $\sim 10$ -10 сек для ПЭМ и РЭМ).

Для интерпретации изображений аморфных и других тел (размеры частиц которых меньше разрешаемого в МЭ расстояния), рассеивающих электроны диффузно, используются простейшие методы амплитудной Э. м. Например, в ПЭМ контраст изображения, т. е. перепад яркостей изображения соседних участков объекта, в первом приближении пропорционален перепаду толщин этих участков. Для расчёта контраста изображений кристаллических тел (рис. 5), имеющих регулярные структуры (при рассеянии частиц на таких телах происходит дифракция частиц), и решения обратной задачи — расчёта структуры объекта по наблюдаемому изображению — привлекаются методы фазовой Э. м.: решается задача о дифракции электронной волны (см. Волны де Бройля) в кристаллической решетке. При этом дополнительно учитываются неупругие взаимодействия электронов с объектом: рассеяние на плазмах, фононах и т. п. В ПЭМ и растровых ПЭМ (ПРЭМ) высокого разрешения получают изображения отдельных молекул или атомов тяжелых элементов; пользуясь методами фазовой Э. м., восстанавливают по изображениям трехмерную структуру кристаллов и биологических макромолекул. Для решения подобных задач применяют, в частности, методы голографии, а расчеты производят на ЭВМ.

Разновидность фазовой Э. м. — интерференционная Э. м., аналогичная оптической интерферометрии (см. Интерферометр): электронный пучок расщепляется с помощью электронных призм, и в одном из плеч интерферометра устанавливается образец, изменяющий фазу проходящей сквозь него электронной волн. Этим методом можно измерить, например, внутренний электрический потенциал образца.

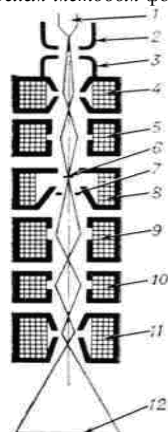
С помощью лоренцовой Э. м., в которой изучают явления, обусловленные Лоренца силой, исследуют внутренние магнитные и электрические

поля или внешние поля рассеяния, например поля магнитных доменов в тонких пленках (рис. 6), сегнетоэлектрических доменов (см. Домены), поля головок для магнитной записи информации и т. п.

Состав объектов исследуется методами микродифракции, т. е. электронографии локальных участков объекта, рентгеновского и катодолуминисцентного спектрального микроанализа (см Катодолуминесценция, Спектральный анализ рентгеновский): регистрируются характеристические рентгеновские спектры или катодолуминисцентное излучение, возникающее при бомбардировке образца сфокусированным пучком электронов (диаметр электронного "зонда" менее 1 мкм). Кроме того, изучаются энергетические спектры вторичных электронов, выбитых первичным электронным пучком с поверхности или из объема образца.

Интенсивно разрабатываются методы количественной Э. м. — точное измерение различных параметров образца или исследуемого процесса, например измерение локальных электрических потенциалов (рис. 7), магнитных полей (рис. 8), микрогеометрии поверхностного рельефа и т. д. МЭ используются и в

технологических целях (например, для изготовления микросхем методом фотолитографии).



**ОБЫЧНЫЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП (ОПЭМ).** Электроны ускоряются, а затем фокусируются магнитными линзами. Увеличенное изображение, создаваемое электронами, которые проходят через диафрагму объектива, преобразуется люминесцентным экраном в видимое или регистрируется на фотопластинке. В ОПЭМ можно получить увеличение до 1 млн. 1 — источник электронов; 2 — ускоряющая система; 3 — диафрагма; 4 — конденсорная линза; 5 — образец; 6 — объективная линза; 7 — диафрагма; 8 — проекционная линза; 9 — экран или пленка; 10 — увеличенное изображение.

Электронный микроскоп, прибор для наблюдения и фотографирования многократно (до 10<sup>6</sup> раз) увеличенного изображения объектов, в котором вместо световых лучей используются пучки электронов, ускоренных до больших энергий (30—100 кэВ и более) в условиях глубокого вакуума. Физические основы корпускулярно-лучевых оптических приборов были заложены в 1834 (почти за сто лет до появления Э. м.) У. Р. Гамильтоном, установившим существование аналогии между прохождением световых лучей в оптически неоднородных средах и траекториями частиц в силовых полях. Целесообразность создания Э. м. стала очевидной после выдвинутой в 1924 гипотезы о волнах де Бройля, а технические предпосылки были созданы немецким физиком Х. Бушем, который исследовал фокусирующие свойства осесимметричных полей и разработал магнитную электронную линзу (1926). В 1928 немецкие учёные М. Кноль и Э. Руска приступили к созданию первого магнитного просвечивающего Э. м. (ПЭМ) и спустя три года получили изображение объекта, сформированное пучками электронов. В последующие годы (М. фон Арденне, Германия, 1938; В. К. Зворыкин, США, 1942) были построены первые растровые Э. м. (РЭМ), работающие по принципу сканирования (развёртывания), т. е. последовательного от точки к точке перемещения

тонкого электронного пучка (зонда) по объекту. К середине 1960-х гг. РЭМ достигли высокого технического совершенства, и с этого времени началось их широкое применение в научных исследованиях. ПЭМ обладают самой высокой разрешающей способностью (РС), превосходя по этому параметру световые микроскопы в несколько тыс. раз. Т. н. предел разрешения, характеризующий способность прибора отобразить отдельно мелкие максимально близко расположенные детали объекта, у ПЭМ составляет 2...3 нм. При благоприятных условиях можно сфотографировать отдельные тяжёлые атомы. При фотографировании периодических структур, таких как атомные плоскости решёток кристаллов, удаётся реализовать разрешение менее 1 нм. Столь высокие разрешения достигаются благодаря чрезвычайно малой длине волны де Бройля электронов (см. Дифракция частиц). Оптимальным диафрагмированием [см. Диафрагма в электронной (и ионной) оптике] удаётся снизить сферическую aberrацию объектива (влияющую на РС Э. м.) при достаточно малой дифракционной ошибке. Эффективных методов коррекции aberrаций в Э. м. (см. Электронная и ионная оптика) не найдено. Поэтому в ПЭМ магнитные электронные линзы (ЭЛ), обладающие меньшими aberrациями, полностью вытеснили электростатические ЭЛ. Выпускаются ПЭМ различного назначения. Их можно разделить на 3 группы: Э. м. высокого разрешения, упрощённые ПЭМ и Э. м. с повышенным ускоряющим напряжением.

ПЭМ с высокой разрешающей способностью (2—3 Å) — как правило, универсальные приборы многоцелевого назначения. С помощью дополнительных устройств и приставок в них можно наклонять объект в разных плоскостях на большие углы к оптической оси, нагревать, охлаждать, деформировать его, осуществлять рентгеновский структурный анализ, исследование методами электронографии и пр. Ускоряющее электроны напряжение достигает 100—125 кВ, регулируется ступенчато и отличается высокой стабильностью: за 1—3 мин оно изменяется не более чем на 1—2 миллионные доли от исходного значения. Изображение типичного ПЭМ описываемого типа приведено на рис. 1. В его оптической системе (колонне) с помощью специальной вакуумной системы создаётся глубокий вакуум (давление до 10<sup>-6</sup> мм рт. ст.). Схема оптической системы ПЭМ изображена на рис. 2. Пучок электронов, источником которых служит накалённый катод, (формируется в электронной пушке и затем дважды фокусируется первым и вторым конденсорами, создающими на объекте электронное "пятно" малых размеров (при регулировке диаметр пятна может меняться от 1 до 20 мкм). После прохождения сквозь объект часть электронов рассеивается и задерживается апертурной диафрагмой. Нерассеянные электроны проходят через отверстие диафрагмы и фокусируются объективом в предметной плоскости промежуточной линзы. Здесь формируется первое увеличенное изображение. Последующие линзы создают второе, третье и т. д. изображения. Последняя проекционная линза формирует изображение на флуоресцирующем экране, который светится под воздействием электронов. Увеличение Э. м. равно произведению увеличений всех линз. Степень и характер рассеяния электронов неодинаковы в различных точках объекта, т. к. толщина, плотность и химический состав объекта меняются от точки к точке. Соответственно изменяется число электронов, задержанных апертурной диафрагмой после прохождения различных точек объекта, а следовательно, и плотность тока на изображении, которая преобразуется в световой контраст на экране. Под экраном располагается магазин с фотопластинками. При фотографировании экран убирается, и электроны воздействуют на фотозмульсионный слой. Изображение фокусируется плавным изменением тока, возбуждающего магнитное поле объектива. Токи др. линз регулируют для изменения увеличения Э. м.

Упрощённые ПЭМ предназначены для исследований, в которых не требуется высокая РС. Они более просты по конструкции (включающей 1 конденсор и 2—3 линзы для увеличения изображения объекта), их отличают меньшее (обычно 60—80 кВ) ускоряющее напряжение и более низкая его стабильность. РС этих приборов — от 6 до 15 нм. Другие применения — предварительный просмотр объектов, рутинные исследования, учебные цели. Толщина объекта, которую можно "просветить" электронным пучком, зависит от ускоряющего напряжения. В 100-кВ Э. м. изучают объекты толщиной от 10 до нескольких тыс. Å.

ПЭМ с повышенным ускоряющим напряжением (до 200 кВ) предназначены для исследования более толстых объектов (в 2—3 раза толще), чем обычные ПЭМ. Их разрешающая способность достигает 3—5 Å. Эти приборы отличаются конструкцией электронной пушки: в ней для обеспечения электрической прочности и стабильности имеются два анода, на один из которых подаётся промежуточный потенциал, составляющий половину ускоряющего напряжения. Магнитодвижущая сила линз больше, чем в 100-кВ ПЭМ, а сами линзы имеют увеличенные габариты и вес.

Сверхвысоковольтные Э. м. (СВЭМ) — крупногабаритные приборы (рис. 3) высотой от 5 до 15 м, с ускоряющим напряжением 0,5—0,65; 1—1,5 и 3 Мв. Для них строят специальные помещения. СВЭМ предназначены для исследования объектов толщиной до 1—10 мкм (104—106 Å). Электроны ускоряются в электростатическом ускорителе (т. н. ускорителе прямого действия), расположенном в баке, заполненном электроизоляционным газом под давлением. В том же или в дополнительном баке находится высоковольтный стабилизированный источник питания. Ведутся работы по созданию СВЭМ с линейным ускорителем, в котором электроны ускоряются до энергий 5—10 Мэв. При изучении тонких объектов РС СВЭМ ниже, чем у ПЭМ. В случае толстых объектов РС СВЭМ в 10—20 раз превосходит РС 100-кв ПЭМ.

Растровые Э. м. (РЭМ) с накаливаемым катодом предназначены для исследования массивных объектов с разрешением от 70 до 200 Å. Ускоряющее напряжение в РЭМ можно регулировать в пределах от 1 до 30—50 кВ.

Устройство растрового Э. м. показано на рис. 4. При помощи 2 или 3 ЭЛ на поверхность образца фокусируется узкий электронный зонд. Магнитные отклоняющие катушки развёртывают зонд по заданной площади на объекте. При взаимодействии электронов зонда с объектом возникает несколько видов излучений (рис. 5) — вторичные и отражённые электроны; электроны, прошедшие сквозь объект (если он тонкий); рентгеновское тормозное излучение и характеристическое излучение; световое излучение и т. д.

Любое из этих излучений может регистрироваться соответствующим коллектором, содержащим датчик, преобразующий излучение в электрические сигналы, которые после усиления подаются на электроннолучевую трубку (ЭЛТ) и модулируют её пучок. Развётка пучка ЭЛТ производится синхронно с развёткой электронного зонда в РЭМ, и на экране ЭЛТ наблюдается увеличенное изображение объекта. Увеличение равно отношению высоты кадра на экране ЭЛТ к ширине сканируемой поверхности объекта. Фотографируют изображение непосредственно с экрана ЭЛТ. Основным достоинством РЭМ является высокая информативность прибора, обусловленная возможностью наблюдать изображение, используя сигналы различных датчиков. С помощью РЭМ можно исследовать микрорельеф, распределение химического состава по объекту, р—п-переходы, производить рентгеноструктурный анализ и многое другое. Образец обычно исследуется без предварительной подготовки. РЭМ находит применение и в технологических процессах (контроль дефектов микросхем и пр.). Высокая для РЭМ РС реализуется при формировании изображения с использованием вторичных электронов. Она определяется диаметром зоны, из которой эти электроны эмиттируются. Размер зоны в свою очередь зависит от диаметра зонда, свойств объекта, скорости электронов первичного пучка и т. д. При большой глубине проникновения первичных электронов вторичные процессы, развивающиеся во всех направлениях, увеличивают диаметр зоны и РС падает. Детектор вторичных электронов состоит из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и электронно-фотонного преобразователя, основным элементом которого является сцинтиллятор с двумя электродами — вытягивающим в виде сетки, находящейся под положительным потенциалом (до нескольких сотен в), и ускоряющим; последний сообщает захваченным вторичным электронам энергию, необходимую для возбуждения сцинтиллятора. К ускоряющему электроду приложено напряжение около 10 кВ; обычно он представляет собой алюминиевое покрытие на поверхности сцинтиллятора. Число вспышек сцинтиллятора пропорционально числу вторичных электронов, выбитых в данной точке объекта. После усиления в ФЭУ и в видеоусилителе сигнал модулирует пучок ЭЛТ. Величина сигнала зависит от топографии образца, наличия локальных электрических и магнитных микрополей, величины коэффициента вторичной электронной эмиссии, который в свою очередь зависит от химического состава образца в данной точке. Отражённые электроны регистрируются полупроводниковым (кремниевым) детектором. Контраст изображения обусловлен зависимостью коэффициента отражения от угла падения первичного пучка и атомного номера вещества. Разрешение изображения, получаемое "в отражённых электронах", ниже, чем получаемого с помощью вторичных электронов (иногда на порядок величины). Из-за прямолинейности полёта электронов к коллектору информация об отдельных участках, от которых нет прямого пути к коллектору, теряется (возникают тени). Характеристическое рентгеновское излучение выделяется или рентгеновским кристаллическим спектрометром или энергодисперсным датчиком — полупроводниковым детектором (обычно из чистого кремния, легированного литием). В первом случае рентгеновские кванты после отражения кристаллом спектрометра регистрируются газовым пропорциональным счётчиком, а во втором — сигнал, снимаемый с полупроводникового детектора, усиливается малошумящим усилителем (который для снижения шума охлаждается жидким азотом) и последующей системой усиления. Сигнал от кристаллического спектрометра модулирует пучок ЭЛТ, и на экране возникает картина распределения того или иного химического элемента по поверхности объекта. На РЭМ производят также локальный рентгеновский количественный анализ. Энергодисперсный детектор регистрирует все элементы от Na до U при высокой чувствительности. Кристаллический спектрометр с помощью набора кристаллов с различными межплоскостными расстояниями (см. Брэгга — Вульфа условие) перекрывает диапазон от Be до U. Существенный недостаток РЭМ — большая длительность процесса "снятия" информации при исследовании объектов. Сравнительно высокую РС можно получить, используя электронный зонд достаточного малого диаметра. Но при этом уменьшается сила тока зонда, вследствие чего резко возрастает влияние дрейфового эффекта, снижающего отношение полезного сигнала к шуму. Чтобы отношение "сигнал/шум" не падало ниже заданного уровня, необходимо замедлить скорость сканирования для накопления в каждой точке объекта достаточно большого числа первичных электронов (и соответствующего количества вторичных). В результате высокая РС реализуется лишь при малых скоростях развётки. Иногда один кадр формируется в течение 10—15 мин.

РЭМ с автоэмиссионной пушкой обладают высокой для РЭМ РС (до 30 Å). В автоэмиссионной пушке (как и в электронном проекторе) используется катод в форме острой, у вершины которого возникает сильное электрическое поле, вырывающее электроны из катода (см. Туннельная эмиссия). Электронная яркость пушки с автоэмиссионным катодом в 103—104 раз выше, чем пушки с накалённым катодом. Соответственно увеличивается ток электронного зонда. Поэтому в РЭМ с автоэмиссионной пушкой осуществляют быстрые развётки, а диаметр зонда уменьшают для повышения РС. Однако автоэмиссионный катод работает устойчиво лишь при сверхвысоком вакууме (10<sup>-9</sup>—10<sup>-11</sup> мм рт. ст.), и это усложняет конструкцию таких РЭМ и работу на них.

Просвечивающие растровые Э. м. (ПРЭМ) обладают столь же высокой РС, как и ПЭМ. В этих приборах применяются автоэмиссионные пушки, обеспечивающие достаточно большой ток в зонде диаметром до 2—3 Å. На рис. 6 приведено схематическое изображение ПРЭМ. Две магнитные линзы уменьшают диаметр зонда. Ниже объекта расположены детекторы — центральный и кольцевой. На первый попадают нерассеянные электроны, и после преобразования и усиления соответствующих сигналов на экране ЭЛТ получается т. н. светлопольное изображение. На кольцевом детекторе собираются рассеянные электроны, создающие т. н. темнопольное изображение. В ПРЭМ можно исследовать более толстые объекты, чем в ПЭМ, т. к. возрастание числа неупруго рассеянных электронов с толщиной не влияет на разрешение (после объекта оптика в ПРЭМ отсутствует). С помощью анализатора энергии электроны, прошедшие сквозь объект, разделяются на упруго и неупруго рассеянные пучки. Каждый пучок попадает на свой детектор, и на ЭЛТ наблюдается соответствующее изображение, содержащее дополнительную информацию о рассеивающих свойствах объекта. Высокое разрешение в ПРЭМ достигается при медленных развётках, т. к. в зонде диаметром всего 2—3 Å ток получается слишком малым. Э. м. смешанного типа. Сочетание в одном приборе принципов формирования изображения с неподвижным пучком (как в ПЭМ) и сканирования тонкого зонда по объекту позволило реализовать в таком Э. м. преимущества ПЭМ, РЭМ и ПРЭМ. В настоящее время во всех ПЭМ предусмотрена возможность наблюдения объектов в растровом режиме (с помощью конденсорных линз и объектива, создающих уменьшенное изображение источника электронов, которое сканируется по объекту отклоняющими системами). Кроме изображения, сформированного неподвижным пучком, получают растровые изображения на экранах ЭЛТ с использованием прошедших и вторичных электронов, характеристические рентгеновские спектры и т. д. Оптическая система такого ПЭМ, расположенная после объекта, даёт возможность работать в режимах, неосуществимых в других приборах. Например, можно одновременно наблюдать электронограмму на экране ЭЛТ и изображение того же объекта на экране прибора.

Эмиссионные Э. м. создают изображение объекта в электронах, которые эмиттирует сам объект при нагревании, бомбардировке первичным пучком электронов, освещении и при наложении сильного электрического поля, вырывающего электроны из объекта. Эти приборы обычно имеют узкое целевое назначение.

Зеркальные Э. м. служат главным образом для визуализации электростатического "потенциального рельефа" и магнитных микрополей на поверхности объекта. Основным оптическим элементом прибора является электронное зеркало, причём одним из электродов служит сам объект, который находится под небольшим отрицательным потенциалом относительно катода пушки. Электронный пучок направляется в зеркало и отражается полем в непосредственной близости от поверхности объекта. Зеркало формирует на экране изображение "в отражённых пучках". Микрополя возле поверхности объекта перераспределяют электроны отражённых пучков, создавая контраст на изображении, визуализирующий эти микрополя.



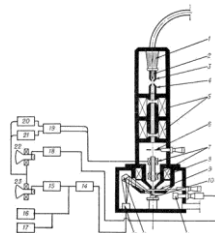


Рис. 4. Схема растрового электронного микроскопа (РЭМ): 1 - изолятор электронной пушки; 2-V-образный термокатод; 3 - фокусирующий электрод; 4- анод; 5 - конденсорные линзы; 6 - диафрагма; 7- двухъярусная отклоняющая система; 8- объектив; 9- апертурная диафрагма объектива; 10- объект; 11 -детектор вторичных электронов; 12- кристаллический спектрометр; 13 - пропорциональный счётчик; 14 - предварительный усилитель; 15 - блок усиления; 16, 17- аппаратура для регистрации рентгеновского излучения; 18 - блок усиления; 19 - блок регулировки увеличения; 20, 21 - блоки гори зонтальной и вертикальной развёрток; 22, 23- элек тронно-лучевые трубки.

Перспективы развития Э. м. Повышение РС в изображениях неперiodических объектов до 1 Å и более позволит регистрировать не только тяжёлые, но и лёгкие атомы и визуализировать органический мир на атомарном уровне. Для создания Э. м. с подобным разрешением повышают ускоряющее напряжение, разрабатывают ЭЛ с малыми aberrациями, в частности криогенные линзы, в которых используется эффект сверхпроводимости при низких температурах, работают над созданием методов исправления aberrаций ЭЛ и т. д. Исследование механизма формирования частотно-контрастных характеристик изображения в Э. м. привело к разработке методов реконструкции изображения, которые осуществляются аналогично тому, как это делается в световой оптике, где подобные методы основаны на Фурье преобразованиях, а соответствующие расчёты производятся на ЭВМ.

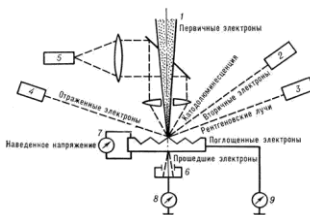


Рис. 5. Схема регистрации информации об объекте, получаемой в РЭМ: 1-первичный пучок электронов; 2-детектор вторичных электронов; 3-детектор рентгеновского излучения; 4-детектор отражённых электронов; 5-детектор оже-электронов; 6-детектор светового излучения; 7 - детектор прошедших электронов; 8 - схема для регистрации тока прошедших через объект электронов; 9-схема для регистрации тока поглощённых в объекте электронов; 10-схема для регистрации наведённого на объекте электрического потенциала.

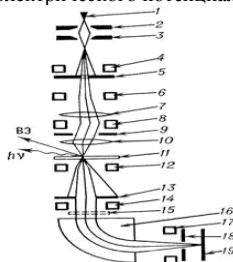


Рис. 7. Принципиальная схема просвечивающего растрового электронного микроскопа (ПРЭМ): 1- автоэмиссионный катод; 2- промежуточный анод; 3- анод; 4- диафрагма "осветителя"; 5-магнитная линза; 6- двухъярусная отклоняющая система для развёртки электронного зонда; 7-магнитный объектив; 8 - апертурная диафрагма объектива; 9 -объект; 10 - отклоняющая система; 11 - кольцевой детектор рассеянных электронов; 12 - детектор нерассеянных электронов (удаляется при работе магнитного спектрометра); 13 - магнитный спектрометр; 14-отклоняющая система для отбора электронов с различными потерями энергии; 15 - щель спектрометра; 16-детектор спектрометра; ВЭ-вторичные электроны; hν-рентгеновское излучение.

д-детектор нерассеянных электронов (удаляется при работе магнитного спектрометра); 13 - магнитный спектрометр; 14-отклоняющая система для отбора электронов с различными потерями энергии; 15 - щель спектрометра; 16-детектор спектрометра; ВЭ-вторичные электроны; hν-рентгеновское излучение.

#### Рентгеноструктурный анализ

Их волновая природа установлена в 1912 г. немецкими физиками М.Лауэ, В.Фридрихом и П.Книппингом, открывшими явление дифракции рентгеновских лучей на атомной решётке кристаллов. Направив узкий пучок рентгеновских лучей на неподвижный кристалл, они зарегистрировали на помещённой за кристаллом фотопластинке дифракционную картину, которая состояла из большого числа закономерно расположенных пятен. Каждое пятно - след дифракционного луча, рассеянного кристаллом. Рентгенограмма, полученная таким методом носит название лауэграммы. Это открытие явилось основой рентгеноструктурного анализа.

Длины волн рентгеновских лучей, используемых в практических целях, лежат в пределах от нескольких ангстрем до долей ангстрема (Å), что соответствует энергии электронов, вызывающих рентгеновское излучение от  $10^3$  до  $10^5$  эв.

#### Рентгеновские спектры.

Различают два типа излучения: тормозное и характеристическое. Тормозное излучение возникает при торможении электронов антикатодом рентгеновской трубки. Оно разлагается в сплошной спектр, имеющий резкую границу со стороны малых длин волн. Положение этой границы определяется энергией падающих на вещество электронов и не зависит от природы вещества. Интенсивность тормозного спектра быстро растёт с уменьшением массы бомбардирующей частиц и достигает значительной величины при возбуждении электронами.

Характеристические рентгеновские лучи образуются при выбивании электрона одного из внутренних слоёв атома с последующим переходом на освободившуюся орбиту электрона с какого-либо внешнего слоя. Они обладают линейчатым спектром, аналогичным оптическим спектрам газов. Однако между теми и другими спектрами имеется принципиальная разница: структура характеристического спектра рентгеновских лучей (число, относительное расположение и относительная яркость линий), в отличие от оптического спектра газов, не зависит от вещества (элемента), дающего этот спектр.

Спектральные линии характеристического спектра рентгеновских лучей образуют закономерные последовательности или серии. Эти серии обозначаются буквами K, L, M, N..., причем длины волн этих серий возрастают от K к L, от L к M и т. д. Наличие этих серий теснейшим образом связано со строением электронных оболочек атомов.

Характеристические рентгеновские спектры испускают атомы мишени, у которых при столкновении с заряженной частицей высокой энергии или фотоном первичного рентгеновского излучения с одной из внутренних оболочек (K-, L-, M-, ... оболочек) вылетает электрон. Состояние атома с вакансией во внутренней оболочке (его начальное состояние) неустойчиво. Электрон одной из внешних оболочек может заполнить эту вакансию, и атом при этом переходит в конечное состояние с меньшей энергией (состояние с вакансией во внешней оболочке).

Избыток энергии атом может испустить в виде фотона характеристического излучения. Поскольку энергия E1 начального и E2 конечного состояний атома квантованы, возникает линия рентгеновского спектра с частотой  $\nu=(E1 - E2)/h$ , где h постоянная Планка.

Все возможные излучательные квантовые переходы атома из начального K-состояния образуют наиболее жёсткую (коротковолновую) K-серию. Аналогично образуются L-, M-, N-серии (рис. 1).

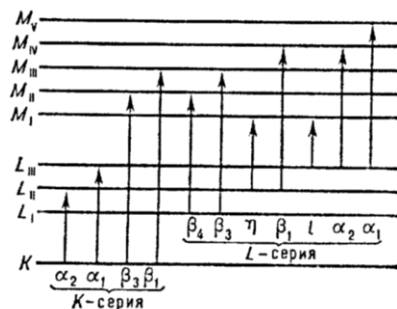


Рис. 1. Схема K-, L-, M-уровней атома и основные линии K-, L-серий

Зависимость от вещества проявляется только в том, что с увеличением порядкового номера элемента в системе Менделеева весь его характеристический рентгеновский спектр смещается в сторону более коротких волн. Г. Мозли в 1913 г. показал, что квадратный корень из частоты (или обратной длины волны) данной спектральной линии связан линейной зависимостью с атомным номером элемента  $Z$ . Закон Мозли сыграл весьма важную роль в физическом обосновании периодической системы Менделеева.

Другой весьма важной особенностью характеристических спектров рентгеновских лучей является то обстоятельство, что каждый элемент даёт свой спектр независимо от того, возбуждается ли этот элемент к испусканию рентгеновских лучей в свободном состоянии или в химическом соединении. Эта особенность характеристического спектра рентгеновских лучей используется для идентификации различных элементов в сложных соединениях и является основой рентгеноспектрального анализа.

#### Рентгеноспектральный анализ

Рентгеноспектральный анализ это раздел аналитической химии, использующий рентгеновские спектры элементов для химического анализа веществ. Рентгеноспектральный анализ по положению и интенсивности линий характеристического спектра позволяет установить качественный и количественный состав вещества и служит для экспрессного неразрушающего контроля состава вещества.

В рентгеновской спектроскопии для получения спектра используется явление дифракции лучей на кристаллах или, в области 15-150 Å, на дифракционных штриховых решётках, работающих при малых (1-12°) углах скольжения. Основой рентгеновской спектроскопии высокого разрешения является закон Вульфа-Брэгга, который связывает длину волны рентгеновских лучей  $\lambda$ , отраженных от кристалла в направлении  $\varphi$ , с межплоскостным расстоянием кристалла  $d$ .

$$n\lambda = 2d \sin\varphi \quad (1)$$

Угол  $\varphi$  называется углом скольжения. Он направлением падающих на кристалл или отражённых от него лучей с отражающей поверхностью кристалла. Число  $n$  характеризует так называемый порядок отражения, в котором при заданных  $\lambda$  и  $d$  может наблюдаться дифракционный максимум.

Частота колебания рентгеновских лучей ( $\nu = c/\lambda$ ), испущенных каким-либо элементом, линейно связана с его атомным номером:

$$\tilde{\nu} = R(Z-s)^2 \quad (2)$$

где  $\nu$  - частота излучения,  $Z$  - атомный номер элемента,  $R$  - постоянная Ридберга, равная 109737,303 см<sup>-1</sup>,  $s$  - средняя константа экранирования, в небольших пределах, зависящая от  $Z$ ,  $A$  - постоянная для данной линии величина.

Рентгеноспектральный анализ основан на использовании зависимости частоты излучения линий характеристического спектра элемента от их атомного номера и связи между интенсивностью этих линий и числом атомов, принимающих участие в излучении.

Рентгеновское возбуждение атомов вещества может возникать в результате бомбардировки образца электронами больших энергий или при его облучении рентгеновскими лучами. Первый процесс называется прямым возбуждением, последний - вторичным или флуоресцентным. В обоих случаях энергия электрона или кванта первичной рентгеновской радиации, бомбардирующей излучающий атом, должна быть больше энергии, необходимой для вырывания электрона из определённой внутренней оболочки атома. Электронная бомбардировка исследуемого вещества приводит к появлению не только характеристического спектра элемента, но и, как правило, достаточно интенсивного непрерывного излучения. Флуоресцентное излучение содержит только линейчатый спектр.

В ходе первичного возбуждения спектра происходит интенсивное разогревание исследуемого вещества, отсутствующее при вторичном возбуждении. Первичный метод возбуждения лучей предполагает помещение исследуемого вещества внутрь откачанной до высокого вакуума рентгеновской трубки, в то время как для получения спектров флуоресценции исследуемые образцы могут располагаться на пути пучка первичных рентгеновских лучей вне вакуума и легко сменять друг друга. Поэтому приборы, использующие спектры, флуоресценции (несмотря на то, что интенсивность вторичного излучения в тысячи раз меньше интенсивности лучей, полученных первичным методом), в последнее время почти полностью вытеснили из практики установки, в которых осуществляется возбуждение рентгеновских лучей с помощью потока быстрых электронов.

#### Аппаратура для рентгеноспектрального анализа.

Рентгеновский флуоресцентный спектрометр (рис 2) состоит из трёх основных узлов: рентгеновской трубки, излучение которой возбуждает спектр флуоресценции исследуемого образца, кристалла - анализатора для разложения лучей в спектр и детектора для измерения интенсивности спектральных линий.

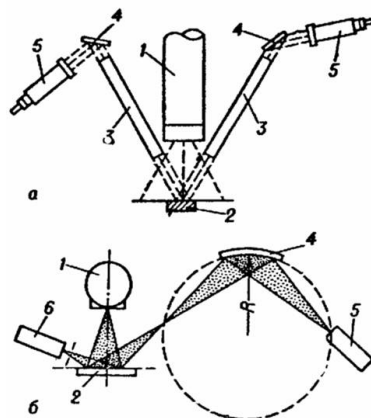


Рис. 2. Схема рентгеновского многоканального флуоресцентного спектрометра с плоским (а) изогнутым (б) кристаллами: 1 - рентгеновская трубка; 2 - анализируемый образец; 3 - диафрагма Соллера; 4 - плоский и изогнутый (радиус - 2R) кристалл - анализаторы; 5 - детектор излучения; 6 - так называемый монитор, дополнительное регистрирующее устройство, позволяющее осуществлять измерение относительной интенсивности спектральных линий при отсутствии стабилизации интенсивности источника рентгеновского излучения; R - радиус так называемой окружности изображения.

В наиболее часто используемой на практике конструкции спектрометра источник излучения и детектор располагаются на одной окружности, называемой окружностью изображения, а кристалл - в центре. Кристалл может вращаться вокруг оси, проходящей через центр этой окружности.



При изменении угла скольжения на величину  $q$  детектор поворачивается на угол  $2q$

Наряду со спектрометрами с плоским кристаллом широкое распространение получили фокусирующие рентгеновские спектрометры, работающие «на отражение» (методы Капицы – Иоганна и Иогансона) и на

«прохождение» (методы Коуша и Дю-Монда). Они могут быть одно- и многоканальными. Многоканальные, так называемые рентгеновские квантометры, аутометры и другие, позволяют одновременно определять большое число элементов и автоматизировать процесс анализа. Обычно они снабжаются специальными рентгеновскими трубками и устройствами, обеспечивающими высокую степень стабилизации интенсивности рентгеновских лучей. Область длин волн, в которой может использоваться спектрометр, определяется межплоскостным расстоянием кристалла – анализатора ( $d$ ). В соответствии с уравнением (1) кристалл не может «отражать» лучи, длина волн, которых превосходит  $2d$ .

Число кристаллов, используемых в рентгеноспектральном анализе, довольно велико. Наиболее часто применяют кварц, слюду, гипс и LiF.

В качестве детекторов рентгеновского излучения, в зависимости от области спектра, с успехом используют счётчики Гейгера, пропорциональные, кристаллические и сцинтилляционные счётчики квантов.

Применение рентгеноспектрального анализа.

Рентгеноспектральный анализ может быть использован для количественного определения элементов от Mg12 до U92 в материалах сложного химического состава – в металлах и сплавах, минералах, стекле, керамике, цементах, пластмассах, абразивах, пыли и различных продуктах химических технологий. Наиболее широко рентгеноспектральный анализ применяют в металлургии и геологии для определения макро- (1-100%) и микрокомпонентов (10-1 – 10-3 %).

Иногда для повышения чувствительности рентгеноспектрального анализа его комбинируют с химическими и радиометрическими методами. Предельная чувствительность рентгеноспектрального анализа зависит от атомного номера определяемого элемента и среднего атомного номера определяемого образца. Оптимальные условия реализуются при определении элементов среднего атомного номера в образце, содержащем лёгкие элементы. Точность рентгеноспектрального анализа обычно 2-5 относительных процента, вес образца – несколько граммов. Длительность анализа от нескольких минут до 1 – 2 часов. Наибольшие трудности возникают при анализе элементов с малым  $Z$  и работе в мягкой области спектра.

На результаты анализа влияют общий состав пробы (поглощение), эффекты селективного возбуждения и поглощения излучения элементами – спутниками, а также фазовый состав и зернистость образцов.

Рентгеноспектральный анализ хорошо зарекомендовал себя при определении Pb и Vg в нефти и бензинах, серы в газолитине, примесей в смазках и продуктах износа в машинах, при анализе катализаторов, при осуществлении экспрессных силикатных анализов и других.

Для возбуждения мягкого излучения и его использования в анализе успешно применяется бомбардировка образцов  $\alpha$ -частицами (например от полониевого источника).

Важной областью применения рентгеноспектрального анализа является определение толщины защитных покрытий без нарушения поверхности изделий.

В тех случаях, когда не требуется высокого разрешения в разделении характеристического излучения от образца и анализируемые элементы отличаются по атомному номеру более чем на два, с успехом может быть применён бескристалльный метод рентгеноспектрального анализа. В нём используется прямая пропорциональность между энергией кванта и амплитудой импульса, который создаётся им в пропорциональном или сцинтилляционном счётчиках. Это позволяет выделить и исследовать импульсы, соответствующие спектральной линии элемента с помощью амплитудного анализатора.

Важным методом рентгеноспектрального анализа является анализ микрообъёмов вещества.

Основу микроанализатора (рис. 3) составляет микрофокусная рентгеновская трубка, объединённая с оптическим металл - микроскопом.

Специальная электронно–оптическая система формирует тонкий электронный зонд, который бомбардирует небольшую, примерно 1 –2 мк, область исследуемого шлифа, помещённого на аноде, и возбуждает рентгеновские лучи, спектральный состав которых далее анализируется с помощью спектрографа с изогнутым кристаллом. Такой прибор позволяет проводить рентгеноспектральный анализ шлифа «в точке» на несколько элементов или исследовать распределение одного из них вдоль выбранного направления. В созданных позднее растровых микроанализаторах электронный зонд обегает заданную площадь поверхности анализируемого образца и позволяет наблюдать на экране монитора увеличенную в десятки раз картину распределения химических элементов на поверхности шлифа. Существуют как вакуумные (для мягкой области спектра), так и не вакуумные варианты таких приборов. Абсолютная чувствительность метода 10-13 –10-15 грамм. С его помощью с успехом анализируют фазовый состав легированных сплавов и исследуют степень их однородности, изучают распределения легирующих добавок в сплавах и их перераспределение в процессе старения, деформации или термообработки, исследуют процесс диффузии и структуры диффузионных и других промежуточных слоёв, изучают процессы, сопровождающие обработку и пайку жаропрочных сплавов, а также исследуют неметаллические объекты в химии, минералогии и геохимии. В последнем случае на поверхности шлифов предварительно напыляют тонкий слой (50-100Å) алюминия, бериллия или углерода.

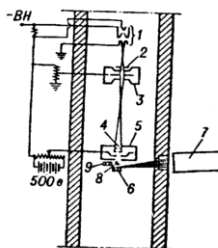


Рис. 3. Схема рентгеновского микроанализатора Кастена и Гинье:

1 – электронная пушка; 2 – диафрагма; 3 – первая собирающая электростатическая линза; 4 – апертурная диафрагма; 5 – вторая собирающая электростатическая линза; 6 – исследуемый образец; 7 – рентгеновский спектрометр; 8 – зеркало; 9 – объектив металлографического оптического микроскопа; ВН – высокое напряжение.

Самостоятельным разделом рентгеноспектрального анализа является исследование тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения и эмиссии атомов в химических соединениях и сплавах. Детальное изучение этого явления открывает пути для экспериментального исследования характера междоатомного взаимодействия в химических соединениях, металлах и сплавах и изучения энергетической структуры электронного спектра в них, определения эффективных зарядов, сосредоточенных на различных атомах в молекулах, и решения других вопросов химии и физики конденсированных сред.

Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ это метод исследования строения тел, использующий явление дифракции рентгеновских лучей, метод исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения. Дифракционная картина зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны  $\sim 1\text{Å}$ , т.е. порядка размеров атома.

Методами рентгеноструктурного анализа изучают металлы, сплавы, минералы, неорганические и органические соединения, полимеры, аморфные материалы, жидкости и газы, молекулы белков, нуклеиновых кислот и т.д. Рентгеноструктурный анализ является основным методом определения структуры кристаллов. При исследовании кристаллов он даёт наибольшую информацию. Это обусловлено тем, что кристаллы обладают строгой периодичностью строения и представляют собой созданную самой природой дифракционную решётку для рентгеновских лучей. Однако он доставляет ценные сведения и при исследовании тел с менее упорядоченной структурой, таких, как жидкости, аморфные тела, жидкие кристаллы, полимеры и другие. На основе многочисленных уже расшифрованных атомных структур может быть решена и обратная задача: по рентгенограмме поликристаллического вещества, например легированной стали, сплава, руды, лунного грунта, может быть установлен кристаллический состав этого вещества, то есть выполнен фазовый анализ.

В ходе рентгеноструктурного анализа исследуемый образец помещают на пути рентгеновских лучей и регистрируют дифракционную картину, возникающую в результате взаимодействия лучей с веществом. На следующем этапе исследования анализируют дифракционную картину и расчётным путём устанавливают взаимное расположение частиц в пространстве, вызвавшее появление данной картины.

Рентгеноструктурный анализ кристаллических веществ распадается на два этапа.

Определение размеров элементарной ячейки кристалла, числа частиц (атомов, молекул) в элементарной ячейке и симметрии расположения частиц (так называемой пространственной группы). Эти данные получают путём анализа геометрии расположения дифракционных максимумов.

Расчёт электронной плотности внутри элементарной ячейки и определение координат атомов, которые отождествляются с положением максимумов электронной плотности. Эти данные получают анализом интенсивности дифракционных максимумов.

Методы рентгеновской съёмки кристаллов.

Существуют различные экспериментальные методы получения и регистрации дифракционной картины. В любом случае имеется источник рентгеновского излучения, система для выделения узкого пучка рентгеновских лучей, устройство для закрепления и ориентирования образца в пучке и приёмник рассеянного образцом излучения. Приёмником служит фотоплёнка, либо ионизационные или сцинтилляционные счётчики рентгеновских квантов. Метод регистрации с помощью счётчиков (дифрактометрический) обеспечивает значительно более высокую точность определения интенсивности регистрируемого излучения.

Из условия Вульфа – Брэгга непосредственно следует, что при регистрации дифракционной картины один из двух входящих в него параметров  $\frac{3}{4} \lambda$  - длина волны или  $q$  - угол падения, должен быть переменным.

Основными рентгеновской съёмки кристаллов являются: метод Лауэ, метод порошка (метод дебаеграмм), метод вращения и его разновидность – метод качания и различные методы рентгенгонометра.

В методе Лауэ на монокристаллический образец падает пучок немонахроматических («белых») лучей (рис. 4 а). Дифрагируют лишь те лучи, длины волн которых удовлетворяют условию Вульфа – Брэгга. Дифракционные пятна на лауграмме (рис.4 б) располагаются по эллипсам, гиперболам и прямым, обязательно проходящим через пятно от первичного пучка.

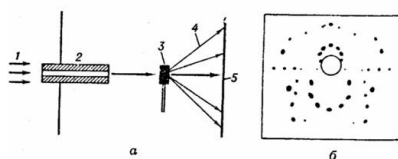


Рис. 4. а – Схема метода рентгеновской съёмки по Лауэ: 1- пучок рентгеновских лучей, падающих на монокристаллический образец; 2 – коллиматор; 3 – образец; 4 – дифрагированные лучи; 5 – плоская фотоплёнка; б – типичная лауграмма.

Важное свойство лауграммы состоит в том, что при соответствующей ориентировке кристалла симметрия расположения этих кривых отражает симметрию кристалла. По характеру пятен на лауграммах можно выявить внутренние напряжения и некоторые другие дефекты кристаллической структуры. Индицирование же отдельных пятен лауэграммы весьма затруднительно. Поэтому метод Лауэ применяют исключительно для нахождения нужной ориентировки кристалла и определения его элементов симметрии. Этим методом проверяют качество монокристаллов при выборе образца для более полного структурного исследования.

В методе порошка (рис 5.а), так же как и во всех остальных описываемых ниже методах рентгеновской съёмки, используется монокроматическое излучение. Переменным параметром является угол  $q$  падения так как в поликристаллическом порошковом образце всегда присутствуют кристаллики любой ориентации по отношению к направлению первичного пучка.

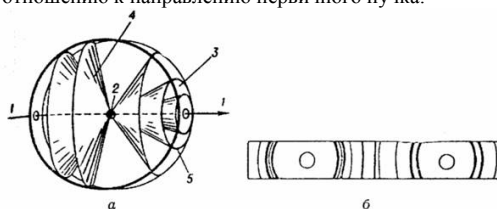


Рис 5.а – схема рентгеновской съёмки по методу порошка: 1 – первичный пучок; 2 – порошковый или поликристаллический образец; 3 – фотоплёнка, свёрнутая по окружности; 4 – дифракционные конусы; 5 – «дуги» на фотоплёнке, возникающие при пересечении её поверхности с дифракционными конусами; б – типичная порошковая рентгенограмма (дебаеграмма).

Лучи от всех кристалликов, у которых плоскости с данным межплоскостным расстоянием  $d_{hkl}$  находятся в «отражающем положении», то есть удовлетворяют условию Вульфа – Брэгга, образуют вокруг первичного луча конус с углом расстра  $4q$ . Каждому  $d_{hkl}$  соответствует свой дифракционный конус. Пересечение каждого конуса дифрагированных рентгеновских лучей с полоской фотоплёнки, свёрнутой в виде цилиндра, ось которого проходит через образец, приводит к появлению на ней следов, имеющих вид дужек, расположенных симметрично относительно первичного пучка (рис. 5.б). Зная расстояния между симметричными «дугами», можно вычислить соответствующие им межплоскостные расстояния  $d$  в кристалле.

Метод порошка наиболее прост и удобен с точки зрения техники эксперимента, однако единственная поставляемая им информация – выбор межплоскостных расстояний – позволяет расшифровывать самые простые структуры.

В методе вращения (рис. 6.а) переменным параметром является угол  $q$ .

Съёмка производится на цилиндрическую фотоплёнку. В течение всего времени экспозиции кристалл равномерно вращается вокруг своей оси, совпадающей с каким-либо важным кристаллографическим направлением и с осью образуемого планкой цилиндра. Дифракционные лучи идут по образующим конусов, которые при пересечении с плёнкой дают линии, состоящие из пятен (так называемые слоевые линии (рис. 6.б). Метод вращения даёт экспериментатору более богатую информацию, чем метод порошка. По расстояниям между слоевыми линиями можно рассчитать период решётки в направлении оси вращения кристалла.

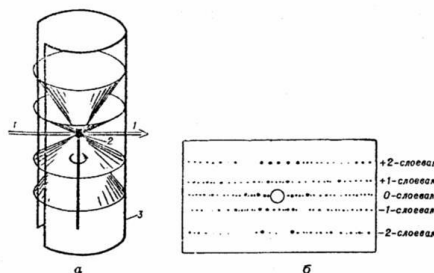


Рис. 6.а – схема рентгеновской съёмки по методу вращения: 1 – первичный пучок; 2 – образец (вращается по стрелке); 3 – фотоплёнка цилиндрической формы; б – типичная рентгенограмма вращения.

В рассматриваемом методе упрощается индицирование пятен рентгенограммы. Так если кристалл вращается вокруг оси с решётки, то все пятна на линии, проходящей через след первичного луча, имеют индексы  $(h,k,0)$ , на соседних с ней слоевых линиях – соответственно  $(h,k,1)$  и

( $h, k, l$ ) и так далее. Однако и метод вращения не даёт всей возможной информации, так никогда неизвестно, при каком угле поворота кристалла вокруг оси вращения образовалось то или иное дифракционное пятно.

В методе качания, который является разновидностью метода вращения, образец не совершает полного вращения, а «качается» вокруг той же оси в небольшом угловом интервале. Это облегчает индентификацию пятен, так как позволяет как бы получать рентгенограмму вращения по частям и определять с точностью до величины интервала качания, под каким углом поворота кристалла к первичному пучку возникли те или иные дифракционные пятна.

Наиболее богатую информацию дают методы рентгеногониометра. Рентгеновский гониометр, прибор, с помощью которого можно одновременно регистрировать направление дифрагированных на исследуемом образце рентгеновских лучей и положение образца в момент возникновения дифракции. Один из них – метод Вайссенберга, является дальнейшим развитием метода вращения. В отличие от последнего, в рентгеногониометре Вайссенберга (рис. 7) все дифракционные конусы, кроме одного, закрываются цилиндрической ширмой, а пятна оставшегося дифракционного конуса (или, что то же, слоевой линии)

«разворачиваются» на всю площадь фотоплёнки путём её возвратно-поступательного осевого перемещения синхронно с вращением кристалла. Это позволяет определить, при какой ориентации кристалла возникло каждое пятно вассенбергограммы.

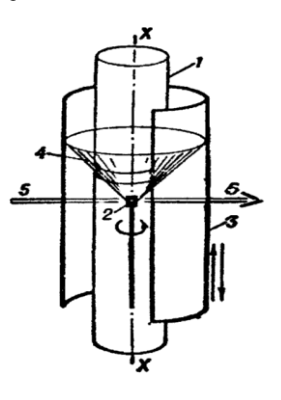


Рис. 7. Принципиальная схема рентгеногониометра Вайссенберга: 1 – неподвижная ширма, пропускающая только один дифракционный конус; 2 – кристалл, поворачивающийся вокруг оси X – X; 3 – цилиндрическая фотоплёнка,двигающаяся поступательно вдоль оси X – X синхронно с вращением кристалла 2; 4 – дифракционный конус, пропущенный ширмой; 5 – первичный пучок.

Существуют и другие методы съёмки, в которых применяется одновременное движение образца и фотоплёнки. Важнейшими из них являются метод фотографирования обратной решётки и прецессионный метод Бюргера. Во всех этих методах использована фотографическая регистрация дифракционной картины. В рентгеновском дифрактометре можно непосредственно измерять интенсивность дифракционных отражений с помощью пропорциональных, сцинтилляционных и других счётчиков рентгеновских квантов.

Применение рентгеноструктурного анализа.

Рентгеноструктурный анализ позволяет объективно устанавливать структуру кристаллических веществ, в том числе таких сложных, как витамины, антибиотики, координационные соединения и т.д. Полное структурное исследование кристалла часто позволяет решить и чисто химические задачи, например установление или уточнение химической формулы, типа связи, молекулярного веса при известной плотности или плотности при известном молекулярном весе, симметрии и конфигурации молекул и молекулярных ионов.

Рентгеноструктурный анализ с успехом применяется для изучения кристаллического состояния полимеров. Ценные сведения даёт рентгеноструктурный анализ и при исследовании аморфных и жидких тел. Рентгенограммы таких тел содержат несколько размытых дифракционных колец, интенсивность которых быстро падает с увеличением  $q$ . По ширине, форме и интенсивности этих колец можно делать заключения об особенностях ближнего порядка в той или иной конкретной жидкой или аморфной структуре.

Важной областью применения рентгеновских лучей является рентгенография металлов и сплавов, которая превратилась в отдельную отрасль науки. Понятие «рентгенография» включает в себя, наряду с полным или частичным рентгеноструктурным анализом, также и другие способы использования рентгеновских лучей – рентгеновскую дефектоскопию (просвечивание), рентгеноспектральный анализ, рентгеновскую микроскопию и другое. Определены структуры чистых металлов и многих сплавов, основанная на рентгеноструктурном анализе кристаллохимия сплавов – один из ведущих разделов металловедения. Ни одна диаграмма состояния металлических сплавов не может считаться надёжно установленной, если данные сплавы не исследованы методами рентгеноструктурного анализа. Благодаря применению методов рентгеноструктурного анализа оказалось возможным глубоко изучить структурные изменения, протекающие в металлах и сплавах при их пластической и термической обработке.

Методу рентгеноструктурного анализа свойственны и серьёзные ограничения. Для проведения полного рентгеноструктурного анализа необходимо, чтобы вещество хорошо кристаллизовалось и давало достаточно устойчивые кристаллы. Иногда необходимо проводить исследование при высоких или низких температурах. Это сильно затрудняет проведение эксперимента. Полное исследование очень трудоёмко, длительно и сопряжено с большим объёмом вычислительной работы.

Для установления атомной структуры средней сложности (~50- 100 атомов в элементарной ячейке) необходимо измерять интенсивности нескольких сотен и даже тысяч дифракционных отражений. Эту весьма трудоёмкую и кропотливую работу выполняют автоматические микроденситометры и дифрактометры, управляемые ЭВМ, иногда в течение нескольких недель и даже месяцев (например, при анализе структур белков, когда число отражений возрастает до сотен тысяч). В связи с этим в последние годы для решения задач рентгеноструктурного анализа получили широкое применение быстродействующие ЭВМ. Однако даже с применением ЭВМ определение структуры остаётся сложной и трудоёмкой работой. Применение в дифрактометре нескольких счётчиков, которые могут параллельно регистрировать отражения, время эксперимента удастся сократить. Дифрактометрические измерения превосходят фоторегистрацию по чувствительности и точности.

Позволяя объективно определить структуру молекул и общий характер взаимодействия молекул в кристалле, исследование методом рентгеноструктурного анализа не всегда даёт возможность с нужной степенью достоверности судить о различиях в характере химических связей внутри молекулы, так как точность определения длин связей и валентных углов часто оказывается недостаточной для этой цели. Серьёзным ограничением метода является также трудность определения положений лёгких атомов и особенно атомов водорода.

### Раздел 3. Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов

#### Тема 3.1. Визуальные и измерительные методы исследования металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 2

час.)

Среди всех методов контроля особое место занимает Визуальный и Измерительный контроль (ВИК).

Данный метод контроля основан, в первую очередь, на возможностях человеческого организма. В первую очередь на возможностях зрения. Т.е. объект контроля исследуется в видимом излучении.

Это единственный вид НК, который может выполняться без какого-либо дорогостоящего и сложного оборудования и проводиться с использованием простейших измерительных средств.

С помощью визуального контроля можно обнаруживать отклонения формы деталей и изделий, изъяны материала и обработки поверхности, а также другие дефекты: остаточную деформацию, поверхностную пористость, крупные трещины, подрезы, риски, задиры, эрозионные и коррозионные поражения, следы наклепаи др. Визуально определяют состояние защитных покрытий, контролируют качество изделий по их цвету и осуществляют другие контрольные функции.

Оптические приборы позволяют намного расширить пределы естественных возможностей глаза. Вследствие преломления лучей в оптической

системе приборов увеличивается угловой размер рассматриваемого объекта. Острота зрения и разрешающая способность глаза увеличиваются примерно во столько раз, во сколько увеличивает оптический прибор. Это позволяет видеть мелкие объекты, размеры которых находятся за пределами границы видимости невооруженного глаза, а также мелкие детали видимых невооруженным глазом объектов. При этом облегчается анализ их природы и вида.

Оптические приборы-эндоскопы позволяют осматривать детали и поверхности элементов конструкций, скрытые близлежащими деталями и не доступные прямою наблюдению, контролировать состояние внутренней поверхности различных закрытых конструкций.

Визуальный контроль с применением оптических приборов называют визуально-оптическим. Он предназначен для обнаружения различных поверхностных дефектов материала деталей, скрытых дефектов агрегатов, контроля закрытых конструкций, труднодоступных мест механизмов и машин (при наличии каналов для доступа приборов к контролируемым объектам). Контроль проводится путем наблюдения деталей и изделий в видимом свете. При контроле используются оптические приборы, создающие полное изображение проверяемой зоны, ее видимую картину.

Визуально-оптический контроль так же, как и визуальный осмотр, - наиболее доступный и простой метод обнаружения поверхностных дефектов деталей. Оптические средства контроля используют на различных стадиях изготовления изделий, деталей и конструкций, а также в процессе регламентных работ и осмотров, проводимых при эксплуатации техники и ее ремонте.

Основные преимущества данного метода - простота контроля, несложное оборудование, сравнительно малая трудоемкость; недостатки - невысокие достоверность и чувствительность. Поэтому визуально оптический контроль применяют в следующих случаях:

- для поиска поверхностных дефектов (трещин, коррозионных и эрозийных повреждений, забоин, язв, открытых раковин, пор и др.) при визуально-оптическом контроле деталей;
- обнаружения крупных трещин, мест разрушения элементов конструкций, остаточной деформации скрытых или удаленных элементов конструкций, течей, загрязнений, а также различных посторонних предметов внутри закрытых конструкций;
- анализа характера и определения типа поверхностных дефектов, обнаруженных при контроле деталей каким-либо методом дефектоскопии (ультразвуковым, токовихревым, цветным и др.).

В связи с тем, что с возрастанием увеличения оптических приборов существенно сокращается поле зрения и глубина резкости, снижаются производительность и надежность контроля, для осмотра деталей в основном применяют оптические приборы с увеличением не более 20-30 крат.

Дефекты даже относительно больших размеров, невидимые невооруженным глазом из-за малого контраста с фоном, при использовании оптических приборов, как правило, не обнаруживаются.

ВИК позволяет обнаруживать поверхностные дефекты размером более 0,5мм. Применение увеличительных средств позволяет несколько уменьшить этот показатель.

Визуально-измерительный контроль нормируется Инструкцией по визуальному и измерительному контролю» РД 03-606-03.

ВИК отличается от всех остальных методов НК, кроме прочего, тем, что он применяется практически всегда. Т.е. на всех сварных конструкциях.

#### *Особенности восприятия изображения глазом человека*

##### Видимость объектов

Под видимостью понимают степень различимости объектов при их наблюдении. Для НК существенное значение имеет видимость близко расположенных объектов, которая зависит от продолжительности рассматривания, а также от следующих основных факторов: контраста, яркости, цвета, угловых размеров объектов, резкости их контуров и условий освещения.

Каждому из указанных свойств соответствует свой абсолютный порог видимости, ниже которого предмет не может быть виден, сколь бы благоприятны ни были условия наблюдения с точки зрения других факторов. Например, при слишком малой яркости или очень малом контрасте предмет нельзя сделать видимым никаким увеличением угловых размеров или продолжительности рассматривания.

Видимость близко расположенных объектов зависит также от положения источников света (при ослепляющем их воздействии видимость снижается) и спектрального состава их излучения. Однако наиболее важными условиями видимости считают контраст и угловые размеры объекта.

Под контрастом понимают свойство объектов выделяться на окружающем фоне благодаря различию их оптических свойств. Различают последовательный и одновременный контрасты. Последовательный контраст заключается в изменении визуальной оценки объекта в зависимости от того, какой свет ранее действовал на тот же участок сетчатки. Явление последовательного контраста должно учитываться при оборудовании рабочих мест, где проводится осмотр деталей и изделий.

Одновременный контраст объясняется различием излучения нескольких видимых одновременно объектов, которые кажутся контролеру находящимися в непосредственном соприкосновении. Способность глаза замечать различие таких объектов называют контрастной чувствительностью зрения. Контрасты, различаемые контролером, разделяют на яркостные и цветные. В первом случае два излучения производят на глаз впечатления одинаковые по цветности, но разные по яркости. Во втором случае впечатления различаются по цветности. За меру яркостного контраста чаще всего принимают отношение

$$K = \frac{B_{\phi} - B_0}{B_{\phi}},$$

где  $B_0$  - яркость рассматриваемого объекта;  $B_{\phi}$  - яркость окружающего фона. При  $K > 0,5$  контраст считается большим, при  $0,2 < K < 0,5$  - средним, при  $K \leq 0,2$  - малым.

Наиболее отчетливое восприятие изображения возможно при максимальном контрасте между объектом и фоном. При этом сила действия контраста прямо пропорциональна разности коэффициентов отражения поверхностей объекта и фона. Максимального яркостного контраста можно достигнуть при использовании белого и черного цветов, которые имеют соответственно наибольший и наименьший коэффициенты отражения. При солнечном освещении коэффициент отражения составляет 65-80 % - для белого и 3-10 % - для черного цвета; яркостный контраст - 85-95 %.

Сравнение величин контраста между черным и белым, а также хроматическими цветами показывает, что наибольший контраст черного цвета с фоном достигается при желтом и белом цвете последнего. Белый цвет образует наибольший контраст из числа хроматических цветов с красным цветом. Меньше величина контраста белого с зеленым, еще меньше - белого с синим.

В работе глаза существенную роль играет минимальная величина яркостного контраста, которую контролер еще способен различать. Эта предельно малая величина контраста называется порогом контрастной чувствительности глаза (Кпор). Порог контрастной чувствительности для большинства людей составляет 0,01- 0,02 (т.е. 1-2 %) при наблюдении в дневных условиях объектов с угловыми размерами не менее  $0,5^{\circ}$  при оптимальных условиях осмотра.

В реальных условиях осмотра, особенно при поиске мелких дефектов на поверхности деталей, пороговый контраст составляет около 0,05 (5 %), иногда больше, что объясняется малой яркостью дефектов, их небольшими угловыми размерами и другими факторами. Пороговое значение контрастной чувствительности увеличивается также при снижении освещенности осматриваемых объектов.

$$V = \frac{K}{K_{\text{пор}}}.$$

Отношение величины наблюдаемого контраста  $K$  к величине порогового контраста  $K_{\text{пор}}$  при данных условиях определяет видимость объекта  $V$ :

При наблюдаемом контрасте 15-20 % и пороговом контрасте 5 % видимость дефектов на поверхности деталей составляет 3-4. Однако при наблюдаемом контрасте, близком к нулю, их видимость также будет близка к нулю. Следовательно, некоторые даже крупные дефекты не могут быть обнаружены глазом из-за малого контраста на поверхности деталей.

##### Временные характеристики зрения

Время, необходимое для возникновения зрительного ощущения у человека, зависит от яркости объекта и длины волны и в среднем колеблется от 0,025 до 0,1 с. При осмотре цветных объектов скорость возникновения ощущения и его сила возрастают по мере перехода от цветов

коротковолнового участка спектра к цветам длинноволнового. С изменением интенсивности освещения порядок нарастания скорости зрительного ощущения различных цветовых тонов не изменяется.

Глаз, как и любая реагирующая система, обладает инерцией. Возникшее световое ощущение исчезает не сразу. Поэтому быстро движущаяся точка представляется в виде светящейся линии, а мелькающий свет при достаточно высокой частоте не отличим от постоянного. Критическая частота слияния мельканий зависит от амплитуды колебаний (контраста) и обычно не превышает 50 Гц.

Количество информации, которое может быть воспринято зрительной системой человека в единицу времени, ограничено. Это связано с падением разрешающей способности и контрастной чувствительности при уменьшении времени наблюдения и анализа объекта.

При осмотре объекта его детали, привлекающие внимание, поочередно проецируются на центральную ямку сетчатки, обладающую максимальной разрешающей способностью. Глаз в процессе наблюдения то относительно неподвижен, то резким скачком поворачивается на угол до 10-20°. В среднем происходит 2-5 скачков в 1 с. При этом скорость луча зрения, скользящего по детали, достигает 300-400 мм/с. Трещины длиной 2-5 мм при такой скорости осмотра могут быть не обнаружены, так как продолжительность их осмотра мала (0,005-0,01 с), и зрительное ощущение не успеет сформироваться. Эти ограничения должны учитываться при контроле деталей способами визуального наблюдения.

*Приборы для обнаружения и контроля мелких близкорасположенных объектов*

Комплект оборудования для ВИК (рисунок 3.1) может включать в себя (например):



Рисунок 1 – Стандартный комплект ВИК

- Нормативный документ РД 03-606-03;
- Фонарик карманный;
- Маркер по металлу;
- Лупа с подсветкой;
- Рулетка измерительная 200 см;
- Линейка измерительная 30 см;
- Штангенциркуль;
- Универсальный шаблон сварщика УШС-2;
- Универсальный шаблон сварщика УШС-3;
- Угольник поверочный;
- Набор шупов № 4 Кл. (0,1 - 1,0 мм);
- Набор радиусов №1 (1-6 мм);
- Набор радиусов № 3 (7 - 25 мм);
- Сумка упаковочная.

Лупы и микроскопы. Для контроля близко расположенных деталей (находящихся на расстоянии не более 250 мм от глаз контролера) используют лупы и микроскопы различного типа.

Лупы и микроскопы позволяют обнаруживать трещины различного происхождения, поверхностные коррозионные и эрозийные повреждения, забоины, открытые раковины, язвы, поры, выкрашивание материала деталей, риски, надиры трущихся поверхностей и другие поверхностные дефекты деталей, а также различные дефекты лакокрасочных и гальванических покрытий. При анализе характера дефектов эти приборы позволяют отличать усталостные трещины от хрупких, трещины - от рисок, примятых заусенцев, сколов окисной пленки, нитевидных загрязнений (волокон ветоши, щетины от кистей) и т.д.

Обычно осмотр деталей проводят с помощью луп с фокусным расстоянием от 125 до 12,5 мм и увеличением соответственно от 2 до 20х. Из-за существенного снижения поля зрения и глубины резкости при больших увеличениях для осмотра деталей в цеховых условиях в основном применяют микроскопы с увеличением от 8 до 40-50х.

Увеличение изображения микроскопом, используемым для осмотра деталей, несколько превышает увеличение лупой. Однако, даже при использовании микроскопа и лупы с равным увеличением, эффективность применения микроскопа из-за высокого качества изображения и надежного обнаружения дефектов выше. Применяемые для контроля деталей микроскопы дают прямое стереоскопическое изображение контролируемой поверхности, что облегчает поиск дефектов. Область применения микроскопов ограничена, как правило, заводскими условиями.

Достоинством микроскопов является их относительно большое рабочее расстояние, позволяющее использовать их для осмотра различных углублений и пазов на деталях. Например, рабочее расстояние лупы 20х составляет 10 мм, а микроскопа МБС-02 (рисунок 3.2) - 64 мм при любом увеличении.



Рисунок 3.2 – Микроскоп МБС-02

Универсальные шаблоны сварщика. Простейшие устройства, предназначенные для контроля внешних характеристик сварного соединения.

УШС-2 предназначен для контроля катетов угловых швов в диапазоне 4-14мм (рисунок 3.3). Контроль проводится ступенчатым методом определения до минимального зазора.

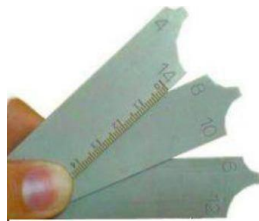


Рисунок 3.3 – УШС-2

УШС-2 состоит из 3-х лепестков и 1 соединительного кольца. Каждый из лепестков имеет точно выполненные выточки определенного катета. Для удобства контроля рядом с каждой выточкой выбит размер соответствующего радиусу катета шва.

Контроль катета сварного шва производится путем последовательного соприкосновения (подбора) лепестков с соединенными сваркой деталями. Размер считается установленным, если длинная сторона лепестка и перемычка между катетами лепестка прилегают к деталям без видимого зазора, а зазор между дугами лепестка и шва является минимальным. При несовпадении ни с одной ступенью размеров в указанном диапазоне значение катета определяется эмпирическим путем.

УШС-3 предназначен для измерения контролируемых параметров труб, контроля качества сборки стыков соединений труб, а также для измерения параметров сварного шва при его контроле (рисунок 3.4).

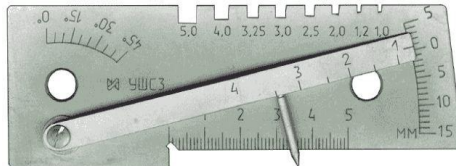


Рисунок 3.4 – УШС-3

Шаблон УШС-3 состоит из основания 1, соединенного осью 4 с движком 2 и закрепленного на движке указателем 3 (рисунок 3.5).

Кроме указанных выше существует большое количество других шаблонов. Принцип их применения аналогичен применению шаблонов УШС-2 и УШС-3. Например, шаблон Красовского (рисунок 3.5).

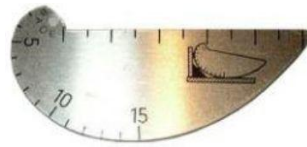


Рисунок 3.5 – Шаблон Красовского

Шаблон Красовского служит для контроля тавровых и нахлесточных сварных соединений, стыковых сварных соединений, измерения зазора между кромками.

Инструменты, позволяющие провести измерение отдельных параметров сварного соединения. Устройство штангенциркуля должно быть известно читателям настоящего пособия. Механический штангенинструмент представляет собой две измерительные поверхности, между которыми устанавливается размер, одна из которых составляет единое целое с линейкой (штангой), а другая соединена с двигающейся по линейке рамкой. На линейке находится через 1 мм деления, на рамке устанавливается или гравировается нониус. Наиболее распространенный штангенинструмент – штангенциркуль. Внешний вид различных штангенциркулей представлен на рисунке 3.6.

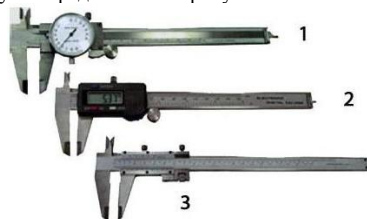


Рисунок 3.6 – Виды штангенциркулей

1 – с круговым индикатором; 2 – электронный; 3 – механический с нониусом

К этому же виду инструментов можно отнести и шаблон Ушерова-Маршака (рисунок 3.7), предназначенный для измерения скоса кромок при подготовке свариваемых соединений деталей, измерения высоты катета углового шва, измерения высоты валика усиления, измерения выпуклости корня шва стыкового сварного соединения, измерения зазора в соединении при подготовке деталей к сварке.

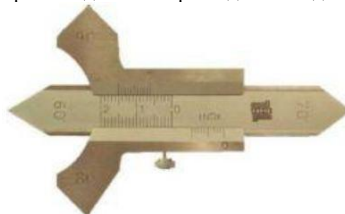


Рисунок 3.7 – Разные виды шаблона Ушерова-Маршака

При проведении измерений допустимая погрешность должна быть в диапазоне, указанном в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Допустимая погрешность измерений при измерительном контроле	
Диапазон измеряемой величины, мм	Погрешность измерений, мм
До 0,5 включительно	0,1
Свыше 0,5 до 1,0 включительно	0,2
Свыше 1,0 до 1,5 включительно	0,3
Свыше 1,5 до 2,5 включительно	0,4
Свыше 2,5 до 4,0 включительно	0,5
Свыше 4,0 до 6,0 включительно	0,6
Свыше 6,0 до 10,0 включительно	0,8
Свыше 10,0	1,0



Для расширения возможностей метода НК ВИК все чаще находят применение различные эндоскопы – смотровые приборы, построенные на базе волоконной или линзовой оптики и современные видео-эндоскопы (рисунок 3.8), имеющие на торце щупа микро-видео камеру с подсветкой.



Рисунок 3.8 – Современный видео-эндоскоп

Применение различных эндоскопов позволяет увидеть те области конструкции, узлов и деталей машин, которые невозможно увидеть человеческим глазом из-за невозможности проникновения к данной области.

ВИК, по определению, предусматривает ручные технологии контроля. В последнее время на рынке стало появляться оборудование, позволяющее автоматизировать процесс контроля, снизить влияние человеческого фактора. Одним из таких устройств является система для контроля сварного шва, представленная на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Лазерный сканер для контроля сварных швов

Система снабжена лазерным сканером и камерой высокого разрешения, позволяющим получать качественное трехмерное изображение шва. После создания трехмерной цифровой модели сварного шва производится автоматическое сравнение со встроенными шаблонами, основанными на конкретных нормативных документах. Признание сварного шва годным к эксплуатации происходит в режиме реального времени.

На экране устройства отображается как фотография сварного шва, так и разнообразная информация, позволяющая классифицировать сварной шов, определить вид и геометрические параметры дефекта, сделать вывод о допустимости к эксплуатации изделия с данным дефектом (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Информация, отображаемая на экране лазерного сканера

### Тема 3.2. Магнитные методы исследования металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 2 час.)

Магнитные методы неразрушающего контроля решают следующие задачи: феррозондовый метод контроля применяется для выявления поверхностных и подповерхностных (глубиной до 10 мм) дефектов типа нарушения сплошности материала: волосовины, трещин, раковин, закатов, плен и т.п., а также для выявления дефектов типа нарушения сплошности сварных соединений и для контроля качества структуры и геометрических размеров изделий, используется для определения степени размагниченности изделий после магнитного контроля; этот метод можно применять на изделиях любых размеров и форм, если отношение их длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью преобразователя; магнитографическим методом контроля выявляют дефекты типа нарушения сплошности материала изделий, в основном для контроля сварных стыковых соединений из ферромагнитных материалов при их толщине от 1 до 18 мм. Вихретоковый метод неразрушающего контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объект контроля этим полем.

Данный метод применяют для контроля деталей, изготовленных из электропроводящих материалов. Особенности присущие вихретоковым методам: многопараметровость, бесконтактный контроль, нечувствительность к изменению влажности» давления и загрязненности газовой среды и поверхности объектов контроля непроводящими веществами.

Вихретоковые методы имеют два основных ограничения:

во-первых, их применяют только для контроля электропроводящих изделий; во-вторых, они имеют малую глубину контроля, связанную с особенностями проникновения электромагнитных волн в объект контроля.

Контрольно-измерительные задачи, решаемые с помощью вихретоковых методов:

позволяют обнаружить трещины, раковины, неметаллические включения и другие виды нарушений сплошности (дефектоскопия); измерять толщины прутков, стенок труб (при одностороннем доступе), диаметр проволоки, а так же толщины лакокрасочных, эмалевых, керамических, гальванических и других покрытий, нанесенных на электропроводящую основу (толщинометрия); контролировать химический состав, механические свойства, остаточные напряжения (структуроскопия).

Неразрушающий контроль осуществляют с помощью СНК (средств неразрушающего контроля): приборов (дефектоскопов, толщиномеров, структуроскопов и т.д.) и установок, а также дефектоскопических веществ и материалов (проникающих и проявляющих жидкостей, магнитных порошков и суспензий, паст и т.д.), стандартных образцов, вспомогательного оборудования.

Дефектоскопы представляют собой приборы и установки, предназначенные для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности.

Практически все дефектоскопы не только выявляют дефекты в изделии, но и определяют с установленной погрешностью его размеры и местонахождение. Некоторые дефектоскопы способны обнаруживать дефекты, определять глубину их и координаты относительно плоскостей изделия.

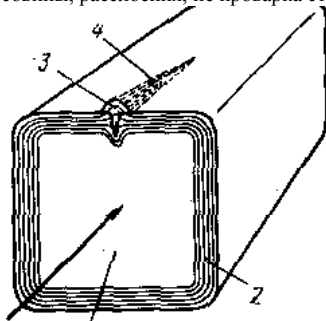
Структуроскопы в зависимости от их принципа действия могут определять физико-химические свойства материала, оценивать твердость и прочность материалов, глубину и качество термической обработки, обнаруживать отклонение содержания углерода от номинального значения, рассортировывать изделия по твердости, выявлять неоднородные по структуре области.

Принципиальный шаг вперед в области методов магнитного неразрушающего контроля был сделан после изобретения Е.М. Беловым "Способ

прогнозирования местоположения течей трубопроводов", позволяющего выявлять аномальные участки трубопровода с поверхности земли за счет бесконтактного измерения его магнитного поля. На базе этого способа реализовано техническое устройство ИАМ-1. Из публикаций о результатах применения данного прибора можно сделать вывод о его достаточной эффективности в качестве индикатора аномальных участков трубопровода с отклонениями уровня напряженно-деформированного состояния металла от фоновых значений. Однако методические основы обследования указанным прибором для выявления точного местоположения, вида и опасности дефектов металла в печати или в нормативных документах не отражены и не могут быть проанализированы. Недостатком метода является отсутствие системы автоматической регистрации с заданным шагом (т.е. сканирования), т.е. появляется зависимость от человеческого фактора. Эффективность применения данной технологии может быть оценена широким кругом специалистов по НК лишь при публикации достаточно обширной статистики вскрытий по результатам обследований.

#### *Магнитопорошковый метод*

Магнитопорошковый метод предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных (на глубине до (1,5 ... 2) мм) дефектов типа нарушения сплошности материала изделия: трещины, волосовины, расслоения, не проварка стыковых сварных соединений, закатов и т.д.



Магнитные частицы порошка, попадая в поле дефекта под действием электрического тока 7, намагничиваются и в результате притягивающей силы перемещаются в зону наибольшей неоднородности магнитного поля. Порошинки, притягиваясь друг к другу, выстраиваются в цепочки, ориентируясь по магнитным силовым линиям поля 2, и, накапливаясь, образуют характерные рисунки в виде валиков 3, по которым судят о наличии дефекта 4.

Этим методом можно контролировать изделия любых габаритных размеров и форм, если магнитные свойства материала изделия (относительная максимальная магнитная проницаемость не менее 40) позволяют намагничивать его до степени, достаточной для создания поля рассеяния дефекта, способного притянуть частицы ферромагнитного порошка.

Магнитопорошковый метод - это метод неразрушающего контроля поверхностей изделий из ферромагнитных материалов в их производстве и эксплуатации, суть которого такова: магнитный поток в бездефектной части изделия не меняет своего направления; если же на пути его встречаются участки с пониженной магнитной проницаемостью, например дефекты в виде разрыва сплошности металла (трещины, неметаллические включения и т.д.), то часть силовых линий магнитного поля выходит из детали наружу и входит в нее обратно, при этом возникают местные магнитные полюсы (N и S) и, как следствие, магнитное поле над дефектом неоднородно, то на магнитные частицы, попавшие в это поле, действует сила, стремящаяся затянуть частицы в место наибольшей концентрации магнитных силовых линий, то есть к дефекту. Частицы в области поля дефекта намагничиваются и притягиваются друг к другу как магнитные диполи под действием силы так, что образуют цепочные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям поля.

Наибольшая вероятность выявления дефектов достигается в случае, когда плоскость дефекта составляет угол 90 град. с направлением намагничивающего поля (магнитного потока). С уменьшением этого угла чувствительность снижается и при углах, существенно меньших 90 град. дефекты могут быть не обнаружены.

Чувствительность МПД определяется:

- магнитными характеристиками материала контролируемого изделия (магнитной индукцией (B), остаточной намагниченностью (Br), максимальной магнитной проницаемостью ( $\mu_{max}$ ), коэрцитивной силой (H0),
- шероховатостью поверхности контроля,
- напряженностью намагничивающего поля, его ориентацией по отношению к плоскости дефекта, качеством дефектоскопических средств и освещенностью контролируемой поверхности.

Магнитопорошковый метод применяется практически во всех отраслях промышленности: авиапромышленность машиностроение

автомобильная промышленность металлургия

транспорт (авиация, железнодорожный, автотранспорт) судостроение

строительство (стальные конструкции, трубопроводы) Методика применения

Магнитопорошковый метод применяется для выявления в объектах разных размеров и формы, изготовленных из ферромагнитных материалов поверхностных и подповерхностных дефектов. С помощью магнитопорошкового метода могут быть обнаружены различные трещины, волосовины и закаты, непровары сварных соединений и другие дефекты шириной раскрытия несколько микрометров. Метод может быть использован для контроля объектов с немагнитным покрытием. Существуют различные виды контроля:

«Сухой» и «мокрый» способы нанесения индикатора на контролируемый объект Флуоресцентный или цветной индикатор для контроля при УФ или дневном свете

Последовательность выполнения технологических операций магнитопорошкового контроля приведена в следующем разделе.

Этапы магнитопорошкового контроля

#### 1. Подготовка детали к контролю.

Подготовка детали к контролю заключается в очистке поверхности детали от отслаивающейся ржавчины, грязи, а также от смазочных материалов и масел, если контроль проводится с помощью водной суспензии или сухого порошка. Если поверхность детали темная и черный магнитный порошок на ней плохо виден, то деталь иногда покрывают тонким просвечивающим слоем белой контрастной краски.

#### 2. Намагничивание детали.

Намагничивание детали является одной из основных операций контроля. От правильного выбора способа, направления и вида намагничивания, а также рода тока во многом зависит чувствительность и возможность обнаружения дефектов.

#### 3. Нанесение на поверхность детали магнитного индикатора (порошка или суспензии).

Оптимальный способ нанесения суспензии заключается в окунании детали в бак, в котором суспензия хорошо перемешана, и в медленном удалении из него. Однако этот способ не всегда технологичен. Чаще суспензию наносят с помощью шланга или душа. Напор струи должен быть достаточно слабым, чтобы не смывался магнитный порошок с дефектных мест. При сухом методе контроля эти требования относятся к давлению воздушной струи, с помощью которой магнитный порошок наносят на деталь. Время стекания с детали дисперсной среды, имеющей большую вязкость (например, трансформаторного масла), относительно велико, поэтому производительность труда контролера уменьшается.

#### 4. Осмотр детали. Расшифровка индикаторного рисунка и разбраковка.

Контролер должен осмотреть деталь после стекания с нее основной массы суспензии, когда картина отложений порошка становится неизменной.

Детали проверяют визуально, но в сомнительных случаях и для расшифровки характера дефектов применяют оптические приборы, тип и увеличение которых устанавливают по нормативным документам. Увеличение оптических средств не должно превышать  $\times 10$ .

Разбраковку деталей по результатам контроля должен производить опытный контроллер. На рабочем месте контроллера необходимо иметь фотографии дефектов или их дефектограммы (реплики с отложениями порошка, снятые с дефектных мест, с помощью клейкой ленты или другими



способами), а также контрольные образцы с минимальными размерами недопустимых дефектов.

Вид и форма валиков магнитного и люминесцентного магнитного порошка во многих случаях помогают распознать нарушения сплошности.

5. Размагничивание и контроль размагниченности. Удаление с детали остатков магнитного индикатора. Применяют два основных способа размагничивания. Наиболее эффективный из них - нагрев изделия до температуры точки Кюри, при которой магнитные свойства материала пропадают. Этот способ применяют крайне редко, так как при таком нагреве могут изменяться механические свойства материала детали, что в большинстве случаев недопустимо.

Второй способ заключается в размагничивании детали переменным магнитным полем с амплитудой, равномерно уменьшающейся от некоторого максимального значения до нуля. В зависимости от материала изделия, его размеров и формы применяют переменные магнитные поля различных частот: от долей Гц до 50 Гц.

### Тема 3.3. Исследование металлов и сплавов проникающими веществами (Лекция-дискуссия – 1 час.)

Капиллярная дефектоскопия - метод дефектоскопии, основанный на проникновении определенных жидких веществ в поверхностные дефекты изделия под действием капиллярного давления, в результате чего повышается свето- и цветоконтрастность дефектного участка относительно неповрежденного.

Различают люминесцентный и цветной методы капиллярной дефектоскопии.

В большинстве случаев по техническим требованиям необходимо выявлять настолько малые дефекты, что заметить их при визуальном контроле невооруженным глазом практически невозможно. Применение же оптических измерительных приборов, например лупы или микроскопа, не позволяет выявить поверхностные дефекты из-за недостаточной контрастности изображения дефекта на фоне металла и малого поля зрения при больших увеличениях. В таких случаях применяют капиллярный метод контроля.

При капиллярном контроле индикаторные жидкости проникают в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля, и образующиеся индикаторные следы регистрируются визуальным способом или с помощью преобразователя.

Контроль капиллярным методом осуществляется в соответствии с ГОСТ 18442-80 "Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования."

Необходимым условием выявления дефектов типа нарушения сплошности материала капиллярными методами является наличие полостей, свободных от загрязнений и других веществ, имеющих выход на поверхность объектов и глубину распространения, значительно превышающую ширину их раскрытия.

Капиллярные методы подразделяют на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные, основанные на сочетании двух или более различных по физической сущности методов неразрушающего контроля, одним из которых является капиллярный контроль (капиллярная дефектоскопия).

*Назначение капиллярного контроля (капиллярной дефектоскопии)*

Капиллярная дефектоскопия (капиллярный контроль) предназначен для выявления невидимых или слабо видимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов (трещины, поры, раковины, непровары, межкристаллическая коррозия, свищи и т.д.) в объектах контроля, определения их расположения, протяженности и ориентации по поверхности.

Капиллярные методы неразрушающего контроля основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

*Применение капиллярного метода неразрушающего контроля*

Капиллярный метод контроля применяется при контроле объектов любых размеров и форм, изготовленных из черных и цветных металлов, легированных сталей, чугуна, металлических покрытий, пластмасс, стекла и керамики в энергетике, авиации, ракетной технике, судостроении, химической промышленности, металлургии, при строительстве ядерных реакторов, в автомобилестроении, электротехнике, машиностроении, литейном производстве, штамповке, приборостроении, медицине и других отраслях. Для некоторых материалов и изделий этот метод является единственным для определения пригодности деталей или установок к работе.

Капиллярная дефектоскопию применяют также и для неразрушающего контроля объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достигать требуемой по ГОСТ 21105-87 чувствительности магнитопорошковым методом и магнитопорошковый метод контроля не допускается применять по условиям эксплуатации объекта.

Необходимым условием выявления дефектов типа нарушения сплошности материала капиллярными методами является наличие полостей, свободных от загрязнений и других веществ, имеющих выход на поверхность объектов и глубину распространения, значительно превышающую ширину их раскрытия.

Капиллярный контроль используется также при течеиспещании и, в совокупности с другими методами, при мониторинге ответственных объектов и объектов в процессе эксплуатации.

Достоинствами капиллярных методов дефектоскопии являются: простота операций контроля, несложность оборудования, применимость к широкому спектру материалов, в том числе к немагнитным металлам.

Преимуществом капиллярной дефектоскопии является то, что с его помощью можно не только обнаружить поверхностные и сквозные дефекты, но и получить по их расположению, протяженности, форме и ориентации по поверхности ценную информацию о характере дефекта и даже некоторых причинах его возникновения (концентрация напряжений, несоблюдение технологии и пр.).

В качестве индикаторных жидкостей применяют органические люминофоры - вещества, дающие яркое собственное свечение под действием ультрафиолетовых лучей, а также различные красители. Поверхностные дефекты выявляют с помощью средств, позволяющих извлекать индикаторные вещества из полости дефектов и обнаруживать их присутствие на поверхности контролируемого изделия.

Капилляр (трещина), выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны, называют поверхностной несплошностью, а соединяющий противоположные стенки объекта контроля, - сквозной. Если поверхностная и сквозная несплошности являются дефектами, то допускается применять вместо них термины

«поверхностный дефект» и «сквозной дефект». Изображение, образованное пенетрантом в месте расположения несплошности и подобное форме сечения у выхода на поверхность объекта контроля, называют индикаторным рисунком, или индикацией.

Применительно к несплошности типа единичной трещины вместо термина «индикация» допускается применение термина «индикаторный след». Глубина несплошности - размер несплошности в направлении внутрь объекта контроля от его поверхности. Длина несплошности - продольный размер несплошности на поверхности объекта. Раскрытие несплошности - поперечный размер несплошности у ее выхода на поверхность объекта контроля.

Необходимым условием надежного выявления капиллярным методом дефектов, имеющих выход на поверхность объекта, является относительная их незагрязненность посторонними веществами, а также глубина распространения, значительно превышающая ширину их раскрытия (минимум 10/1). Для очистки поверхности перед нанесением пенетранта используют очиститель.

Капиллярные методы дефектоскопии подразделяют на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные, основанные на сочетании двух или более различных по физической сущности методов неразрушающего контроля, одним из которых является капиллярный.

Приборы и оборудования для капиллярного контроля:

- Наборы для капиллярной дефектоскопии (очистители, проявители, пенетранты)
- Пульверизаторы
- Пневмогидропистолеты
- Источники ультрафиолетового освещения (ультрафиолетовые фонари, осветители)
- Испытательные панели (тест-панель)
- Контрольные образцы для цветной дефектоскопии

*Чувствительность капиллярного метода дефектоскопии*

Чувствительность капиллярного контроля – способность выявления несплошностей данного размера с заданной вероятностью при использовании конкретного способа, технологии контроля и пенетрантной системы. Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля определяют в зависимости от минимального размера выявленных дефектов с поперечными размерами 0,1 - 500 мкм.

Выявление дефектов, имеющих ширину раскрытия более 0,5 мм, капиллярными методами контроля не гарантируется.

С чувствительностью по 1 классу с помощью капиллярной дефектоскопии контролируют лопатки турбореактивных двигателей, уплотнительные поверхности клапанов и их гнезд, металлические уплотнительные прокладки фланцев и др. (выявляемые трещины и поры величиной до десятых долей мкм). По 2 классу проверяют корпуса и антикоррозийные накладки реакторов, основной металл и сварные соединения трубопроводов, детали подшипников (выявляемые трещины и поры величиной до нескольких мкм).

Чувствительность дефектоскопических материалов, качество промежуточной очистки и контроль всего капиллярного процесса определяются на контрольных образцах (эталопах для цветной дефектоскопии ЦД), т.е. на металлических определенной шероховатости с нанесенными на них нормированными искусственными трещинами (дефектами).

Класс чувствительности контроля определяют в зависимости от минимального размера выявляемых дефектов. Постигаемую чувствительность в необходимых случаях определяют на натуральных объектах или искусственных образцах с естественными или имитируемыми дефектами, размеры которых уточняют металлографическими или другими методами анализа.

Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля определяется в зависимости от размера выявляемых дефектов. В качестве параметра размера дефекта принимается поперечный размер дефекта на поверхности объекта контроля – так называемая ширина раскрытия дефекта. Поскольку глубина и длина дефекта также оказывают существенное влияние на возможность его обнаружения (в частности, глубина должна существенно больше раскрытия), эти параметры считаются стабильными. Нижний порог чувствительности, т.е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта; задержавшееся в полости небольшого дефекта, оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также верхний порог чувствительности, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении излишков пенетранта на поверхности.

Установлено 5 классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов:

Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мкм
I	Менее 1
II	От 1 до 10
III	От 10 до 100
IV	От 100 до 500
технологический	Не нормируется

#### *Физические основы и методика капиллярного метода контроля*

Капиллярный метод неразрушающего контроля (ГОСТ 18442-80) основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости и предназначен для выявления дефектов, имеющих выход на поверхность объекта контроля. Данный метод пригоден для выявления несплошностей с поперечными размерами 0,1 - 500 мкм, в том числе сквозных, на поверхности черных и цветных металлов, сплавов, керамики, стекла и т.п. Широко применяется для контроля целостности сварного шва.

Цветной или красящий пенетрант наносится на поверхность объекта контроля. Благодаря особым качествам, которые обеспечиваются подбором определенных физических свойств пенетранта: поверхностного натяжения, вязкости, плотности, он, под действием капиллярных сил, проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность объекта контроля.

Проявитель, наносимый на поверхность объекта контроля через некоторое время после осторожного удаления с поверхности пенетранта, растворяет находящийся внутри дефекта краситель и за счет диффузии “вытягивает” оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность объекта контроля.

Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, отдельные точки - на поры.

Процесс обнаружения дефектов капиллярным методом разделяется на 5 стадий (проведение капиллярного контроля):

1. Предварительная очистка поверхности (используют очиститель)
2. Нанесение пенетранта
3. Удаление излишков пенетранта
4. Нанесение проявителя
5. Контроль

Предварительная очистка поверхности. Чтобы краситель мог проникнуть в дефекты на поверхности, ее предварительно следует очистить водой или органическим очистителем. Все загрязняющие вещества (масла, ржавчина, и т.п.) любые покрытия (ЛКП, металлизация) должны быть удалены с контролируемого участка. После этого поверхность высушивается, чтобы внутри дефекта не оставалось воды или очистителя.

Нанесение пенетранта. Пенетрант, обычно красного цвета, наносится на поверхность путем распыления, кистью или погружением ОК в ванну, для хорошей пропитки и полного покрытия пенетрантом. Как правило, при температуре 5-50 °С, на время 5-30 мин.

Удаление излишков пенетранта. Избыток пенетранта удаляется протиркой салфеткой, промыванием водой. Или тем же очистителем, что и на стадии предварительной очистки. При этом пенетрант должен быть удален с поверхности, но никак не из полости дефекта. Поверхность далее высушивается салфеткой без ворса или струей воздуха. Используя при этом очиститель, есть риск вымывания пенетранта и неправильной его индикации.

Нанесение проявителя. После просушки сразу же на ОК наносится проявитель, обычно белого цвета, тонким ровным слоем.

Контроль. Инспектирование ОК начинается непосредственно после окончания процесса проявки и заканчивается согласно разным стандартам не более чем через 30 мин. Интенсивность окраски говорит о глубине дефекта, чем бледнее окраска, тем дефект мельче. Интенсивную окраску имеют глубокие трещины. После проведения контроля проявитель удаляется водой или очистителем.

Красящий пенетрант наносится на поверхность объекта контроля (ОК). Благодаря особым качествам, которые обеспечиваются подбором определенных физических свойств пенетранта: поверхностного натяжения, вязкости, плотности, он, под действием капиллярных сил, проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность объекта контроля. Проявитель, наносимый на поверхность объекта контроля через некоторое время после осторожного удаления с поверхности пенетранта, растворяет находящийся внутри дефекта краситель и за счет диффузии “вытягивает” оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность объекта контроля. Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, отдельные точки - на поры.

Наиболее удобны распылители, например аэрозольные баллоны. Можно наносить проявитель и окунанием. Сухие проявители наносятся в вихревой камере, либо электростатически. После нанесения проявителя следует выждать время от 5 мин для крупных дефектов, до 1 часа для мелких дефектов. Дефекты будут проявляться, как красные следы на белом фоне.

Сквозные трещины на тонкостенных изделиях можно обнаруживать, нанося проявитель и пенетрант с разных сторон изделия. Прошедший насквозь краситель будет хорошо виден в слое проявителя.

Пенетрантом (пенетрант от английского penetrate - проникать) называют капиллярный дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индентифицировать эти несплошности. Пенетранты содержат красящие вещества (цветной метод) или люминесцирующие добавки (люминесцентный метод), или их комбинацию. Добавки позволяют отличать пропитанную этими веществами область слоя проявителя над трещиной от основного (чаще всего белого) сплошного без дефектов материала объекта (фон).

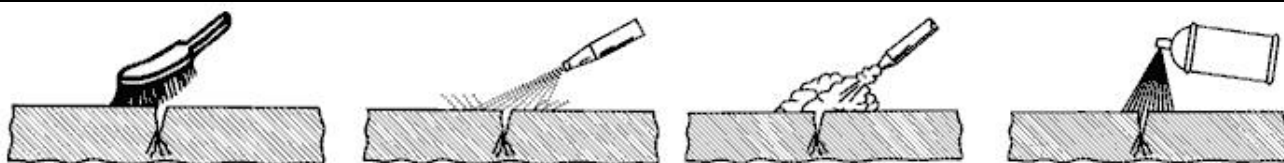
Проявителем (проявитель) называют дефектоскопический материал, предназначенный для извлечения пенетранта из капиллярной несплошности с целью образования четкого индикаторного рисунка и создания контрастирующего с ним фона. Таким образом, роль проявителя в капиллярном контроле заключается, с одной стороны, в том, чтобы он извлекал пенетрант из дефектов за счет капиллярных сил, с другой стороны, -

проявитель должен создать контрастный фон на поверхности контролируемого объекта, чтобы уверенно выявлять окрашенные или люминесцирующие индикаторные следы дефектов. При правильной технологии проявления ширина следа в 10 ... 20 и более раз может превосходить ширину дефекта, а яркостный контраст возрастает на 30 ... 50 %. Этот эффект увеличения позволяет опытным специалистам даже невооруженным глазом выявлять очень маленькие трещины.

Последовательность операций при капиллярном контроле:

Предварительная очистка	Механически, щеткой	Струйным методом	Обезжиривание горячим паром	Очистка растворителем
Предварительная просушка				
Нанесение пенетранта	Погружение в ванну	Нанесение кистью	Нанесение аэрозоли из распылителя	Нанесение электростатическим способом
Промежуточная очистка	Пропитанной водой не ворсистой тканью или губкой	Пропитанной водой кистью	Сполоснуть водой	Пропитанной специальным растворителем не ворсистой тканью или губкой
Сушка	Высушить на воздухе	Протереть ворсистой тканью	Обдуть чистым, сухим воздухом	Высушить теплым воздухом
Нанесение проявителя	Погружением (проявитель на водной основе)	Нанесение из аэрозоли / распылителя (проявитель на спиртовой основе)	Электростатическое нанесение (проявитель на спиртовой основе)	Нанесение сухого проявителя (при сильной пористости поверхности)
Проверка поверхности и документирование	Контроль при дневном или искусственном освещении мин.	Документация на прозрачной пленке	Фотооптическое документирование	Документирование с помощью фото- или видеосъемки

	500 Лкx (EN 571-1/EN3059) При использовании флуоресцентного пенетранта: Освещение: < 20 Лкx Интенсивность УФ: 1000μW/cm2			
--	--	--	--	--



Основные капиллярные методы неразрушающего контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на следующие:

Метод проникающих растворов - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора.

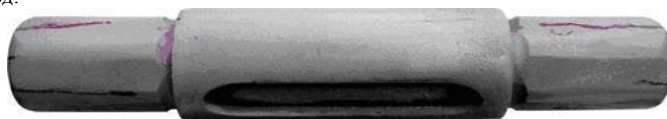
Метод фильтрующихся суспензий - жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве жидкого проникающего вещества индикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на:

Люминесцентный метод, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

- контрастный (цветной) метод, основанный на регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля.

Контрастный (красно-белый) метод:



- люминесцентно-цветной метод, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом ультрафиолетовом излучении;

- яркостный метод, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля.

Физические основы капиллярной дефектоскопии. Люминесцентная дефектоскопия (ЛД). Цветная дефектоскопия (ЦД).

Изменить соотношение контрастностей изображения дефекта и фона можно двумя способами. Первый способ заключается в полировке поверхности контролируемого изделия с последующим травлением ее кислотами. При такой обработке дефект забивается продуктами коррозии, чернеет и становится заметным на светлом фоне полированного материала. Этот способ имеет целый ряд ограничений. В частности, в производственных условиях совершенно нерентабельно полировать поверхность изделия, особенно сварных швов. К тому же способ неприменим при контроле прецизионных полированных деталей или неметаллических материалов. Способ травления чаще применяют для контроля каких-то локальных подозрительных участков металлических изделий.

Второй способ состоит в изменении светоотдачи дефектов заполнением их с поверхности специальными свето- и цвето-контрастными

индикаторными жидкостями - пенетрантами. Если в состав пенетранта входят люминесцирующие вещества, т. е. вещества, дающие яркое свечение при облучении их ультрафиолетовым светом, то такие жидкости называют люминесцентными, а метод контроля соответственно - люминесцентным (люминесцентная дефектоскопия - ЛД). Если же основой пенетранта являются красители, видимые при дневном свете, то метод контроля называют цветным (цветная дефектоскопия - ЦД). В цветной дефектоскопии используют красители ярко-красного цвета.

Сущность капиллярной дефектоскопии заключается в следующем. Поверхность изделия очищают от грязи, пыли, жировых загрязнений, остатков флюса, лакокрасочных покрытий и т. п. После очистки на поверхность подготовленного изделия наносят слой пенетранта и некоторое время выдерживают, чтобы жидкость смогла проникнуть в открытые полости дефектов. Затем поверхность очищают от жидкости, часть которой остается в полостях дефектов.

В случае люминесцентной дефектоскопии изделие освещают ультрафиолетовым светом (ультрафиолетовый осветитель) в затемненном помещении и подвергают осмотру. Дефекты хорошо заметны в виде ярко светящихся полосок, точек и т. п.

При цветной дефектоскопии выявить дефекты на этой стадии не удастся, так как разрешающая способность глаза слишком мала. Чтобы повысить выявляемость дефектов, на поверхность изделия после удаления с нее пенетранта наносят специальный проявляющий материал в виде быстро сохнущей суспензии (например, каолина, коллодия) или лаковые покрытия. Проявляющий материал (обычно белого цвета) вытягивает пенетрант из полости дефектов, что приводит к образованию на проявителе индикаторных следов. Индикаторные следы полностью повторяют конфигурацию дефектов в плане, но больше их по размерам. Такие индикаторные следы легко различимы глазом даже без использования оптических средств. Увеличение размеров индикаторного следа тем больше, чем глубже дефекты, т.е. чем больше объем пенетранта, заполнившего дефект, и чем больше времени прошло с момента нанесения проявляющего слоя.

Физической основой капиллярных методов дефектоскопии является явление капиллярной активности, т.е. способность жидкости втягиваться в мельчайшие сквозные отверстия и открытые с одного конца каналы.

Капиллярная активность зависит от смачивающей способности твердого тела жидкостью. В любом теле на каждую молекулу со стороны других молекул действуют молекулярные силы сцепления. В твердом теле они больше, чем в жидком. Поэтому жидкости в отличие от твердых тел не обладают упругостью формы, но обладают большой объемной упругостью. Молекулы, находящиеся на поверхности тела, взаимодействуют как с одноименными молекулами тела, стремящимися втянуть их внутрь объема, так и с молекулами окружающей тело среды и обладают наибольшей потенциальной энергией. По этой причине перпендикулярно к границе в направлении внутрь тела возникает нескомпенсированная сила, называемая силой поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения пропорциональны длине контура смачивания и, естественно, стремятся его уменьшить. Жидкость на металле в зависимости от соотношения межмолекулярных сил будет растекаться по металлу или соберется в каплю. Жидкость смачивает твердое тело, если силы взаимодействия (притяжения) жидкости с молекулами твердого тела больше, чем силы поверхностного натяжения. В этом случае жидкость будет растекаться по твердому телу. Если же силы поверхностного натяжения больше, чем силы взаимодействия с молекулами твердого тела, то жидкость соберется в каплю.

При попадании жидкости в капиллярный канал ее поверхность искривляется, образуя так называемый мениск. Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить величину свободной границы мениска, и в капилляре начинает действовать дополнительная сила, приводящая к всасыванию смачивающей жидкости. Глубина, на которую жидкость проникает в капилляр, прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения жидкости и обратно пропорциональна радиусу капилляра. Иными словами, чем меньше радиус капилляра (дефекта) и лучше смачиваемость материала, тем жидкость быстрее и на большую глубину проникает в капилляр.

### Тема 3.4. Ультразвуковые методы исследования металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 1 час.)

Ультразвуковая дефектоскопия - метод, предложенный С. Я. Соколовым в 1928 году и основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5...25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования - ультразвукового дефектоскопа. Является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля.

#### Принцип работы

Звуковые волны не изменяют траектории движения в однородном материале. Отражение акустических волн происходит от раздела сред с различными удельными акустическими сопротивлениями. Чем больше различаются акустические сопротивления, тем большая часть звуковых волн отражается от границы раздела сред. Так как включения в металле обычно содержат газ (смесь газов) возникающих вследствие процесса сварки, литья и т. п. И не успевают выйти наружу при затвердевании металла, смесь газов имеет на пять порядков меньшее удельное акустическое сопротивление, чем сам металл, то отражение будет практически полное.

Разрешающая способность акустического исследования, то есть способность выявлять мелкие дефекты раздельно друг от друга, определяется длиной звуковой волны, которая в свою очередь зависит от частоты ввода акустических колебаний. Чем больше частота, тем меньше длина волны. Эффект возникает из-за того, что при размере препятствия меньше четверти длины волны, отражения колебаний практически не происходит, а доминирует их дифракция. Поэтому, как правило, частоту ультразвука стремятся повышать. С другой стороны, при повышении частоты колебаний быстро растёт их затухание, что сокращает возможную область контроля. Практическим компромиссом стали частоты в диапазоне от 0,5 до 10 МГц.

#### Возбуждение и прием ультразвука

Существует несколько методов возбуждения ультразвуковых волн в исследуемом объекте. Наиболее распространенным является использование пьезоэлектрического эффекта. В этом случае излучение ультразвука производится с помощью преобразователя, который преобразует электрические колебания в акустические путём обратного пьезоэлектрического эффекта. Пройдя через контролируемую среду, сигналы попавшие на пьезопластину преобразователя, вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта вновь становятся электрическими, которые и регистрируются измерительными цепями. В зависимости от конструкции и подключения, пьезоэлектрические преобразователи могут выполнять роль только излучателя ультразвуковых колебаний или только приёмника, либо совмещать в себе обе функции.

Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи, используемые при ручном контроле: прямой В1S-O, миниатюрный наклонный MWB 70-4, наклонный WK45-2



Также используются электромагнитно-акустический (ЭМА) метод, основанный на приложении сильных переменных магнитных полей к металлу. КПД этого метода гораздо ниже, чем у пьезоэлектрического, но зато может работать через воздушный зазор и не предъявляет особых требований к качеству поверхности.

#### Классификация методов исследования

Существующие акустические методы неразрушающего контроля подразделяют на две большие группы

— активные и пассивные.

**Активные:**

Активные методы контроля подразумевают под собой излучение и приём акустических волн.

- Отражения:

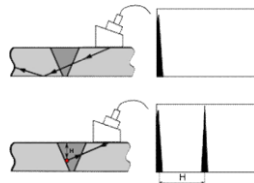


Рис 3.9 Эхо-импульсный метод контроля сварного соединения без дефекта (сверху) и с дефектом (снизу). В правой части изображения представлен экран дефектоскопа с изображённым на нём зондирующим импульсом (сверху) и импульсом от дефекта (снизу).

Эхо-метод или эхо-импульсный метод — наиболее распространенный: преобразователь генерирует колебания (то есть выступает в роли генератора) и он же принимает отражённые от дефектов эхо-сигналы (приёмник). Данный способ получил широкое распространение за счёт своей простоты, так как для проведения контроля требуется только один преобразователь, следовательно при ручном контроле отсутствует необходимость в специальных приспособлениях для его фиксации (как, например, в дифракционно-временном методе) и совмещении акустических осей при использовании двух преобразователей. Кроме того, это один из немногих методов ультразвуковой дефектоскопии, позволяющий достаточно точно определить координаты дефекта, такие как глубину залегания и положение в исследуемом объекте (относительно преобразователя).

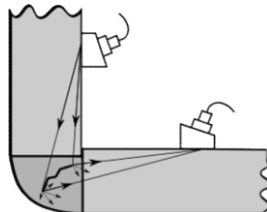


Рис 3.10 Трещина в угловом сварном шве, выявляемая дифракционно-временным методом контроля.

Зеркальный или Эхо-зеркальный метод — используются два преобразователя с одной стороны детали: сгенерированные колебания отражаются от дефекта в сторону приемника. На практике используется для поиска дефектов расположенных перпендикулярно поверхности контроля, например трещин.

Дифракционно-временной метод — используется два преобразователя с одной стороны детали, расположенные друг напротив друга. Если дефект имеет острые кромки (как, например, трещины) то колебания дифрагируют на концах дефекта и отражаются во все стороны, в том числе и в сторону приёмника. Дефектоскоп регистрирует время прихода обоих импульсов при их достаточной амплитуде. На экране дефектоскопа одновременно отображаются оба сигнала от верхней и от нижней границ дефекта, тем самым можно достаточно точно определить условную высоту дефекта. Способ достаточно универсален, позволяет производить ультразвуковой контроль на швах любой сложности, но требует специального оборудования для фиксации преобразователей, а также дефектоскоп, способный работать в таком режиме. Кроме того, дифрагированные сигналы достаточно слабые.

Дельта-метод — разновидность зеркального метода — отличается механизмом отражения волны от дефекта и способом принятия сигнала. В диагностике используется для поиска специфично расположенных дефектов. Данный метод очень чувствителен к вертикально-ориентированным трещинам, которые не всегда удаётся выявить обычным эхо-методом.

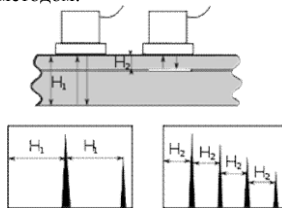


Рис 3.11 Ревербационный метод контроля двухслойной конструкции.

Ревербационный метод — основан на постепенном затухании сигнала в объекте контроля. При контроле двухслойной конструкции, в случае качественного соединения слоёв, часть энергии из первого слоя будет уходить во второй, поэтому ревербация будет меньше. В обратном случае будут наблюдаться многократные отражения от первого слоя, так называемый лес. Метод используется для контроля сцепления различных видов наплавки, например баббитовой наплавки с чугунным основанием. Основным недостатком данного метода является регистрация дефектоскопом эхо-сигналов от границы соединения двух слоёв. Причиной этих эхо-сигналов является разница скоростей упругих колебаний в материалах соединения и их различное удельное акустическое сопротивление. Например на границе баббит-сталь возникает постоянный эхо-сигнал даже в местах качественного сцепления. В силу конструктивных особенностей некоторых изделий, контроль качества соединения материалов ревербационным методом может быть невозможен именно из-за наличия на экране дефектоскопа эхо-сигналов от границы соединения.

Акустическая микроскопия благодаря повышенной частоте ввода ультразвукового пучка и применению его фокусировки, позволяет обнаруживать дефекты, размеры которых не превышают десятых долей миллиметра. Широкое применение в промышленности затруднено в связи с крайне низкой производительностью метода. Данный метод подходит для исследовательских целей, диагностике, а также радиоэлектронной промышленности.

Когерентный метод — по сути является разновидностью Эхо-импульсного метода. Помимо двух основных параметров эхо-сигнала, таких как амплитуда и время прихода, используется дополнительно фаза эхо-сигнала. Использование когерентного метода, а точнее нескольких идентичных преобразователей, работающих синфазно. При использовании специальных преобразователей, таких как преобразователь бегущей волны или его современный аналог — преобразователь с фазированной решёткой. Исследования применимости данного метода к реальным объектам контроля еще не завершены. Метод находится на стадии научно-исследовательских изысканий.

#### - Прохождения:

Методы прохождения подразумевают под собой наблюдение за изменением параметров ультразвуковых колебаний, прошедших через объект контроля, так называемых сквозных колебаний. Изначально для контроля применялось непрерывное излучение, а изменение его амплитуды сквозных колебаний расценивалось как наличие дефекта в контролируемом объекте, так называемой звуковой тени. Отсюда появилось название теневой метод. Со временем непрерывное излучение сменилось импульсным, а к фиксируемым параметрам помимо амплитуды добавились также фаза, спектр и время прихода импульса и появились другие методы прохождения. Термин теневой потерял свой первоначальный смысл и стал означать один из методов прохождения. В англоязычной литературе метод прохождения называется through transmission technique или through transmission method, что полностью соответствует его российскому названию. Термин теневой в англоязычной литературе не применяется.

Теневой — используются два преобразователя, которые находятся по две стороны от исследуемой детали на одной акустической оси. В данном случае один из преобразователей генерирует колебания (генератор), а второй принимает их (приёмник). Признаком наличия дефекта будет являться значительное уменьшение амплитуды принятого сигнала, или его пропадание (дефект создает акустическую тень).

Зеркально-теневой — используется для контроля деталей с двумя параллельными сторонами, развитие теневое метода: анализируются отражения от противоположной грани детали. Признаком дефекта, как и при теневом методе, будет считаться пропадание отраженных колебаний. Основное достоинство этого метода в отличие от теневое заключается в доступе к детали с одной стороны.



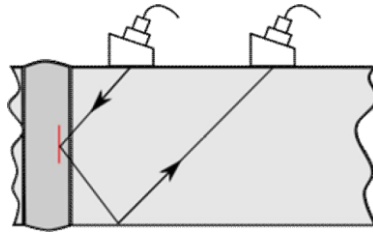


Рис 3.12 Вертикально ориентированная трещина, выявляемая зеркальным методом.

Временной тенью основан на запаздывании импульса во времени, затраченного на огибание дефекта.

Используется для контроля бетона или огнеупорного кирпича.

Метод многократной тени аналогичен теневому, с тем исключением, что ультразвуковая волна несколько раз проходит через параллельные поверхности изделия.

При эхо-сквозном методе используют два преобразователя, расположенные по разные стороны объекта контроля друг напротив друга. В случае отсутствия дефекта, на экране дефектоскопа наблюдают сквозной сигнал и сигнал, двукратно отражённый от стенок объекта контроля. При наличии полупрозрачного дефекта, также наблюдают отражённые сквозные сигналы от дефекта.

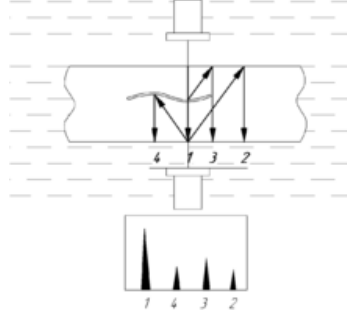


Рис3.13 Эхо-сквозной метод контроля.

При отсутствии дефекта на экране дефектоскопа наблюдаются только 1 и 2 импульсы. При наличии полупрозрачного дефекта, дополнительно 3 и 4-й. На рисунке для наглядности отражения ультразвуковых волн, неверно показаны направления их распространения. Ультразвуковые волны распространяются вдоль акустической оси передатчика (верхнего преобразователя).

Ревербационно-сквозной метод включает в себя элементы ревербационного метода и метода многократной тени. На небольшом расстоянии друг от друга, как правило с одной стороны изделия, устанавливаются два преобразователя — передатчик и приёмник. Ультразвуковые волны, посылаемые в объект контроля после многократных отражений, в конечном счете попадают на приёмник. Отсутствие дефекта позволяет наблюдать стабильные отраженные сигналы. При наличии дефекта изменяется распространение ультразвуковых волн — изменяется амплитуда и спектр принятых импульсов. Метод применяется для контроля многослойных конструкций и полимерных композитных материалов.

Велосиметрический метод основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Применяется для контроля многослойных конструкций и для изделий из полимерных композиционных материалов.

Собственных колебаний

Основаны на возбуждении в объекте контроля свободных или вынужденных колебаний и измерению их параметров: собственных частот и величины потерь.

Вынужденных колебаний Интегральный Локальный

Акустико-топографический Свободных колебаний

Свободные колебания возбуждают путём кратковременного воздействия на объект контроля, после чего объект колеблется в отсутствие внешних воздействий. Источником кратковременного воздействия может быть любой механический удар, например молотком.

Интегральный Локальный Импедансные Изгибных волн Продольных волн Контактного импеданса

*Пассивные*

Пассивные методы контроля заключаются в приёме волн, источником которых является сам объект контроля.

Акустико-эмиссионный Вибрационно-диагностический Шумодиагностический

Современные дефектоскопы точно измеряют время, прошедшее от момента излучения до приёма эхо- сигнала, тем самым измеряя расстояние до отражателя. Это позволяет добиться высокого лучевого разрешения исследования. Компьютеризированные системы позволяют провести анализ большого числа импульсов и получить трёхмерную визуализацию отражателей в металле.

Преимущества



Ультразвуковой контроль изделий в ГДР, 1977 год

Ультразвуковой контроль не разрушает и не повреждает исследуемый образец, что является его главным преимуществом. Возможно проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов. Кроме того можно выделить высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека (по сравнению с рентгеновской дефектоскопией) и высокую мобильность ультразвукового дефектоскопа.

Недостатки

Использование пьезоэлектрических преобразователей требует подготовки поверхности для ввода ультразвука в металл, в частности создания шероховатости поверхности не ниже класса 5, в случае со сварными соединениями ещё и направления шероховатости (перпендикулярно шву). Ввиду большого акустического сопротивления воздуха, малейший воздушный зазор может стать непреодолимой преградой для ультразвуковых колебаний. Для устранения воздушного зазора, на контролируемый участок изделия предварительно наносят контактные жидкости, такие как вода, масло, клейстер. При контроле вертикальных или сильно наклоненных поверхностей необходимо применять густые контактные жидкости с целью предотвращения их быстрого стекания.

Для контроля изделий с внешним диаметром менее 200 мм, необходимо использовать преобразователи, с радиусом кривизны подошвы R, равным 0,9-1,1R радиуса контролируемого объекта, так называемые притертые преобразователи, которые в таком виде непригодны для контроля

изделий с плоскими поверхностями. Например для контроля цилиндрической поковки, необходимо производить перемещение преобразователя в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что подразумевает под собой использование двух притёртых преобразователей — по одному для каждого из направлений.

Как правило ультразвуковая дефектоскопия не может дать ответ на вопрос о реальных размерах дефекта, лишь о его отражательной способности в направлении приемника. Эти величины коррелируют, но не для всех типов дефектов. Кроме того, некоторые дефекты практически невозможно выявить ультразвуковым методом в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля.

Практически невозможно производить достоверный ультразвуковой контроль металлов с крупнозернистой структурой, таких как чугун или аустенитный сварной шов (толщиной свыше 60 мм)[2][3] из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука. Кроме того, затруднителен контроль малых деталей или деталей со сложной формой. Также затруднен ультразвуковой контроль сварных соединений из разнородных сталей (например аустенитных сталей с перлитными сталями) ввиду крайней неоднородности металла сварного шва и основного металла.

Применение



Ультразвуковой дефектоскоп для контроля железнодорожных рельс

Применяется для поиска дефектов материала (поры, волосовины, различные включения, неоднородная структура и пр.) и контроля качества проведения работ — сварка, пайка, склейка и пр. Ультразвуковой контроль является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий, таких как части авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов или железнодорожные рельсы.

Ультразвуковой контроль сварных швов

Сварные швы являются самой массовой областью применения ультразвуковой дефектоскопии. Это достигается за счёт мобильности ультразвуковой установки, высокой производительности контроля, высокой точности, высокой чувствительности к любым внутренним (объёмным) — поры, металлические и неметаллические включения; плоскостным — непровары, трещины), а также внешним, то есть поверхностным дефектам сварных швов (подрезы, обнижения валика усиления и т. п.).

Многие ведомственные документы подразумевают обязательный ультразвуковой контроль сварных швов, либо альтернативный выбор ультразвукового или радиационного контроля, либо контроль обоими методами.

Основным документом в России по ультразвуковому контролю сварных швов является ГОСТ Р 55724- 2013, в котором рассмотрены в полном объёме методы контроля стыковых, тавровых, нахлесточных и угловых сварных швов, выполненных различными способами сварки. Также в нём подробно описаны стандартные образцы (эталоны) СО-1, СО-2 (СО-2А), СО-3 и СО-4 и стандартные образцы предприятия, необходимые для настройки дефектоскопа, а также их параметры для их изготовления.

Объёмы контроля и нормы оценки качества сварного соединения устанавливаются различными нормативными документами в соответствии с требованиями прочности к конкретной сварной конструкции. На предприятиях, изготавливающих особо ответственные изделия, а также различными надзорными органами могут выпускаться собственные методические материалы для оценки качества сварных швов. Примером может служить РД РОСЭК-001-96, разработанный Российской экспертной компанией по объектам повышенной опасности «РосЭК», и утвержденный Ростехнадзором для оценки качества сварных соединений для грузоподъёмных машин.

Нормативно-техническая документация

ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

ГОСТ 24507-80 Контроль неразрушающий. Поковки из черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии.

ГОСТ 22727-88 Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля.

ГОСТ 21120-75 Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечения. Методы ультразвуковой дефектоскопии.

РД РОСЭК-001-96 Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой.

Основные положения.

ОП 501 ЦД-97 Энергетическое оборудование. Сосуды давления. Трубопроводы пара, воды.

ПНАЭ Г-7-010-89 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.

ПНАЭ Г-10-032-92 Правила контроля сварных соединений элементов локализирующих систем безопасности атомных станций.

ПНАЭ Г-7-032-91 Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть IV. Контроль сварных соединений из сталей аустенитного класса.

### Тема 3.5. Радиационные методы исследования металлов и сплавов (Лекция-дискуссия – 1 час.)

Радиационный неразрушающий контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. (ГОСТ 24034 «Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения»). В основе радиационных методов контроля лежит получение дефектоскопической информации об объекте контроля с помощью ионизирующего излучения, прохождение которого через вещество сопровождается ионизацией атомов и молекул среды. Результаты контроля определяются:

- природой и свойствами используемого ионизирующего излучения;
- физико-техническими свойствами объекта контроля;
- свойствами детектора, используемого для регистрации результата взаимодействия излучения с веществом объекта контроля;
- технологией контроля;
- квалификацией дефектоскопистов, проводящих контроль.

*Область применения радиационных методов* Радиационные методы неразрушающего контроля предназначены для обнаружения: в производстве изделий:

- макроскопических нарушений сплошности материала контролируемых объектов, возникающих (поры, раковины, рыхлоты, микрорыхлоты, пористость, шлаковые и другие включения, непровары, трещины);
- внутренней геометрии деталей, узлов и агрегатов (разностенность и отклонение формы внутренних контуров от заданных по чертежам, неправильная сборка узлов, зазоры, неплотное прилегание в соединениях) при эксплуатации техники;
- трещин, коррозионных поражений во внутренних полостях,
- внутренних неисправностей агрегатов;
- нарушений правильности взаимного расположения деталей в сложных узлах. Не допускается применять радиационные методы контроля

для выявления:

- расслоений;
- слипаний;
- закатов;
- заковов;
- волосовин;
- других дефектов с незначительным раскрытием в заготовках и деталях из металлов, получаемых пластическим деформированием (ковка, штамповка и др. подобные технологические процессы).

#### *Методика и техника контроля*

Методика и техника контроля предусматривает последовательное выполнение следующих операций:

- разработку технологической карты;
- подготовку к контролю;
- просвечивание объекта контроля;

Радиографический контроль следует проводить в соответствии с технологической картой (ТК) контроля, которая разработана для конкретного объекта контроля, и является основным документом для лица, проводящего контроль. ТК контроля разрабатывают в соответствии с действующими нормативными документами. ТК должна содержать информацию о схеме контроля, режимах контроля, аппаратуре, используемых в средствах и материалах.

Схему контроля следует выбирать таким образом, чтобы: во-первых, радиационная толщина (толщина объекта контроля в направлении центрального луча пучка излучения) должна быть минимальной; во-вторых, кассета с рентгеновской пленкой должна быть как можно ближе к объекту контроля. Расчет режимов контроля осуществляют в соответствии с ГОСТ 20426 и техническими характеристиками источников излучения.

Подготовка к контролю заключается в:

- разметке участков контроля и маркировке изделия в соответствии с ТК,
- зарядке кассет,
- точной установке схемы контроля (относительного расположения объекта контроля, источника излучения и кассеты с радиографической пленкой),
- экранирование объекта контроля,
- установке эталонов чувствительности,
- подготовке источника излучения к просвечиванию.

Разметку участков контроля проводят в соответствии с ТК, свинцовыми стрелками, буквами, цифрами или другими знаками с целью полной идентификации просвечиваемого участка и его радиографического снимка.

Схема контроля выполняется по ТК, фокусное расстояние (расстояние «источник-пленка») измеряют рулеткой, рейкой, линейкой с ценой деления 0,5 см).

Экранирование объекта контроля предназначено для его защиты от рассеянного излучения, которое снижает контраст и четкость радиографического снимка. При просвечивании изделий возникает прямое, боковое и обратно рассеянное излучение.

Прямое рассеянное излучение связано с образованием в объекте контроля вторичных комптоновских электронов. Снижение уровня прямого рассеянного излучения достигается выбором режима контроля, коллимированием пучка излучения, фильтрами, размещенными непосредственно у окна источника излучения, или расположенными между объектом контроля и кассетой с радиографической пленкой. Металлические экраны, заряженные в кассету с радиографической пленкой, так же как и фильтры снижает прямое рассеянное излучение; за счет фильтрации низкоэнергетических фотонов спектр излучения становится более однородным.

Устранение бокового рассеянного излучения осуществляют посредством масок, компенсаторов. Маски представляют собой листы свинца или другого материала с высоким коэффициентом ослабления излучения. Их располагают вокруг объекта контроля, устраняя боковую засветку радиографической пленки. За одну экспозицию можно просвечивать диапазон толщины, отличающийся от номинальной не более, чем на 20%. Если перепад толщины превышает 20%-й разброс, используют компенсаторы, специальные приспособления, выравнивающие толщину объекта контроля. В этом случае материал компенсатора должен быть таким же, что и материал объекта контроля. При контроле пустотелых изделий с переменной толщиной (например, литые охлаждаемые лопатки авиационных двигателей) используют жидкие или сыпучие компенсаторы, вводимые во внутреннюю полость изделия.

Обратно рассеянное излучение возникает за счет отраженного прямого излучения, которое подсвечивает пленку с обратной стороны, для его устранения применяют свинцовые экраны, расположенные с тыльной кассеты с пленкой.

Эталоны чувствительности располагают непосредственно на объекте контроля со стороны источника излучения, т.к. в этом случае выявляемость его элементов наилучшая. Если по условиям просвечивания эталон чувствительности нельзя расположить со стороны источника, его размещение под объектом контроля на пленке должно быть отмечено в ТК и свинцовым знаком «П».

Подготовка источника излучения при просвечивании в стационарных условиях заключается в проверке включения вентиляции и системы охлаждения. Если контроль проводят в условиях ангара, аэродрома, стапеля, трассы и т.п., проводят разметку и ограждение радиационной опасной зоны.

Просвечивание. Перед включением источника излучения следует убедиться, что выполнены требования радиационной и электробезопасности, только после этого можно включить источник излучения и вывести его на заданный режим экспонирования. По окончании экспозиции необходимо убедиться, что источник излучения выключен. Только после этого экспонированную пленку можно отправить в фотоканнату.

#### *Химико-фотографическая обработка экспонированной пленки*

Химико-фотографическая обработка экспонированной радиографической пленки включает следующие операции: проявление, промежуточная промывка, фиксирование, окончательная промывка, сушка.

От условий фотообработки зависит качество получаемого снимка: контрастность, зернистость, оптическая плотность вуали, чувствительность к излучению. Чтобы получить снимок высокого качества, необходимо тщательно соблюдать выполнение каждой операции.

Проявление. На этой стадии фотообработки происходит процесс восстановления экспонированных кристаллов бромистого серебра в металлическое.

Время, температуру проявления и состав проявителя, указанные фирмой-изготовителем, необходимо тщательно соблюдать.

Проявлять пленку необходимо в течение 6 мин. Уменьшение времени проявления влияет на положение характеристической кривой (она смещается вправо и становится положе), т.е. коэффициент контрастности и чувствительность пленки падают. Чрезмерно долгое пребывание пленки в проявителе (более 10 мин) приводит к ее вуалированию.

В 1 л свежеприготовленного проявителя можно проявить 1 м<sup>2</sup> радиографической пленки. Если проявитель истощен, время проявления следует увеличивать. Увеличение времени проявления более чем в 1,5 раза при номинальной температуре указывает на то, что проявитель пришел в негодность.

Оптимальная температура проявления - 18-20°C. Уменьшение температуры проявления снижает активность проявителя, которую можно компенсировать временем проявления (при 16°C время проявления = 1,3 от времени проявления при t=18°C). Высокая температура - более 22°C - может привести к повреждению эмульсионного слоя.

Состав проявляющего раствора содержит следующие компоненты:

1. Гидрохинон и метол - проявляющие вещества. Гидрохинон работает медленно, но контрастно, для ускорения получения изображения его применяют в смеси с быстро и мягко работающим метолом.
2. Сульфит натрия является противоокисляющим веществом, предохраняющим склонность органических веществ окисляться воздухом.



3. Бромистый калий - противувалирующая добавка.  
4. Сода и поташ - ускоряющие процесс проявления вещества. Если в проявляющем растворе отсутствует щелочная среда, процесс проявления идет очень медленно и быстро прекращается, т.к. раствор приобретает кислую реакцию вследствие образования бромистоводородной кислоты.

5. Растворитель всех веществ – вода (более 80% проявляющего раствора). Использование дистиллированной воды увеличивает срок хранения проявителя, однако, применение дистиллированной или мягкой воды может привести к размягчению желатина в эмульсионном слое, поэтому при растворении составляющих водопроводной водой используют "Трилон В" для поддержания нормального pH-состояния воды. Промежуточная промывка («стоп-ванна») необходима для предотвращения попадания проявителя в фиксирующий раствор. Для более эффективного удаления проявителя из эмульсионного слоя вместо воды иногда используют 2%-раствор уксусной кислоты.

Фиксирование предназначено для растворения непроявленных микрокристаллов бромистого серебра и упрочнения эмульсионного слоя пленки; при этом восстановленное в процессе проявления серебро не претерпевает изменений. Температура фиксирования должна быть в пределах 18-20 °С. Полное время фиксирования равно удвоенному времени проявления и составляет 10-15 мин. В течение этого времени пленка становится прозрачной (время исчезновения на пленке белых пятен называется временем осветления).

Состав фиксажа. Основная составляющая - тиосульфат натрия (гипосульфит). Кислая среда фиксирующего раствора предохраняет эмульсионный слой от температурного воздействия. Кроме этого, фиксаж содержит добавки, предотвращающие его от быстрого истощения.

Окончательная промывка сначала в непроточной, затем в проточной воде имеет продолжительность 25 мин. при температуре 18-20 °С.

Сушку проводят в течение 15-20 мин. в струе теплого воздуха в сушильном шкафу. Температура воздуха не должна превышать 35 °С. Необходимо следить за тем, чтобы во время сушки на пленку не попадала пыль.

*Расшифровка радиографических снимков и разбраковка изделий*

Расшифровку снимков проводят, используя негатоскоп и денситометр.

Негатоскоп – устройство со световым полем для просмотра радиографических снимков. Для просмотра снимок размещают на экране негатоскопа. Яркость светового поля должна быть равномерной по всей его площади. Пределы изменения яркости должны обеспечивать просмотр снимков разной оптической плотности. Негатоскоп должен быть снабжен шторками для изменения размеров светового поля для просмотра радиogramм разного размера. Нормальные условия просмотра снимков должны обеспечивать минимальный, еще воспринимаемый глазом, пороговый контраст оптической плотности ( $K_{пор} = \Delta S / S$ ). Известно, что  $K_{пор}$  мин  $\approx 0,02$  достигается в широком диапазоне яркостей фона  $30 \approx 10^3$  кд/м<sup>2</sup> (кандела на квадратный метр).

Таким образом, если необходимо просмотреть снимок с оптической плотностью  $S = 2$ , яркость экрана негатоскопа должна быть не менее 3000 кд/м<sup>2</sup>; для просмотра снимков с оптической плотностью  $S = 3$  яркость экрана негатоскопа должна быть не менее 30000 кд/м<sup>2</sup> и т.д.

Денситометр – прибор, измеряющий оптическую плотность снимка.

Процесс расшифровки начинают с определения пригодности радиографического снимка по следующим параметрам:

снимок не должен иметь пятен, царапин и других повреждений эмульсионного слоя, которые могли бы помешать расшифровке; на снимке должны быть изображения эталона чувствительности, ограничительных меток, маркировочных знаков, идентифицирующих радиogramму и контролируемый объект;

снимок должен удовлетворять требованиям по оптической плотности, которая, во-первых, в пределах его любого участка, подлежащего расшифровке, не должна быть ниже 1,5Б ( $S_{мин} \approx 1,5Б$ ), а, во-вторых, уменьшение оптической плотности изображения любого участка объекта контроля в пределах зоны расшифровки по сравнению с оптической плотностью изображения эталона чувствительности не должно превышать 1 ( $S_{эч} - S_{мин} \approx 1$ );

чувствительность контроля, определяемая по изображению эталона чувствительности должна быть не хуже той, что предусмотрена в карте контроля; при этом следует обратить внимание на маркировку эталонов чувствительности, т.к. по ней определяют его номер и материал, из которого он изготовлен.

После этого переходят непосредственно к расшифровке снимка, т.е. к определению дефектов, их типов, размеров и количества.

Снимок представляет собой радиографическое изображение проекции объекта контроля в направлении излучения в виде полей с разной оптической плотностью. Зонам объекта контроля с большей толщиной соответствует низкая оптическая плотность, зонам объекта контроля с меньшей толщиной соответствует более высокая оптическая плотность снимка. Аналогично, если материал объекта контроля изменяется по плотности, то места, где плотность материала высокая на радиографическом снимке будут более светлыми, по сравнению с участками с низкой плотностью материала. Изображения дефектов в виде несплошностей с низкой плотностью на снимке выглядят более темными участками. Если несплошность в объекте контроля представляет собой включение материала с более высокой плотностью, например, включение вольфрама или меди в сплавах на основе титана или алюминия, на радиографическом снимке выглядит как локальная область с пониженной оптической плотностью. Посредством радиационного метода контроля обнаруживают дефекты объемного характера, т.е. такие, у которых размеры во всех направлениях одного порядка. К ним относятся поры, раковины, шлаковые и другие включения, зоны с пористостью и микрорыхлотой и пр. поэтому за размеры дефекта принимают размеры его изображения на радиографическом снимке.

Разбраковка объектов контроля.

Оценку качества и разбраковку объектов по радиографическим снимкам проводят в соответствии с действующими нормативными документами. Заключение о качестве изделия дают по результатам расшифровки в зависимости от количества, размеров и типов обнаруженных дефектов. Составленное заключение регистрируют в специальном журнале, форма и срок хранения которого установлены стандартом предприятия, проводящего контроль.

*Производительность контроля*

Производительность радиографического контроля определяется затратами времени на каждую операцию контроля (подготовку к контролю, экспонирование; фотообработку, расшифровку; выдачу заключения).

Затраты времени на экспонирование определяют по специально разработанным номограммам экспозиции. Если контроль проводят в стационарных условиях с использованием мощных источников излучения и время экспозиции составляет 1-5 мин, то затраты на подготовку к экспонированию равны учетверенному времени экспозиции. При контроле в аэродромных и полевых условиях с использованием маломощных источников излучения время экспозиции обычно составляет 10-15 мин. В этом случае затраты на подготовку к экспонированию равны удвоенному времени экспозиции. Время, затраченное на фотообработку одной пленки при ручном проявлении – приблизительно 1 час. Расшифровка одной рентгенограммы с оформлением заключения требует 20 мин. Таковы исходные данные при расчете производительности радиографического контроля, для ее повышения используют разные методы, в том числе механизацию автоматизацию операций контроля. При химико-фотографической обработке – танки-баки, корзины, перемещающие устройства, или автоматы для фотообработки экспонированной пленки.

*Специальные методы радиографии*

К числу специальных методов радиографии относятся:

- электрорадиография;
- томография;
- нейтронная радиография;
- щелевая (динамическая) радиография;
- микрофокусная радиография;

Электрорадиография - метод контроля, при котором в качестве регистратора используют электрорадиографическую пластину, выполненную из алюминия с нанесенным на нее слоем аморфного селена. Под действием рентгеновского или гамма-излучения в аморфном селене, который в обычном состоянии - диэлектрик, возникает эффект электропроводности, причем проводимость селена становится тем выше, чем выше мощность экспозиционной дозы излучения. Это явление, используемое в электрорадиографии, называют фотопроводимостью.

Процесс электрорадиографии состоит из следующих этапов (рис. 3.18):

- зарядка;

- экспонирование;
- проявление;
- перенос;
- закрепление;
- очистка.

Все операции электрорадиографического контроля требуют специальных устройств, которые сосредоточены в одном устройстве, именуемом электрорадиографический аппарат.

Для зарядки пластины необходим коронный разрядник, с помощью которого на слой аморфного селена наносят положительные электростатические заряды. Зарядку проводят в специальном отсеке электрорадиографической установке, исключая попадание на нее света. После зарядки пластина представляет собой конденсатор с заземленной алюминиевой подложкой. Извлечение пластины из зарядного устройства осуществляют непосредственно в светонепроницаемую кассету. Заряженная пластина сенсibilизирована (очувствлена) к ионизирующему излучению. По степени сенсibilизации различают четыре типа пластин с чувствительностью (50-100) P-1; (100-160) P-1; (160-250) P-1; (250-400) P-1. Чувствительность к ионизирующему излучению определяют обратной величиной экспозиционной дозы (1/рентген –P-1), необходимой для спада рабочего потенциала пластины на 250 В.

Экспонирование. Схема контроля при экспонировании такая же как в радиографии, ее помещают непосредственно за объектом контроля так же как радиографическую пленку. Радиационное изображение, действуя на селеновый слой заряженной пластины, создает на нем скрытое электростатическое изображение: в тех местах, где доза излучения больше, проводимость селенового слоя выше и полученный пластиной заряд стекает на алюминиевую подложку. Полученный таким образом потенциальный рельеф содержит информацию об объекте контроля.

Проявление. Скрытое изображения электростатическое изображение преобразуют в оптическое напылением на селеновый слой отрицательно заряженных частиц мелкодисперсного графитового порошка тонера. Процесс проявления проходит в специальном светонепроницаемом отсеке электрорадиографической установки. Перед напылением экспонированную пластину извлекают из кассеты.

Перенос тонерного изображения на бумагу осуществляют наложением бумаги на селеновый слой с нанесенным на него тонером и подзарядки бумаги с противоположной стороны положительными электрическими зарядами в коронном разряде.

Закрепление. Тонерное изображение на бумаге помещают в камеру с парами ацетона и толуола. Под действием паров происходит оплавление частиц тонера и прилипание их к бумаге.

Очистка. Для повторного использования пластины ее очищают от тонера с помощью вращающихся маховых щеток, тампонов или замши.

По сравнению с обычной радиографией, электрорадиография более производительна: все вспомогательные операции выполняются за (1-2) мин. Время экспозиции по сравнению с радиографией в 2-3 раза меньше. Пластина может быть использована неоднократно до 2000 раз, что позволяет сократить расход дорогостоящей радиографической пленки. Однако чувствительность электрорадиографического контроля стальных изделий хуже.

Томография – послойная радиография («томос» – слой греч.). Томографию применяют в тех случаях, когда невозможно обнаружение дефектов простой радиографией. Для томографии используют специальные установки - томографы. Различают три типа томографии: продольная, поперечная и панорамная.

Продольную томографию выполняют с целью получения резкого изображения продольного слоя при контроле, например, клеевого соединения крупногабаритных панелей. Для этого в продольном томографе во время просвечивания объекта перемещают (вращают относительно точки «0») одновременно источник излучения последовательно в положения 1, 2, 3 и радиографическую пленку в положения 6, 7, 8 (рис. 3.19а). При таком вращении на пленке выделяется слой «а-о-в», т.к. для него проекции на пленке не смещаются. Проекция других точек, например, «с», получают параллактическое смещение, и их изображение на радиографическом снимке будет размыто.

Схема поперечной (аксиальной) томографии приведена на рис. 3.19б. Контролируемый объект, имеющий выраженную ориентацию вдоль продольной оси (вал, цилиндр, лопатка ГТД), размещают на вращающемся столе. На другом вращающемся столе размещают радиографическую пленку. Источник излучения установлен неподвижно на заданном фокусном расстоянии. При просвечивании столы приводят в синхронное вращение. При этом на пленке получают резкое изображение поперечного слоя «а-о-в», за счет того, что его проекция на пленку воспроизводится без смещения. Изображение всех остальных слоев получается размытым. Разновидностью поперечной томографии с обработкой результатов на ЭВМ и получением изображения на дисплее является рентгеновская вычислительная томография.

Если объект контроля имеет ось симметрии (сфера, цилиндр, конус и т.п.) применяют панорамную томографию, позволяющую получить объемное изображение объекта контроля. Изделие размещают на вращающемся столе, причем ось вращения совмещают с осью симметрии объекта контроля. Источник излучения должен иметь узкий (щелевой) пучок. При просвечивании объект контроля вращают, при этом радиографическая пленка перемещается вдоль оси. При этом на ней получается изображение развертки объекта контроля.

Томографические изображения выделяемого слоя всех типов томографии помимо внутренней нерезкости имеют дополнительно динамическую нерезкость, связанную с перемещением объекта контроля.

Нейтронная радиография

Область применения нейтронной радиографии:

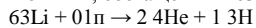
- контроль тяжелых материалов (свинец, вольфрам, уран, сталь большой толщины), т.к. ослабление нейтронов для таких материалов мало, в отличие от рентгеновского и гамма-излучения, а легкие элементы (водород, бор) и некоторые редкоземельные материалы (гадолиний, диспрозий) сильно ослабляют тепловые нейтроны;

- контроль тонких слоев водородосодержащих материалов, в том числе под слоем тяжелых материалов;

- контроль качества радиоактивных изделий, поскольку альфа-, бета- и гамма-излучения практически не регистрируются нейтронными преобразователями.

Существуют два основных метода нейтронной радиографии: метод прямого экспонирования и метод переноса.

Метод прямого экспонирования основан на использовании рентгеновской пленки и люминесцентных экранов. Люминофор ZnS в смеси с порошком LiF, обогащенным  $^6\text{Li}$  с нейтронами взаимодействует:



Возникающие в реакции альфа-частицы и ядра трития вызывают свечение ZnS, экспонируя радиографическую пленку.

Метод переноса основан на экспонировании нейтронами фольги из материала с большим сечением активации нейтронами. При этом фольга становится радиоактивной. Ее приводят в контакт с радиографической пленкой, на которой получают изображение.

*Микрофокусная радиография*

При микрофокусной радиографии получают увеличенное изображение объекта контроля. Источники излучения при микрофокусной радиографии имеют размеры фокусного пятна (2-100) мкм. Получить увеличенные изображения можно двумя способами: контактным и проекционным.

Контактный способ (рис. 3.20а) Объект контроля экспонируют микрофокусным источником с энергией (5-50) кэВ на особо мелкозернистую фототехническую пленку и фотографически увеличивают его в (300-500) раз, т.к. на такой пленке изображение не содержит внутренней нерезкости.

При проекционной микрорадиографии объект контроля размещают вблизи микрофокусного источника излучения, а пленку удаляют от него на относительно большое расстояние (рис. 3.20б), получая проекционное увеличение изображения в (15-50) раз. Микрорадиография позволяет воспроизвести детали изображения с размерами (0,5-1) мкм.

**РАДИОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ**

Согласно ГОСТ 24034 "Термины и определения" термин "радиоскопический метод неразрушающего контроля (радиационная интроскопия, радиоскопия)" определяют как метод радиационного неразрушающего контроля основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Под радиационно-оптическим преобразователем при радиоскопическом методе НК подразумевают:

- флуороскопические экраны;
- сцинтилляционные монокристаллы;
- рентгеновские электронно-оптические преобразователи;
- рентгеновидиконы.

Флуороскопические экраны представляют собой плоскую картонную подложку со слоем люминесцентного вещества, например, (Zn, Cd)S, Ag толщиной 85 мг/см<sup>2</sup>. Излучение, прошедшее через объект контроля, падает на экран со стороны подложки, создавая светотеневую картину проекции контролируемого изделия. Анализ изображения проводят со стороны светящегося слоя. Яркость свечения экрана в диапазоне энергий излучения (30 - 150) кэВ изменяется в пределах (10-3-10) кд/м<sup>2</sup>. В этом диапазоне острота зрения и чувствительность глаза к изменению яркости значительно хуже, чем при просмотре рентгенограмм в диапазоне яркости (30-100) кд/м<sup>2</sup>. Разрешающая способность экрана значительно ниже, чем радиографических пленок (≈3 лин/мм).

Сцинтилляционные монокристаллы представляют собой прозрачную пластину CsI(Tl) (80-200) мм; толщина пластины (3-5) мм. Попадание на нее фотонов рентгеновского излучения вызывает свечение, яркость свечения зависит от мощности экспозиционной дозы, что позволяет ее использовать для преобразования рентгеновского изображения в световое.

Рентгеновские электронно-оптические преобразователи (РЭОП) – это преобразователи и усилители яркости изображения (рис. 3.21) В стеклянной колбе, где создан вакуум 10-7 мм рт.ст., помещены входной и выходной экраны: входной экран представляет собой алюминиевую платину со слоем люминофора (Zn, Cd)S, Ag поверх люминофора нанесен сурьмяно-цезиевый фотокатод. Рентгеновское излучение, прошедшее сквозь объект контроля, попадает на алюминиевую подложку, вызывая свечение люминофора, световые фотоны воздействуют на фотокатод, выбивая из него фотоэлектроны. Последние попадают в ускоряющее поле, создаваемое проводящим слоем, нанесенным на внутреннюю поверхность (на проводящий слой подано напряжение 25 кВ). Ускоренные фотоэлектроны попадают в фокусирующее устройство и далее на выходной экран меньшего размера. Выходной экран представляет собой пластину с нанесенным на нее люминофором. Благодаря ускорению фотоэлектронов и маленькой площади выходного экрана (площадь выходного экрана в 100 раз меньше площади входного) яркость изображения на нем в несколько тысяч выше яркости изображения входного экрана.

Рентгеновидиконы Передающие телевизионные трубки представляют собой устройства, в которых светотеневое изображение преобразуется в электронный пучок, модулированный яркостью этого изображения (рис. 3.22). Рентгеновидикон представляет собой разновидность видикона (передающей телевизионной трубки), преобразующей радиационное изображение объекта контроля в электронное. По разрешающей способности и контрастной чувствительности рентгеновидикон как преобразователь превосходит РЭОП, однако, имеет малые размеры рабочего поля по сравнению с РЭОП, большую инерционность и ограниченность в диапазоне высоких энергий рентгеновского излучения.

#### *Радиоскопические системы*

Радиоскопические системы в производственных условиях могут быть реализованы лишь при наличии специализированных электромеханических устройств или манипуляторов с дистанционным управлением. Манипулятор должен обеспечивать механические перемещения относительно преобразователя и источника излучения.

Радиоскопические установки представляют собой различные комбинации преобразователей радиационного изображения в оптическое и телевизионной техники (рис. 3.23) В настоящее время в состав радиационно-оптических преобразователей и телевизионных устройств широко внедряют цифровые устройства. Комбинация всех перечисленных составляющих позволяет наиболее широко и полно реализовать резервы радиоскопов. Во многих случаях радиоскопия с точки зрения техники безопасности, так как выходной экран преобразователя может быть расположен на радиационно-безопасном расстоянии от источника.

#### *РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ*

Согласно ГОСТ 24034 "Термины и определения" радиометрический метод неразрушающего контроля определяют как метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на измерении одного или нескольких параметров ионизирующего излучения после его взаимодействия с контролируемым объектом.

Область применения:

- измерение толщины покрытий;
- измерение толщины объекта контроля;

Радиометрия использует самые разнообразные источники излучения: рентгеновские аппараты, радионуклидные источники, источники нейтронов и положительных ионов.

По физическому принципу получения информации о характеристиках объекта контроля радиометрический метод может быть основан на измерении параметров излучения прошедшего объект контроля и измерении параметров рассеянного излучения.

#### *Детекторы излучения*

Методы измерения ионизирующих излучений в радиометрии:

- ионизационный;
- сцинтилляционный;
- полупроводниковые детекторы;
- матричные детекторы.

Ионизационный метод радиометрии использует газоразрядные детекторы. Все они представляют собой один и тот же газоразрядный промежуток с разным значением приложенного к нему напряжения. В зависимости от величины приложенного напряжения область применения газоразрядных детекторов определяется следующим образом (рис. 3.24):

- ионизационная камера работает в режиме измерения тока, определяемого в основном интенсивностью излучения, поэтому применяется для измерения экспозиционных доз или мощности экспозиционных доз излучения;
- пропорциональный счетчик работает в импульсном режиме и его применяют в спектрометрии (для измерения энергии частиц), а также при регистрации излучения определенного типа на фоне излучения другого типа, отличающегося начальной ионизации;
- счетчик Гейгера-Мюллера работает в импульсном режиме и применяется для обнаружения излучения любого типа.

Сцинтилляционные счетчики (рис.3.25) состоят из прозрачного сцинтилляционного кристалла и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), находящихся в оптическом контакте. ФЭУ – стеклянная вакуумная колба; изнутри на ее торце нанесен фотокатод, на который подан отрицательный заряд; вдоль колбы расположены электроды (диноды); на противоположном торце расположен заземленный анод. Ионизирующее излучение вызывает сцинтилляции (вспышки) в кристалле, под действием которых из фотокатода выбиваются электроны. Последние направляются на анод последовательно попадая на первый, второй и т.д. диноды. Диноды выполнены из материала с высоким коэффициентом вторичной эмиссии, поэтому на каждом из них происходит умножение выбиваемых частиц. На нагрузке R<sub>3</sub> создается усиленный в (106 - 109) раз импульс напряжения, пропорциональный энергии излучения, затраченной на свечение кристалла.

Полупроводниковые детекторы представляют собой устройства, состоящие из приведенных в контакт двух полупроводников p- и n- типов. К полученному таким образом pn-переходу прикладывают обратное напряжение смещения (рис.3.26), тем самым удаляя электрические заряды вблизи pn-перехода. При прохождении через детектор фотона, заряженной частицы, или нейтрона вдоль их пути образуются дополнительные заряженные частицы, которые, двигаясь в приложенном электрическом поле создают на выходе импульс напряжения.

Матричные детекторы представляют собой матрицы изолированных друг от друга рентгеночувствительных детекторов разного типа, собранных в матрицу в большом количестве ( в зависимости от требуемой разрешающей способности детектора 256-1024)

#### *Устройства радиометрического контроля*

К устройствам радиометрического контроля относятся:

- радиометрические дефектоскопы

- толщиномеры изделий
- толщиномеры покрытий

Радиометрический дефектоскоп (рис.3.27) содержит источник излучения, коллиматор, детектор, сканирующее устройство, с помощью которого осуществляют перемещение объекта контроля и коллиматора относительно источника излучения. Если объект контроля содержит дефект, то при попадании его в пучок излучения, детектор зафиксирует дозу излучения, отличную от дозы, соответствующей бездефектному участку объекта контроля. Для повышения точности измерения используют дифференциальную схему регистрации дефектов. В случае дефекта на выходе детектора появится сигнал, отличный от нуля.

Толщиномеры изделий.

Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения, прошедшего объект контроля, по закону ослабления:  $P=P_0e^{-\mu d}$  содержит информацию о его толщине. Это свойство использовано для измерения толщины. Сигнал на выходе детектора проградуирован в единицах толщины. Толщиномеры могут быть с двух- и одностороннем доступе к объекту контроля (рис.3.28). При одностороннем доступе к объекту контроля детектор регистрирует обратно-рассеянное излучение, или бета-излучение. По интенсивности рассеянного излучения судят о толщине объекта контроля.

Толщиномеры покрытий.

Возможность измерения рассеянного излучения при одностороннем доступе к объекту контроля используется для измерения толщины покрытия на изделии (рис.3.29а). Обычно толщина покрытия меньше, чем толщина самого изделия и излучение рассеивается в обратном направлении и материалом покрытия и материалом изделия. Интенсивность рассеянного излучения от материала зависит от его атомного номера  $Z$  (пропорциональна  $Z^p$ , где  $p$  – показатель степени). Таким образом, толщина измеряемого покрытия зависит от соотношения атомных номеров материала покрытия  $Z_1$  и материала изделия  $Z_2$ .

### 4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Измерение микротвёрдости поверхностного слоя металлов и сплавов	8	-
2	2.	Постановка эксперимента и исследования зависимости износостойкости от режимов обработки	8	-
3	2.	Постановка эксперимента и исследования зависимости шероховатости от режимов обработки	9	-
4	3.	Методы визуально измерительного контроля качества изделия	8	-
5	3.	Методы исследования качества изделий проникающими веществами	9	-
6	3.	Ультразвуковые методы исследования качества изделий	9	-
<b>ИТОГО</b>			<b>51</b>	-

### 4.4. Семинары/практические занятия

Учебным планом не предусмотрено

### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ  
В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Σ комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub>, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ПК</i>				
		18				
<b>1.</b> Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве	33	+	1	33	Лк, СР	Экзамен
<b>2.</b> Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала	58	+	1	58	Лк, ЛР, СР	Экзамен
<b>3.</b> Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов	62	+	1	62	Лк, ЛР, СР	Экзамен
<b><i>всего часов</i></b>	<b>153</b>	<b>153</b>	<b>1</b>	<b>153</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие для вузов / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.
2. Быков, С.Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С. Ю. Быков, С.А. Схиртладзе . - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 136 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование издания	Вид занятия	Кол-во экз. в библи., шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
<b>Основная литература</b>				
1.	Сапунов, С.В. Материаловедение. [Электронный ресурс]: Учебные пособия - Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2015. 208 с. - Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/56171">http://e.lanbook.com/book/56171</a>	Лк, ЛР	ЭР	1
2.	Зубарев, Ю.М. Современные инструментальные материалы. [Электронный ресурс] : Учебники - Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2014. - 304 с. - Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/595">http://e.lanbook.com/book/595</a>	Лк, СР	ЭР	1
3.	Пасютина, О.В. Материаловедение : учебное пособие / О.В. Пасютина. - Минск : РИПО, 2018. - 276 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 233-236 - ISBN 978-985-503-790-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=497495">http://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=497495</a>	Лк, ЛР, СР	ЭР	1
<b>Дополнительная литература</b>				
4.	Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие для вузов / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.	Лк, ЛР, СР	5	0,5
5.	Быков, С. Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С. Ю. Быков, С. А. Схиртладзе . - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 136 с. – ISBN 978-5-94178-2 13-0	Лк, ЛР, СР	13	1

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ [http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ <http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань» <http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Рекомендуемый режим и характер учебной работы по проработке лекционного материала заключается в ознакомлении основными характеристиками металлов и сплавов и методами их исследования.

При оформлении отчётов по лабораторным работам и практическим занятиям следует особое внимание обращать на профессиональное использование современных методов исследования металлов и сплавов.

Желательно обладать навыками применения современных методов исследования. Следует использовать научные результаты и известные научные методы и способы для решения новых научных и технических проблем, проблемно-ориентированные методы анализа, синтеза и оптимизации конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств.

### 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

#### Лабораторная работа №1

##### Измерение микротвёрдости поверхностного слоя металлов и сплавов

###### Цель работы:

Освоение навыков определения и расчета микротвердости поверхностного слоя металлов и сплавов

###### Задание:

1. Произвести измерение микротвердости поверхностного слоя на разной глубине.
2. Построить зависимость микротвердости металла от содержания глубины.

###### Порядок выполнения:

- подготовить образец сечения поверхностного слоя изделия для исследования микротвердости (ГОСТ 9012-59);
- выбрать условия для проведения испытания микротвердости (величина нагрузки и время воздействия);
- получить и измерить отпечатки на подготовленном образце;
- определить число микротвердости и занести результаты в протокол измерения.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, описание методики проведения экспериментальных исследований, результаты экспериментальных исследований, список использованных источников.

###### Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с основными понятиями твердости и микротвердости поверхностного слоя металлов и сплавов.

2. Определить методику проведения экспериментальных исследований влияния микротвердости поверхностного слоя металлов и сплавов.

###### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

###### Основная литература

1. Пасютина, О.В. Материаловедение : учебное пособие / О.В. Пасютина. - Минск : РИПО, 2018. - 276 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 233-236 - ISBN 978-985-503-790-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497495>

###### Дополнительная литература

2. Быков, С. Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С. Ю. Быков, С. А. Схиртладзе. - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 136 с. – ISBN 978-5-94178-2 13-0

###### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Методы измерения твердости.
2. Приборы и оборудование для измерения микротвердости металлов и сплавов.

#### Лабораторная работа №2

##### Постановка эксперимента и исследования зависимости износостойкости от режимов обработки

###### Цель работы:

Изучить и апробировать методику исследования износостойкости инструментального материала в зависимости от режимов обработки.

###### Задание:

1. Провести экспериментальные исследования влияния параметров механической обработки на износостойкость инструментального материала.

2. Произвести обработку полученных экспериментальных данных

###### Порядок выполнения:

- определить номенклатуру и величину параметров механической обработки влияющих на износостойкость инструментального материала;
- получить экспериментальные данные исследования влияния параметров механической обработки на износостойкость инструментального материала;
- обработать полученные экспериментальные данные;
- построить графические зависимости полученных экспериментальных данных.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, описание методики проведения экспериментальных исследований, результаты экспериментальных исследований, список использованных источников.

###### Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с основными процессами изнашивания инструментального материала.

2. Определить методику проведения экспериментальных исследований влияния параметров механической обработки на износостойкость инструментального материала.

###### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

###### Основная литература

1. Пасютина, О.В. Материаловедение : учебное пособие / О.В. Пасютина. - Минск : РИПО, 2018. - 276 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 233-236 - ISBN 978-985-503-790-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497495>

###### Дополнительная литература

2. Быков, С. Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С. Ю. Быков, С. А. Схиртладзе. - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 136 с. – ISBN 978-5-94178-2 13-0



#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Методы определения контактных температур.
2. Зоны теплообразования при механической обработке металлов.

### **Лабораторная работа №3**

#### **Постановка эксперимента и исследования зависимости шероховатости от режимов обработки**

##### Цель работы:

Изучить и апробировать методику исследования шероховатости обработанной поверхности в зависимости от режимов обработки.

##### Задание:

1. Провести экспериментальные исследования влияния параметров механической обработки на шероховатость обработанной поверхности.
2. Произвести обработку полученных экспериментальных данных

##### Порядок выполнения:

- определить номенклатуру и величину параметров механической обработки влияющих на шероховатость обработанной поверхности;
- получить экспериментальные данные исследования влияния параметров механической обработки на шероховатость обработанной поверхности;
- обработать полученные экспериментальные данные;
- построить графические зависимости полученных экспериментальных данных.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, описание методики проведения экспериментальных исследований, результаты экспериментальных исследований, список использованных источников.

##### Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с основными параметрами поверхностного слоя изделия.
2. Определить методику проведения экспериментальных исследований влияния параметров механической обработки на шероховатость обработанной поверхности.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

##### Основная литература

1. Пасютина, О.В. Материаловедение : учебное пособие / О.В. Пасютина. - Минск : РИПО, 2018. - 276 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 233-236 - ISBN 978-985-503-790-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497495>

##### Дополнительная литература

2. Быков, С. Ю. Испытания материалов : учеб. пособие для вузов / С. Ю. Быков, С. А. Схиртладзе. - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 136 с. – ISBN 978-5-94178-2 13-0

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Основные показатели качества поверхностного слоя изделий.
2. Методика определения шероховатости. Приборы и оборудование.

### **Лабораторная работа №4**

#### **Методы визуально измерительного контроля качества изделия**

##### Цель работы:

Освоить методику проведения визуального и измерительного контроля изделий машиностроительного производства.

##### Задание:

1. Ознакомиться с основными особенностями визуального и измерительного контроля металлов и сплавов.
2. Определить номенклатуру и допустимую величину дефектов.
3. Произвести визуальный и измерительный контроль образца.
4. Оформить отчёт по практическому занятию.

##### Порядок выполнения:

- ознакомиться с основными терминами и понятиями визуального и измерительного контроля;
- ознакомиться с методами и средствами проведения визуального и измерительного контроля;
- подготовить образец для визуального и измерительного контроля;
- составить дефектограмму по результатам визуального и измерительного контроля.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, матрица проведения экспериментальных исследований и метод расчета коэффициентов функции, список использованных источников.

##### Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с основными методами проведения визуального и измерительного контроля.
2. Изучить приборы и оборудование необходимые для проведения визуального и измерительного контроля.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

##### Основная литература

1. Сапунов, С.В. Материаловедение. [Электронный ресурс]: Учебные пособия – Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2015. - 208 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/56171> — Загл. с экрана.

##### Дополнительная литература

2. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие для вузов / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дефекты выявляемые при визуальном и измерительном исследовании металлов и сплавов.
2. Приборы и оборудование необходимое для визуальных и измерительных исследований металлов и сплавов.

### **Лабораторная работа №5**

#### **Методы исследования качества изделий проникающими веществами**

##### Цель работы:

Освоить методику исследования качества изделий проникающими веществами.

##### Задание:

1. Ознакомиться с основными исследования качества изделий проникающими веществами.
2. Определить номенклатуру и допустимую величину выявляемых дефектов.
3. Произвести исследования качества образца проникающими веществами.
4. Оформить отчёт по практическому занятию.

Порядок выполнения:

- ознакомиться с основными терминами и понятиями капиллярного метода исследования металлов и сплавов;
  - ознакомиться с методами и средствами проведения исследования качества изделий проникающими веществами;
  - подготовить образец для проведения капиллярного контроля качества;
  - составить дефектограмму по результатам исследования качеств проникающими веществами.
- Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, матрица проведения экспериментальных исследований и метод расчета коэффициентов функции, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с физическими основами капиллярного метода исследования.
2. Изучить материалы и инструменты необходимые для проведения исследования капиллярными методами.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Основная литература

1. Сапунов, С.В. Материаловедение. [Электронный ресурс]: Учебные пособия – Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2015. - 208 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/56171> — Загл. с экрана.

Дополнительная литература

2. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие для вузов / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дефекты выявляемые при капиллярном методе исследования.
2. Материалы и оборудование необходимое для капиллярного контроля качества изделий.

### **Лабораторная работа №6**

#### **Ультразвуковые методы исследования качества изделий**

Цель работы: Освоить методику исследования качества изделий ультразвуковыми методами.

Задание:

1. Ознакомиться с основными методами исследования качества изделий ультразвуковыми методами.
2. Определить номенклатуру и допустимую величину выявляемых дефектов.
3. Произвести исследования качества образца ультразвуковыми методами.
4. Оформить отчёт по практическому занятию.

Порядок выполнения:

- ознакомиться с основными терминами и понятиями связанными с ультразвуковыми методами исследования металлов и сплавов;
  - ознакомиться с методами и средствами проведения исследования качества изделий ультразвуковыми методами;
  - подготовить образец для проведения ультразвукового контроля качества;
  - составить дефектограмму по результатам исследования качества ультразвуковыми методами.
- Форма отчётности: отчёт по лабораторным работам должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, матрица проведения экспериментальных исследований и метод расчета коэффициентов функции, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:

1. Ознакомиться с физическими основами ультразвуковыми методами исследования.
2. Изучить материалы и инструменты необходимые для проведения исследования ультразвуковыми методами.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Основная литература

1. Сапунов, С.В. Материаловедение. [Электронный ресурс]: Учебные пособия – Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2015. - 208 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/56171> — Загл. с экрана.

Дополнительная литература

2. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие для вузов / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дефекты выявляемые при ультразвуковом контроле качества изделий.
2. Материалы и оборудование необходимое для проведения ультразвукового контроля качества.

## **9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата**

Учебным планом не предусмотрено.

## 10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникативные технологии (ИКТ) используются для:

- получения информации при подготовке к занятиям;
- создания презентационного сопровождения занятий;
- работы в электронной информационной среде.

Стандартное лицензионное программное обеспечение:

1. Microsoft Imagine Premium: Microsoft Windows Professional 7.
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level.
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.
4. Adobe Reader.

## 11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ Лк, ЛР, ПЗ</i>
Лк	Лекционная / семинарская аудитория	Учебная мебель	-
ЛР	Лаборатория Технологии машиностроения	Учебная мебель; Токарно-винторезный станок 1К62; Горизонтально-фрезерный станок 6Р82Г; Плоскошлифовальный станок 3Е711В.	ЛР № 1...6
	Лаборатория технических средств измерения	Учебная мебель; Профилограф-профилометр "Абрис-ПМ7"; Многофункциональный электронный программируемый универсальный переносной твердомер ТЭМП-2у; Микроскопы МБС-10, ММУ-3, ИМЦЛ.	
СР	Читальный зал № 1	Учебная мебель; 10-ПК i5-2500/Н67/4Gb (мониторTFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-18	<p>способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.</p>	<p><b>1. Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве.</b></p>	<p>1.1. Свойства материалов, применяемых в машиностроении и инструментальном производстве. 1.2. Классификация материалов, их эксплуатационные свойства, область применения. 1.3. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам.</p>	Экзаменационные вопросы
		<p><b>2. Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала.</b></p>	<p>2.1. Определение механических свойств металлов и сплавов. 2.2. Определение физических, химических, технологических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов. 2.3. Исследование поверхностного слоя металлов и сплавов.</p>	
		<p><b>3. Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов.</b></p>	<p>3.1. Визуальные и измерительные методы исследования металлов и сплавов. 3.2. Магнитные методы исследования металлов и сплавов. 3.3. Исследование металлов и сплавов проникающими веществами. 3.4. Ультразвуковые методы исследования металлов и сплавов. 3.5. Радиационные методы исследования металлов и сплавов.</p>	

## 2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1.	ПК-18	способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.	1.1. Свойства конструкционных материалов используемых в машиностроении.	1. Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве.
			1.2. Свойства инструментальных материалов используемых в машиностроении	
			2.1. Методы исследования механических свойств металлов и сплавов.	2. Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала.
			2.2. Методы исследования физических свойств металлов и сплавов.	
			2.3. Методы исследования химических свойств металлов и сплавов.	
			2.4. Методы исследования эксплуатационных металлов и сплавов.	
			2.5. Методы исследования технологических свойств металлов и сплавов.	
			2.6. Методы исследования поверхностного слоя изделий	
			3.1. Дефекты выявляемые неразрушающими методами исследования	3. Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов
			3.2. Визуальные и измерительные методы исследования металлов и сплавов	
			3.3. Магнитные методы исследования металлов и сплавов	
			3.4. Капиллярные методы исследования металлов и сплавов	
			3.5. Ультразвуковые методы исследования металлов и сплавов	
			3.6. Радиографические методы исследования металлов и сплавов	

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>знать:</b> ПК-18 – программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий;</p> <p><b>уметь:</b> ПК-18 – разрабатывать программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления;</p> <p><b>владеть:</b> ПК-18 – навыками осуществления метрологической поверки средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.</p>	<b>отлично</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- даны исчерпывающие и обоснованные ответы на все поставленные вопросы;</li> <li>- ответы изложены грамотно, уверенно, логично, последовательно;</li> <li>- опираясь на усвоенные знания, четко увязывает научные положения с практической деятельностью;</li> <li>- свободно владеет основными понятиями дисциплины.</li> </ul>
	<b>хорошо</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- даны полные, достаточно обоснованные ответы на поставленные вопросы;</li> <li>- твердо усвоил тему, грамотно и по существу излагает ее, опираясь на полученные знания;</li> <li>- не допускает существенных неточностей;</li> <li>- увязывает усвоенные знания с практической деятельностью;</li> <li>- владеет системой основных понятий дисциплины.</li> </ul>
	<b>удовлетворительно</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- даны в основном правильные ответы на все поставленные вопросы, но без достаточного обоснования;</li> <li>- допускает несущественные ошибки и неточности;</li> <li>- испытывает затруднения в практическом применении полученных знаний;</li> <li>- слабо аргументирует научные положения;</li> <li>- частично владеет системой основных понятий дисциплины.</li> </ul>
	<b>не удовлетворительно</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- допускает существенные ошибки и неточности при ответе на поставленные вопросы;</li> <li>- испытывает трудности в практическом применении полученных знаний;</li> <li>- не может аргументировать научные положения;</li> <li>- не владеет системой основных понятий дисциплины.</li> </ul>

### 4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Физические методы исследования металлов и сплавов направлена на создание новых и применение существующих методов исследования качества металлов и сплавов, систем и средств физических методов исследования, включающих изучение научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в области контроля качества изделий; на получение теоретических знаний и практических навыков для решения новых научных и технических проблем для их дальнейшего использования в практической деятельности.

Изучение дисциплины Физические методы исследования металлов и сплавов предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- самостоятельную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве Обучающиеся должны изучить основные конструкционные и инструментальные материалы применяемые в машиностроении.

В ходе освоения раздела 2 Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала обучающиеся должны изучить основные свойства конструкционных и инструментальных материалов. Изучить методы изучения этих свойств.

В ходе освоения раздела 3 Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов обучающиеся должны знать существующие методы исследования без разрушения основного

материала изделия, научиться определить дефекты, выявляемые данными методами исследования. Изучить необходимое оборудование и приборы для проведения неразрушающего контроля изделий.

Необходимо овладеть навыками и умениями применения полученных знаний для подготовки и проведения организационной работы в области контроля качества металлов, применения и реализации тех или иных методов исследования металлов в конкретных ситуациях.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется обратить внимание на научные проблемы в области исследования качества изделий машиностроительного производства.

Овладение ключевыми понятиями является необходимым для корректного оперирования общепринятыми терминами научного сообщества при подготовке выпускной квалификационной работы.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить вопросам, связанным с применением методов обнаружения дефектов в машиностроительных изделиях из металлов и сплавов.

В процессе проведения лабораторных работ, практических занятий, происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о современных методах проведения исследования состояния металлов и сплавов.

Самостоятельную работу необходимо начинать с ознакомления с основными понятиями в области контроля качества изделий машиностроения; определения основных задач, решаемых при исследовании состояния металлов и сплавов на различных этапах производства.

В процессе консультации с преподавателем обсуждаются и согласовываются полученные результаты, уточняются и корректируются отчёты по лабораторным, практическим работам и научные статьи по результатам исследований.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной, активной, инновационной формах с дискуссией в сочетании с внеаудиторной работой.



**АННОТАЦИЯ**  
**рабочей программы дисциплины**  
**Физические методы исследования металлов и сплавов**

**1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является – формирование у обучающихся профессиональных знаний и навыков, необходимых для дальнейшей работы по специальности, а также привлечь их к научному исследованию различных проблем, связанных с инструментальными материалами. Ознакомиться с методиками исследования структуры свойств и качества металлов и сплавов.

Задачами изучения дисциплины является:

- развитие способности участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.

**2. Структура дисциплины**

2.1. Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекции – 17 часов; лабораторные работы – 51 час; самостоятельная работа – 85 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 180 часов, 5 зачетных единиц.

2.2. Основные разделы дисциплины:

1. Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве.
2. Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала.
3. Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов.

**3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-18 – способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.

**4. Вид промежуточной аттестации:** Экзамен.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей  
программе на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

---

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

---

---

Протокол заседания кафедры ТМ № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.,

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО  
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-18	способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.	1. Материалы, применяемые в машиностроении и инструментальном производстве.	1.1. Свойства материалов, применяемых в машиностроении и инструментальном производстве.	Конспект лекций
			1.2. Классификация материалов, их эксплуатационные свойства, область применения.	Конспект лекций
			1.3. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам.	Конспект лекций
		2. Методы исследования металлов и сплавов с разрушением основного материала.	2.1. Определение механических свойств металлов и сплавов.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №1
			2.2. Определение физических, химических, технологических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №2
			2.3. Исследование поверхностного слоя металлов и сплавов.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №3
		3. Неразрушающие методы исследования металлов и сплавов.	3.1. Визуальные и измерительные методы исследования металлов и сплавов.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №4
			3.2. Магнитные методы исследования металлов и сплавов.	Конспект лекций
			3.3. Исследование металлов и сплавов проникающими веществами.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №5
			3.4. Ультразвуковые методы исследования металлов и сплавов.	Конспект лекций; Отчет по ЛР №6
			3.5. Радиационные методы исследования металлов и сплавов.	Конспект лекций

**2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций**

Показатели	Оценка	Критерии
<b>знать:</b> ПК-18 – программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий; <b>уметь:</b> ПК-18 – разрабатывать программы и методики контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления; <b>владеть:</b> ПК-18 – навыками осуществления метрологической поверки средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.	<b>зачтено</b>	- даны исчерпывающие и обоснованные ответы на все поставленные вопросы; - ответы изложены грамотно, уверенно, логично, последовательно; - опираясь на усвоенные знания, четко увязывает научные положения с практической деятельностью; - свободно владеет основными понятиями дисциплины.
	<b>не зачтено</b>	- допускает существенные ошибки и неточности при ответе на поставленные вопросы; - испытывает трудности в практическом применении полученных знаний; - не может аргументировать научные положения; - не владеет системой основных понятий дисциплины.