

Министерство общего образования Российской Федерации  
Владимирский государственный университет  
Кафедра литейных процессов и конструкционных материалов

**МАКРОСТРУКТУРНЫЙ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ  
АНАЛИЗЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Составитель:  
Л.В.Картонова

Владимир 2003

УДК 620.22

Рецензент  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры литейных процессов и конструкционных материалов  
Владимирского государственного университета  
Н.А.Елгаев

Макроструктурный и микроструктурный анализ/ Владим. гос. ун-т; Сост.:  
Л.В.Картонова. Владимир.- 20 с.

Содержит изложение двух разделов дисциплины «Материаловедение»,  
подлежащих изучению студентами машиностроительных специальностей.  
Разработано для студентов-инвалидов по слуху специальности 210200  
«Автоматизация технологических процессов и производств», может быть  
использовано студентами других машиностроительных специальностей.

Библиогр.: 6 назв.

УДК 620.22

# 1. Макроструктурный анализ и дефектоскопия металлов

## 1.1. Назначение макроструктурного анализа

Макроскопический анализ заключается в определении строения металла (макростроения) невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях (до 30 раз). Макроанализ в отличие от микроструктурного анализа не позволяет определить всех особенностей строения. По этой причине макроанализа является не окончательным, а лишь предварительным исследованием.

Макроскопическому исследованию могут быть подвергнуты различного рода объекты. Основные из них: поверхность не разрушенного изделия, изломы, макрошлифы нетравленные или с выявленной специальными реактивами структурой. Макрошлифом называют шлифованный и травленный образец.

*Макроскопический анализ* применяют для выявления:

- вида излома (вязкий, хрупкий, смешанный, усталостный, нафталинистый и т.д.);
- нарушения сплошности металла (усадочная рыхлость, пористость, трещины, флокены, дефекты сварки и т.д.);
- дендритного строения литого металла;
- химической неоднородности литого металла (ликвацию) и присутствия в нем грубых включений;
- волокнистой структуры деформированного металла;
- структурной и химической неоднородности металла, созданной термической, термомеханической или химико-термической обработкой.

## 1. 2. Макроанализ изломов металлов.

По характеру разрушения различают два основных вида изломов – *хрупкий и вязкий*, также *смешанный* [1], в котором есть области вязкого и хрупкого разрушения. *Вязкий излом* имеет обычно матовый волокнистый вид, тогда как *хрупкий* – кристаллический блестящий, так как разрушение металла в этом случае развивается по определенным кристаллографическим плоскостям скола. Появление вязкого излома менее опасно для службы изделия, так как отличается существенно большей энергоемкостью по сравнению с хрупким.

В некоторых случаях в изломе стальных изделий больших сечений, особенно из легированной стали, видны белые пятна - *флокены*, которые появляются при повышенном содержании водорода.

Специфический излом имеет излом металлов, полученный в результате многократного нагружения под действием повторно-переменных (циклических) напряжений, называемый *усталостным изломом*.

*Усталостный излом* состоит из очага разрушения - места зарождения (очага) разрушения, зоны стабильного развития трещины (зоны усталости) и зоны долома – участка развития трещины, связанного с окончательным разрушением [4]. Очаг разрушения обычно находится вблизи поверхности. В зоне усталости часто можно рассмотреть полосы, расходящиеся от очага разрушения - усталостные бороздки, отражающие последовательное положение растущей трещины. Скорость роста трещины невелика. Рост трещины продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. При этом происходит быстрое разрушение, что и приводит к образованию зоны долома. Зона долома имеет структуру, характерную для хрупкого и вязкого разрушения в зависимости от природы материала.

При неудовлетворительном отжиге быстрорежущей стали, в процессе последующей закалке возможен брак стали вследствие образования *нафталинистого излома* [4]. Данный излом крупнозернистый, чешуйчатый, похожий на нафталин. Сталь с таким изломом обладает высокой хрупкостью.

Расширенная классификация видов излома представлена в справочном издании Л.П.Герасимовой [2].

### **1.3. Макроанализ шлифов**

Применение какого либо способа макроанализа шлифа зависит от поставленной задачи. Для определения дефектов, нарушающих сплошность стали, применяют реактивы глубокого и поверхностного травления.

*Реактивы глубокого травления* используют главным образом для макроанализа слитков (отливок) и проката (поковок). Их обычно используют для определения флокенов, в также трещин, рыхлости и пор, не выходящих непосредственно на поверхность металла.

*Реактивы поверхностного травления* хорошо выявляют сравнительно крупную пористость и другие дефекты несплошности, находящиеся на поверхности.

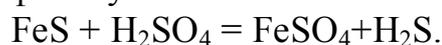
В таблице 1 представлены составы некоторых реактивов и режимов травления макрошлифов [1].

Таблица 1

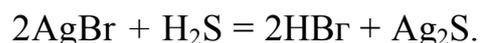
*Реактивы и режимы травления макрошлифов*

Сплавы	Состав реактива и режим травления	Примечание
<b>Для глубокого травления стали</b>		
Стали всех составов	Соляная кислота 100 мл, вода 100 мл; $t = 60 - 80^{\circ}\text{C}$ ; $\tau = 5 - 45$ мин	Для получения светлой поверхности после травления шлифов их промывают водой; а затем 10-15%-ным раствором азотной кислоты и просушивают
	Соляная кислота 100 мл, $\text{HNO}_3$ 10 мл (или 100 мл), вода 100 мл; $t = 60 - 70^{\circ}\text{C}$ ; $\tau = 5 - 10$ мин	
<b>Для поверхностного травления стали</b>		
Стали всех составов	Реактив Гейне: $\text{HN}_4\text{Cl}$ 53 г, $\text{CuCl}_2$ 85 г, вода 1000 мл; $t = 20^{\circ}\text{C}$ ; $\tau = 0,5 - 1$ мин	Осевший при травлении вследствие обменной реакции слой меди, пористый на участках с дефектами, удаляют ватой под струей воды. Более сильно растравлены дефектные места
	Метод Баумана: бромсеребряная бумага, смоченная 2-5%-ным раствором $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; $t = 20^{\circ}\text{C}$ ; $\tau = 3 - 14$ мин	

Для определения *ликвации серы* используют метод отпечатков (*метод Баумана*). Для этого на хорошо подготовленную поверхность накладывают фотографическую (бромосеребряную) бумагу, предварительно смоченную в течение 5 - 10 минут в 5%-ном растворе серной кислоты, и выдерживают 5-10 минут. На тех участках поверхности металла, на которых имеются скопления сернистых соединений (сульфидов), происходит реакция между ними и серной кислотой, оставшейся на фотобумаге:



Сероводород, образующийся непосредственно против очагов своего выделения, воздействует на кристаллики бромистого серебра фотоземлюсии, поэтому на этих участках происходит дальнейшая реакция:



Сернистое серебро имеет темный цвет, поэтому образующиеся на фотобумаге темные участки указывают форму и характер распределения включений сульфидов в исследуемой стали (или чугуне). Снятую с макрошлифа фотобумагу промывают в воде, фиксируют 3 минуты в растворе гипосульфита, после чего снова промывают и сушат.

При выполнении *макроанализа сварного соединения* стальных

изделий используют реактив для поверхностного травления (реактив Гейне). 10%-ный водный раствор двойной соли хлорной меди и аммония окрашивает в стали и железе места, богатые фосфором, углеродом и серой в темный цвет, при этом выявляется также и пористость. Образец исследуемого металла шлифованной поверхностью погружают в реактив на 1 минуту, затем осевшую на поверхность медь осторожно снимают ваткой, после чего образец просушивают фильтровальной бумагой. Дефектные участки растравливаются в большей степени.

#### 1.4. Дефектоскопия металлов

Существующие технологические процессы в металлургии и металлообработке таковы, что в получаемых металлах могут образовываться опасные различные дефекты (трещины, раковины, посторонние включения, рыхлости и др.).

Для контроля качества металла с целью выявления дефектов без разрушения целостности изделия разработаны различные *методы дефектоскопии*:

1. *Для обнаружения поверхностных дефектов* – магнитный, электромагнитный, капиллярный, люминесцентный;

2. *Для обнаружения внутренних дефектов* – ультразвуковой, радиационный (гамма – дефектоскопия), рентгеновский методы, которые позволяют не только обнаружить наличие дефектов, но и установить их форму и размеры.

**Магнитная и электромагнитная дефектоскопия** применяется для обнаружения дефектов с помощью ферромагнитных порошков и суспензий (магнитная порошковая дефектоскопия) или электромагнитных и электронных приборов.

Сущность *магнитного метода* заключается в следующем. Деталь намагничивается в специальном приборе – магнитном дефектоскопе (рис.1).

При наличии в детали дефекта возникающий магнитный поток рассеивается в месте расположения дефекта и выходит на поверхность (рис.2). Затем намагниченную деталь покрывают магнитным порошком окиси железа (сухой метод) или поливают жидкостью (суспензией), состоящей из порошка окиси железа и керосина, или деталь погружают в суспензию (мокрый метод). Порошок окиси железа притягивается вышедшим на поверхность магнитным потоком, т.е. в тех местах, где есть дефект; в результате ранее невидимый дефект становится хорошо заметным.

Магнитной порошковой дефектоскопией подвергают исключительно ферромагнитные сплавы. Этим методом выявляют мелкие трещины, раковины и другие дефекты, расположенные на поверхности детали или залегающие на небольшой глубине (не более 2-3 мм.).

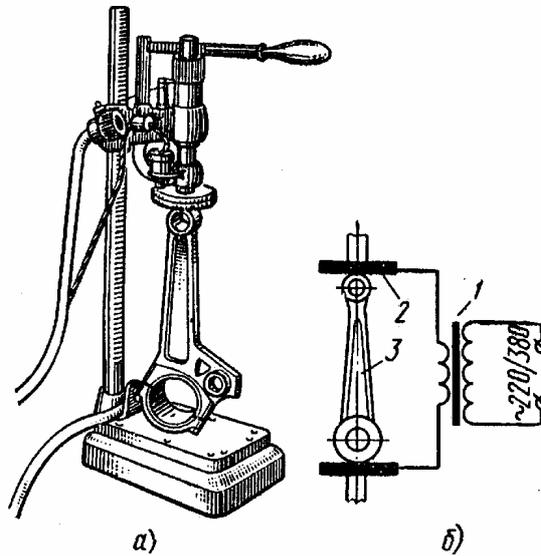


Рис.1. Магнитный дефектоскоп:  
 а – внешний вид;  
 б – схема: 1 – трансформатор;  
 2 – контакты;  
 3 – намагничиваемая деталь.

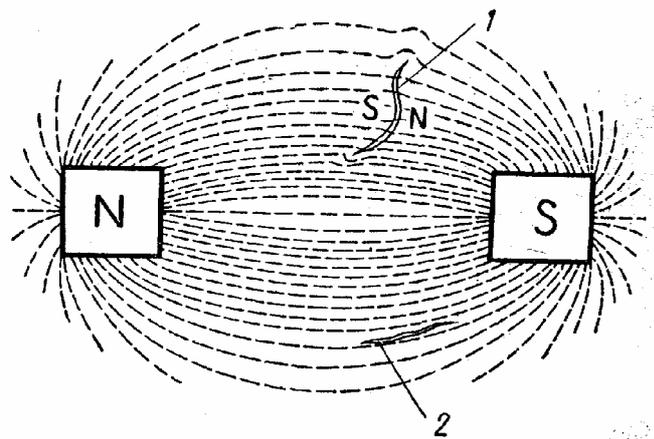


Рис.2. Образование магнитных полюсов и  
 распределение магнитного потока  
 у границы дефектов:  
 1 – дефект поперек магнитного потока;  
 2 – дефект вдоль магнитного потока.

Недостатком метода является затруднительность, определения величины, распространения трещины в глубь металла.

**Капиллярный метод** применяют для выявления поверхностных дефектов: исследуемую поверхность смачивают керосином, а затем после удаления керосина покрывают мелом. Керосин, выделяющийся из трещин, пор и т.п. смачивает мел, и в месте расположения дефектов образуются тёмные пятна.

Необходимо отметить, что различие между участками сухого и смоченного мела невелико, и метод недостаточно точен.

### ***Люминесцентный метод.***

Люминесценцией называется холодное свечение вещества, вызываемое различными причинами: освещением вещества; прохождением в нем электрического тока (в газах и парах), химическими процессами. Явление люминесценции наблюдается в природе (северное сияние, свечение некоторых насекомых, гниющего дерева и т.п.) и в технике (свечение телевизионных экранов, газов, наполняющих газосветные трубки и т.п.).

Если вещество светится при освещении его светом и прекращает светиться после прекращения освещения, то такое явление свечения называется флуоресценцией. При этом обычно свет лучей, которые вызывают свечение, отличаются от цвета лучей, которые испускает вещество. Например, керосин при освещении его солнечными лучами испускает слабый голубоватый свет.

На свойстве некоторых органических соединений флуоресцировать, т.е. светиться под действием ультрафиолетовых лучей, и основан люминесцентный метод выявления дефектов.

*Люминесцентным методом* можно выявить только открытые дефекты, например, микротрещины, невидимые невооруженным глазом в любых материалах: металлах и их сплавах, пластмассах, керамических изделиях и т.п. Во многих случаях контроля немагнитных материалов люминесцентный метод является единственным методом дефектоскопии.

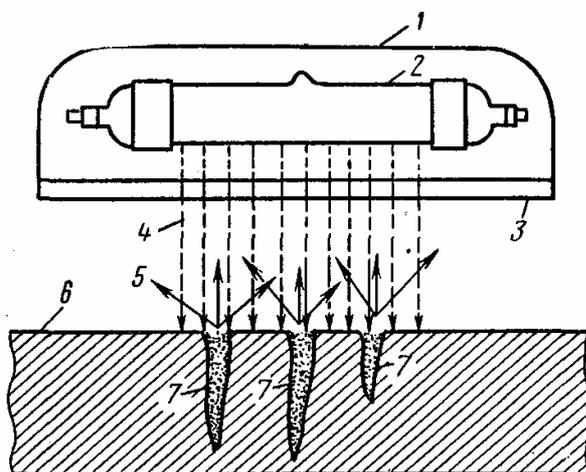
Практически контроль люминесцентным методом осуществляют следующим образом.

Деталь, подлежащую контролю, тщательно очищают и погружается в ванну, содержащую флуоресцирующий раствор (смесь трансформаторного масла, керосина и специального зелено-золотистого порошка) и выдерживают в нем 10-15 мин. При погружении в ванну раствор не только покрывает поверхность, но и проникает в микротрещины. Затем флуоресцирующий раствор смывают с поверхности детали водой, поверхность сушат на воздухе, контролируемую поверхность детали

облучают ультразвуковым светом и осматривают ее. При наличии поверхностных микротрещин проникший в них флуоресцирующий раствор под действием ультрафиолетовых лучей светится зелёным светом, и тем самым позволяют их выявить. Помещение, где проходит контроль, должно быть затемненным. Места дефектов хорошо светятся.

Все применяемые в промышленности флуоресцирующие жидкости имеют специфические особенности, но общим для них является следующее: основа их – масляная, содержит образующие эмульсию вещества и хорошо смывается водой. Они обладают хорошей проникающей способностью, могут быть различных оттенков от зеленого до светящегося желто-зеленого цвета. Флуоресцирующая способность проявляется только при освещении ультрафиолетовыми лучами.

Общая схема люминесцентного метода обнаружения дефектов приведена на рис.3.



*Рис.3. Схема люминесцентного метода обнаружения поверхностных дефектов:*

*1 – рефлектор; 2 – ртутно-кварцевая лампа, излучающая свет и ультрафиолетовые лучи; 3 – светофильтр, пропускающий ультрафиолетовые лучи и поглощающий свет; 4 – ультрафиолетовые лучи; 5 – поток люминесценции от веществ, находящихся в полости дефектов; 6 – изделие; 7 – поверхностные дефекты*

При помощи люминесцентного метода можно выявить поверхностные трещины шириной около 0,01 мм и глубиной 0,02-0,03 мм.

**Ультразвуковой метод.** Обнаружить дефект в изделии можно при помощи звука. Например, постукивая ногтем по чашке, по звуку определяют, есть ли в ней трещина или нет; постукивая молотком по

бандажу вагонного колеса, по звуку определяют, есть ли в нем дефект или нет.

Но по звуку, слышимому ухом, можно обнаружить только дефекты больших размеров. Это объясняется тем, что человеческое ухо слышит звуки, создаваемые телами, которые колеблются с частотой от 16 до 20000 колебаний в секунду. Если тело колеблется с частотой выше 20000 в секунду, то звук от такого колебания человеческое ухо не слышит. Такие неслышимые звуки называются ультразвуками.

При помощи ультразвуков могут быть обнаружены очень мелкие дефекты детали, расположенные очень глубоко. Почему ультразвуками можно обнаружить мелкие, глубоко залегающие в детали дефекты? Потому, что частота ультразвуков очень большая и равна сотням тысяч или даже миллионам колебаний в секунду, а чем больше частота, тем меньше длина звуковой волны, а чем меньше длина звуковой волны, тем меньший дефект она может обнаружить.

Отражением звуковых волн является эхо. Но эхо возникает только в том случае, если на пути звуковых волн встречается крупное препятствие, как лес, горы и т.п. В других случаях, например в поле, мы эхо не слышим, так как в данном случае длина звуковых волн больше, чем размер встречающихся на их пути препятствий, и звуковые волны их огибают, не отражаясь.

*Ультразвуковой метод* выявления дефектов основан на отражении звуковых волн от дефекта, расположенного внутри металла. Данный метод позволяет определить не только наличие внутренних дефектов, но и глубину их расположения (до 1 м).

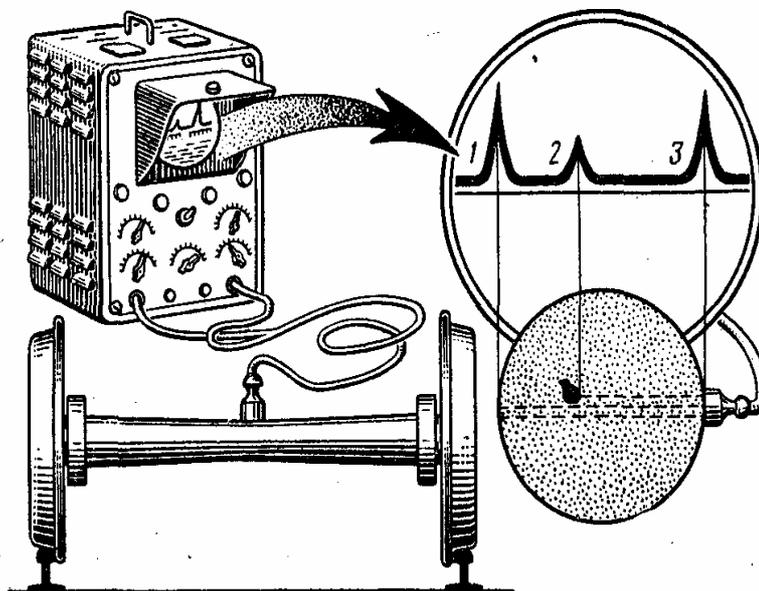
Ультразвуковой прибор для обнаружения дефектов в деталях работает следующим образом (рис.4).

Для получения очень высокой частоты ультразвуковых колебаний (порядка нескольких миллионов колебаний в секунду) используется кварцевая пластинка.

Если такую пластинку поместить между двумя металлическими пластинками и подключить к ним переменный ток высокой частоты, то под действием переменных электрических зарядов кварцевая пластинка начнет сжиматься и расширяться в такт с электрическими колебаниями. В результате колебаний с высокой частотой кварцевой пластинки в воздухе образуются ультразвуковые волны. Такой пучок ультразвуковых волн, получаемых кварцевой пластинкой, направляется на поверхность исследуемой детали и через всю толщу металла проходит ультразвуковая волна.

Если внутри детали имеется дефект (трещина, раковина и т.п.), то нормальное распространение ультразвуковых волн нарушается. Часть волн отражается от дефекта, возвращается назад к поверхности и появляется

ультразвуковое эхо. Остальные волны идут дальше и возвращаются обратно к поверхности после отражения от донной части детали.



*Рис.4. Схема работы ультразвукового дефектоскопа*

Ультразвуковое эхо улавливается той же кварцевой пластинкой и возбуждает на металлических пластинках, между которыми она находится, переменные электрические заряды. Эти заряды можно усилить и измерить электрическим измерительным прибором.

Таким образом, кварцевая пластинка является основным элементом в ультразвуковом дефектоскопе. Для определения глубины залегания дефекта в детали ультразвук посылается в деталь не непрерывно, а периодически с перерывами.

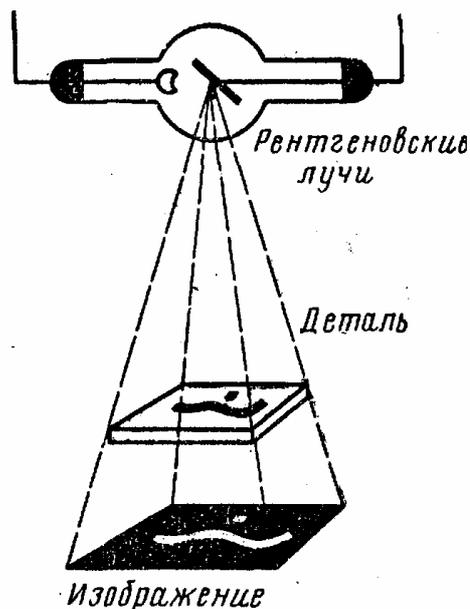
По времени между посылкой ультразвука в деталь и возвращением его обратно (эхо) и определяют глубину залегания дефекта в детали. Для измерения этого времени используют электронно-лучевую трубку. В тот момент, когда на поверхность детали направляют ультразвуковые волны, на экране трубки появляется выброс 1 (рис.4), при этом электронный луч двигается слева направо, прочерчивая на экране горизонтальную линию. Когда на поверхность детали возвращаются ультразвуковые волны, отраженные от дефекта, на экране появляется выброс 2, располагающийся правее выброса 1. И, наконец, при возвращении ультразвуковых волн, отраженных от донной части детали, с правой стороны экрана появляется выброс 3.

Измерение расстояния до выброса 2 определяют глубину залегания дефекта в детали.

Таким образом, ультразвуковой метод дефектоскопии основан на принципе приема ультразвуковых импульсов, отраженных от дефекта внутри металла.

**Рентгеновский метод** выявления дефектов, называемый *рентгеновской дефектоскопией*, он основан на способности рентгеновских лучей проникать через любое тело и в различной степени поглощаться при прохождении через металл различной плотности.

Если на пути рентгеновских лучей поместить деталь с дефектами (трещиной, раковиной и т.п.), рентгеновские лучи в большей степени будут поглощаться (ослабляться) основным металлом и в меньшей степени – при прохождении через дефект. В связи с этим на расположенной за деталью фотографической пластинке получают более светлые и более темные места (рис.5). Светлые места на фотопластинке (темные места после отпечатывания на фотобумаге) в виде точек, линий или пятен и характеризуют наличие в детали дефектов, т.е. присутствующие дефекты фиксируются на плёнке в виде действительных изображений.



*Рис.5. Схема получения и изображения дефекта на фотографической пленке при просвечивании детали рентгеновскими лучами*

Рентгеновская дефектоскопия имеет очень большое значение и распространение в заводской практике для контроля (выявления дефектов) литых, кованных и штампованных деталей, а также сварных соединений без

их разрушения. Рентгеновская дефектоскопия позволяет надежно контролировать стальные детали толщиной до 60-80мм.

### ***Радиационный метод (гамма-дефектоскопия)***

*Дефектоскопия просвечиванием гамма-лучами* радиоактивных изотопов используется для определения внутренних макроскопических дефектов в металле отливок и сварных швов.

Для контроля материалов используют только искусственные источники излучения. В качестве источников излучения обычно применяют кобальт-60, иридий-192, талий-170 и цезий-137 [5].

Наиболее широко применяют данный метод для исследования отливок, в первую очередь стальных и чугуновых, а также сварных швов. При помощи гамма-дефектоскопии можно обнаружить внутренние дефекты в стальных изделиях толщиной до 300мм, а в сплавах алюминия и магния – до 500мм.

## **2. Микроструктурный анализ металлов и сплавов**

### **2.1. Задачи микроанализа:**

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

Задачи микроанализа:

- 1) оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;
- 2) определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;
- 3) определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- 4) анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;
- 5) определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

### **2.2. Изготовление микрошлифов**

Для микроанализа из испытуемого материала вырезают образец и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляют неметаллические включения, мелкие поры, графит в чугуне

(после шлифования и полирования) или микроструктуры (после шлифования, полирования и травления).

Шлифование проводят вручную или механическим способом на вращающемся шлифовальном круге, применяют шлифовальную бумагу следующих номеров: с 10-го до 65-го через десять номеров с убывающим размером зерна. После шлифования шлифовальной бумагой с большим размером зерна на поверхности наблюдается сильная шероховатость. При смене шлифовальной бумаги меняют направление шлифования на перпендикулярное, что уменьшает шероховатость поверхности шлифа. После шлифования на поверхности шлифа видны риски.

Полирование проводят суспензиями или пастами. Суспензия представляет собой взвесь твердых нерастворимых частиц в водном или масляном диспергаторе. Паста - это концентрированная суспензия. В качестве твердой фазы применяют порошки  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  с размером частиц 1 - 5 мкм. Полирование обычно проводят механическим способом: на вращающийся круг, покрытый фетром или сукном, наносят суспензию и полируют шлиф до "зеркального" блеска. На полированном микрошлифе наблюдают неметаллические включения, определяют их форму и размеры.

Травление осуществляется химическими травителями. При травлении между различными частями (фазами) микрошлифа возникает электрохимический потенциал и идет коррозия микрошлифа. Наиболее сильно растравливаются дефектные части микрошлифа: границы зерен, в меньшей степени само зерно. Наиболее растравленные части микрошлифа сильно рассеивают падающий свет и кажутся в микроскопе более темными, чем само зерно. Микроструктуру металлов и сплавов наблюдают в оптическом микроскопе МИМ-7, МИМ-8 и др.

### **2.3. Оптическая схема и работа металлографического микроскопа МИМ-7**

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматриваются прозрачные тела в проходящем свете.

В качестве источника света используют низковольтные электрические лампы накаливания и реже лампы напряжения 110-120 В переменного и постоянного тока. В последнее время применяют мощные кварцевые лампы с иодным циклом (галогенные лампы) и ксеноновые лампы высокого давления. Для уменьшения рассеивания световых лучей и повышения четкости изображения в осветительную систему введен коллектор 2. Светофильтры 4 (цветные, матовые или дымчатые стеклянные пластинки) отбирают лучи требуемой длины волны, т.е. определенного цвета, и

позволяют установить нужную интенсивность освещения с тем, чтобы избежать излишнего утомления глаз наблюдателя.

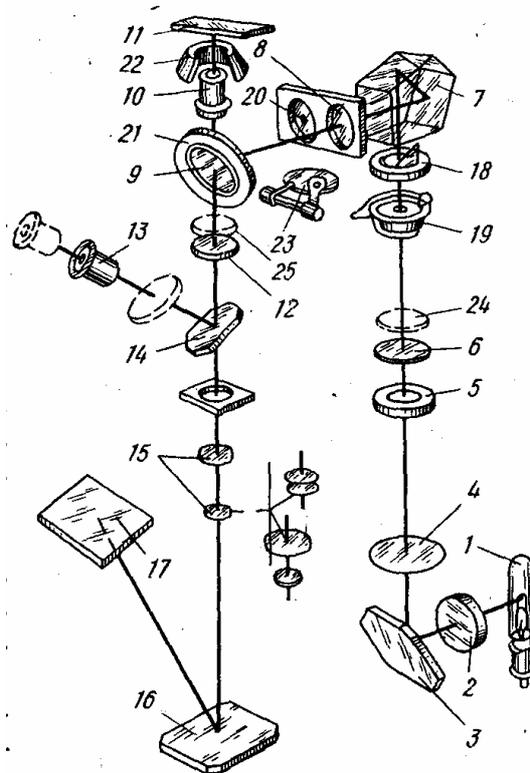


Рис.6. Оптическая схема и работа  
металлографического микроскопа МИМ-7:

1 – осветитель (лампа); 2 – коллектор; 3 – зеркало; 4 – светофильтр; 5 – апертурная диафрагма; 6 – линза; 7 – призма; 8 – линза для работы в светлом поле; 9 – отражательная пластинка; 10 – объектив; 11 – объект; 12 – ахроматическая линза; 13 – окуляр; 14 – зеркало; 15 – фотоокуляр; 16 – зеркало; 17 – фотопластинка; 18 – полевая диафрагма; 19 – затвор; 20 – линза для работы в темном поле; 21 – кольцевое зеркало; 22 – параболическое зеркало; 23 – заслонка (включается при работе в темном поле); 24 – поляризатор; 25 – анализатор

Человеческий глаз обладает неодинаковой чувствительностью к разным цветам спектра; наибольшей чувствительностью он обладает к желто-зеленым цветам. Поэтому применение желто-зеленого светофильтра, отфильтровывающего другие составляющие белого цвета, позволяет более четко наблюдать особенности структуры. Желто-зеленые светофильтры уменьшают хроматическую aberrацию (неодинакового преломления линзой лучей разного цвета (различной длины волны), которые не имеют одной точки схода – фокуса) и, кроме того, выделяя лучи с меньшей длиной волны, повышают разрешающую способность объектива.

Апертурная диафрагма 5 необходима для ограничения светового пучка и

получения большей четкости изображения, полевая диафрагма 18 – для ограничения освещенного поля рассматриваемого участка на микрошлифе.

Структуры исследуются в темном и светлом поле. При микроанализе для большинства металлов и других непрозрачных материалов и сплавов применяют наблюдение в светлом поле, т.е. при вертикальном освещении. Световые лучи, преломляясь пентапризмой 7, проходят через линзу светлого поля, попадают на отражающую пластинку 9 и направляются через объектив 10 на микрошлиф, установленный на предметном столике. Отразившись от микрошлифа, лучи вновь проходят через объектив и, выходя через него параллельным пучком, попадают на отражательную пластинку и ахроматическую линзу 12. Зеркало 14 отклоняет лучи в сторону окуляра 13.

Окуляры не только дают мнимое увеличение (т.е. увеличение промежуточного изображения), но и исправляют оптические дефекты, которые полностью не устраняются даже в объективах сложной конфигурации. Увеличение окуляра должно быть меньше, чем объектива, и подбирается таким образом, чтобы можно было достаточно четко рассмотреть изображение, создаваемое объектом. Если увеличение окуляра слишком мало, детали структуры, имеющиеся в изображении, полученном объективом, не будут выявлены; в то же время при слишком большом увеличении окуляра новые особенности структуры не выявляются, а ухудшается четкость изображения и уменьшается поле зрения.

Практически увеличение микроскопа определяется произведением увеличения окуляра на увеличение объектива, при использовании следующих характеристик: фокусного расстояния, числовой апертуры объектива и увеличения окуляра.

Для выявления отдельных мелких рельефных частиц на гладком поле, например, при исследовании неметаллических включений, целесообразно применять темнопольное освещение. Работа микроскопа для исследования в темном поле будет отличаться от описанной схемы исследования в светлом поле тем, что вместо линзы 8 устанавливается линза 20. Центральная часть одной из поверхностей линзы 20 покрыта черным непрозрачным лаком в виде диска, задерживающего центральную часть светового пучка и пропускающего краевые лучи, проходящие через прозрачную часть линзы 20 и попадающие на кольцевое зеркало 21. Для того чтобы световые лучи не попадали на отражающую пластинку, используется заслонка 23. При исследовании в темном поле применяют эпиобъективы, имеющие вокруг оправы с объективными линзами параболическое зеркало 22. Отразившись от кольцевого зеркала, световые лучи падают на внутреннюю зеркальную поверхность параболического зеркала и, отразившись от него, концентрируются на микрошлифе. От поверхности шлифа в объектив отразится только часть лучей, имеющих диффузный характер. Эти лучи обычно отражаются от выступающих над

остальной поверхностью объекта фаз. То есть исследование в темном поле не дает полной характеристики структуры и его следует рассматривать как дополняющее основное исследование в светлом поле.

При фотографировании зеркало 14 выключается выдвиганием тубуса вместе с окуляром и зеркалом, и лучи направляются непосредственно к фотоокуляру 15, проходят через него на зеркало 16, от которого отражаются и попадают на матовое стекло, где и дают изображение. Отраженные от микрошлифа световые лучи могут направляться на матовое стекло через проекционный окуляр. Для фиксирования микроструктуры матовое стекло заменяется кассетой с фотопластинкой 17.

После фотографирования применяют обычные в фотографии приемы: проявление, фиксирование, промывание негатива и печатание позитивного изображения на фотобумагу.

Разновидностью освещения является косое освещение, которое достигается смещением апертурной диафрагмы или включением призмы косого освещения. При этом выступающие участки на поверхности микрошлифа оказываются более светлыми и отбрасывают более резкую тень на остальную поверхность, которая в меньшей степени отражает лучи и еще больше возрастает контрастность изображения.

Для зрительного наблюдения и фотографирования применяют также и поляризованный свет, т.е. свет, волны которого находятся в одной определенной плоскости. Для наблюдения в поляризованном свете металлографические микроскопы имеют два полярофильтра; один из них, являющийся поляризатором 24, устанавливают близко к источнику света на пути хода лучей, другой полярофильтр – анализатор 25, концентрирующий отраженные микрошлифом поляризованные лучи, укрепляют перед окуляром или между объективом и окуляром. Если объект оптически изотропен, то при соответствующем взаимном положении поляризатора и анализатора можно добиться полного поглощения света. Однако если кристаллиты оптически анизотропны, то в указанном случае полного погашения света не происходит, и одни кристаллиты оказываются светлыми, а другие темными. С помощью поляризованного света изучают сплавы, состоящие из фаз с кристаллической решеткой некубической системы, а также неметаллические включения. Если включения прозрачны, отраженный свет частично преломляется на их внешней и внутренних поверхностях и не поляризуется. По прозрачности включения, по его окрашиванию или анизотропности можно судить о его природе.

Механическая система микроскопа [1]. Металлографический микроскоп имеет штатив, тубус и предметный столик (рис.7). Шлиф устанавливают на предметном горизонтальном столике, так, чтобы обеспечить перпендикулярное расположение подготовленной для

исследования поверхности шлифа по отношению к оптической оси объектива. В центре столика устанавливают сменные подкладки с отверстием разного размера, через которое лучи света попадают на микрошлиф и отражаются от него. Предметный столик можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных плоскостях с помощью специальных винтов; это позволяет перемещать микрошлиф на нужное расстояние и просматривать микроструктуру в различных участках без изменения выбранного фокусного расстояния.

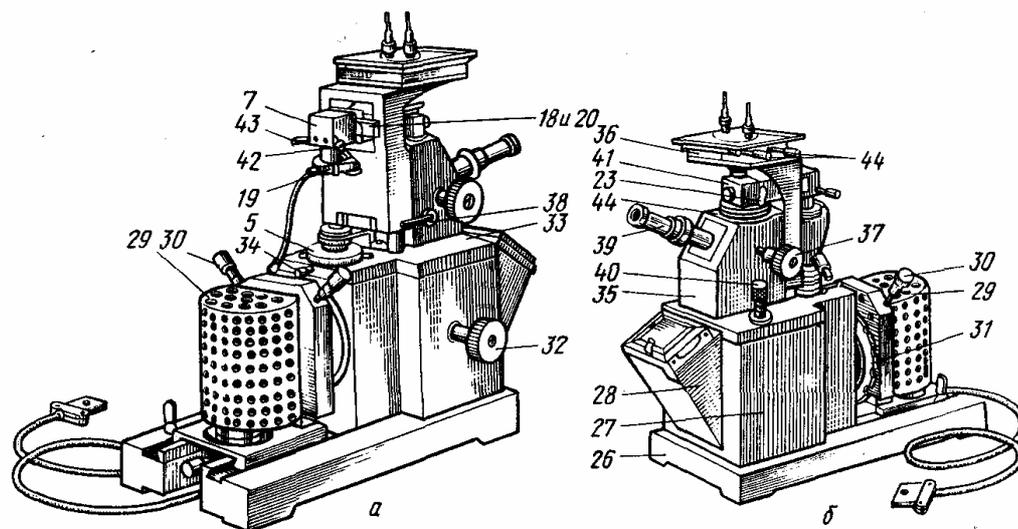


Рис.7. Микроскоп МИМ-7:

*а* – вид со стороны трансформатора; *б* – вид со стороны фотокамеры; 1 – 25 – см. рис.6; 26 – плита; 27 – основание или корпус фотокамеры; 29 – фонарь осветителя; 30 – винты, центрирующие лампу; 31 – диск со светофильтром; 32 – рукоятка для поворота диска с тремя фотоокулярами; 33 – рукоятка для смещения и поворота диафрагмы 5; 34 – винт, фиксирующий поворот диафрагмы 5; 35 – корпус микроскопа; 36 – предметный столик; 37 – макроскопический винт для вертикального перемещения столика; 38 – стопорное устройство макровинта; 39 – визуальный тубус; 40 – микрометрический винт; 41 – осветительный тубус; 42 – рукоятка полевой диафрагмы; 43 – механизм центрировки; 44 – винты для перемещения предметного столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях

Для получения более четкого изображения шлифа, установленный на столике, находят на фокус. Для этой цели в штативе микроскопа имеется макроскопический винт, вращением которого поднимают или опускают столик, обеспечивая приблизительное фокусирование. Точное фокусирование достигается микрометрическим винтом, один оборот которого смещает объектив к шлифу на доли миллиметра (в большинстве конструкций микроскопов деление барабана микровинта равно 2мкм). Чем больше увеличение объектива, тем меньше должно быть расстояние между шлифом и объективом.

## 2.4. Измерение микроскопического объекта

При измерении микроскопического объекта при помощи окулярных и объективных микрометров необходимо сначала определить цену деления окулярмикрометра:

1. Вставить окулярмикрометр и объектив.
2. На подкладку предметного столика поместить объективмикрометр таким образом, чтобы шкала с делениями находилась над объективом.
3. Вращением макроскопического и микроскопического винтов навести на фокус шкалу объективмикрометра.
4. Вращением окуляра совместить шкалу окулярмикрометра со шкалой объективмикрометра, установив параллельно штрихи обеих шкал.
5. Определить, в какое число делений окулярмикрометра укладывается шкала объективмикрометра (если она полностью укладывается в поле зрения микроскопа) или в какое число делений окулярмикрометра укладывается определенное количество делений шкалы объективмикрометра (если она полностью не уменьшается в поле зрения микроскопа).
6. Определить цену деления шкалы окулярмикрометра  $C_{ок}$  по формуле

$$C_{ок} = \frac{C_{об} \cdot A_{об}}{A_{ок}} \text{ мм},$$

где  $C_{об} = 0,01 \text{ мм}$  – цена деления шкалы объективмикрометра;

$A_{об}$  - число совмещенных делений объективмикрометра;

$A_{ок}$  - число совмещенных делений окулярмикрометра.

*Например*, шкала объективмикрометра укладывается на 25 делениях шкалы окулярмикрометра. Тогда

$$C_{ок} = \frac{0,01 \cdot 100}{25} = 0,04 \text{ мм}.$$

Для измерения микроскопических объектов необходимо:

1. Настроить микроскоп на измеряемый объект.
2. Совместить данный объект со шкалой окулярмикрометра.
3. Измерить микроскопический объект, т.е. определить, сколько делений шкалы окулярмикрометра занимает объект.
4. Определить величину измеряемого объекта, для чего полученное число делений шкалы окулярмикрометра, которое занимает объект, умножить на цену деления окулярмикрометра.

*Например*, объект занимает 6 делений шкалы окулярмикрометра.

Цена деления окулярмикрометра  $0,04 \text{ мм}$ . Величина измеряемого объекта  $6 \cdot 0,04 = 0,24 \text{ мм}$ .

## Содержание

1. Макроструктурный анализ и дефектоскопия металлов .....	3
1.1. Назначение макроструктурного анализа .....	3
1.2. Макроанализ изломов металлов .....	3
1.3. Макроанализ шлифов .....	4
1.4. Дефектоскопия металлов .....	6
2. Микроструктурный анализ металлов и сплавов .....	13
2.1. Задачи микроанализа .....	13
2.2. Изготовление микрошлифов .....	13
2.3. Оптическая схема и работа металлографического микроскопа МИМ-7 .....	14
2.4. Измерение микроскопического объекта .....	18

## Рекомендуемая литература

1. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. М.: Металлургия, 1989.- с.136-141.
2. Герасимова Л.П. и др. Изломы конструкционных сталей: Справочник. 1987.
3. Кузьмин Б.А., Самохоцкий А.И., Кузнецова Т.Н. Металлургия, материаловедение и конструкционные материалы. М.: Высшая школа, 1971.- с.176-180.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990.- с.101-104, 354.
5. Рети П. Неразрушающие методы контроля металлов. Сокр. пер.с венгерского. М.: Машиностроение, 1972.- 208 с.
6. Самохоцкий А.И., Кунявский М.Н. Лабораторные работы по материаловедению. М.: Машиностроение, 1971.- с. 5-45.