

Лабораторная работа №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучить методику определения твердости материалов с помощью лабораторного оборудования.

Оборудование и материалы для выполнения работы:

- 1) испытательная машина Бринелля;
- 2) портативный измерительный прибор Темп-3;
- 3) образцы различных железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов);
- 4) образцы из меди, алюминия и сплавов на их основе.

1. Обзор основных методов определения твердости

Знание твердости материала имеет большое практическое значение, так как она отражает многие его рабочие свойства, такие, как например, износостойкость, режущие свойства, способность обрабатываться шлифованием или резанием, выдерживать местные давления и т.д. Кроме того, по твердости можно оценить и механические свойства (предел прочности). Широкое распространение испытаний материалов на твердость объясняется тем, что при этом не требуется изготовления специальных образцов; методика испытаний весьма проста и может осуществляться непосредственно на готовой детали без разрушения.

Большинство методов определения твердости основано на принципе вдавливания в испытуемый материал твердых тел (закаленного шарика, алмазного конуса или алмазной пирамиды) и последующего измерения размеров отпечатков. Поэтому часто твердость определяют, как способность материала сопротивляться внедрению в него другого тела. Однако такое определение не является общим, так как существуют и другие методы определения твердости, основанные не на вдавливании, а на царапании, качении маятника, динамическом методе и других принципах.

Наиболее широко практикуются испытания твердости по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу и метод определения микротвердости. Во всех перечисленных методах при вдавливании индентора происходит пластическая деформация испытуемого материала под индентором. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем на меньшую глубину проникает индентор и тем выше твердость.

По Бринеллю определяют твердость относительно мягких материалов: цветных металлов и их сплавов, отожженной стали, чугунов (кроме белого).

По Роквеллу чаще всего определяют твердость очень твердых материалов: закаленных сталей, твердых сплавов, керамики, твердых покрытий, в том числе наплавленных слоев достаточной глубины на сталях и чугунах. Но на приборе Роквелла можно определять твердость и сравнительно мягких материалов.

Метод Виккерса используется для испытания твердости деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Реже этот метод применяется для измерения твердости твердых и мягких материалов.

Методом микротвердости обычно измеряется твердость в пределах отдельных зерен или очень тонких слоев. Два последних метода чаще всего используются в исследовательских работах.

Твердость по методу Бринелля. Определение твердости по Бринеллю основано на вдавливании в испытуемый материал стального шарика и последующего измерения диаметра отпечатка (рис. 1 а). Твердость по Бринеллю (HB) выражается отношением приложенной нагрузки P к площади поверхности отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (1)$$

Т.к. поверхность отпечатка имеет форму шарового сегмента, то HB определится формулой:

$$HB = \frac{2P}{pD \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2)$$

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

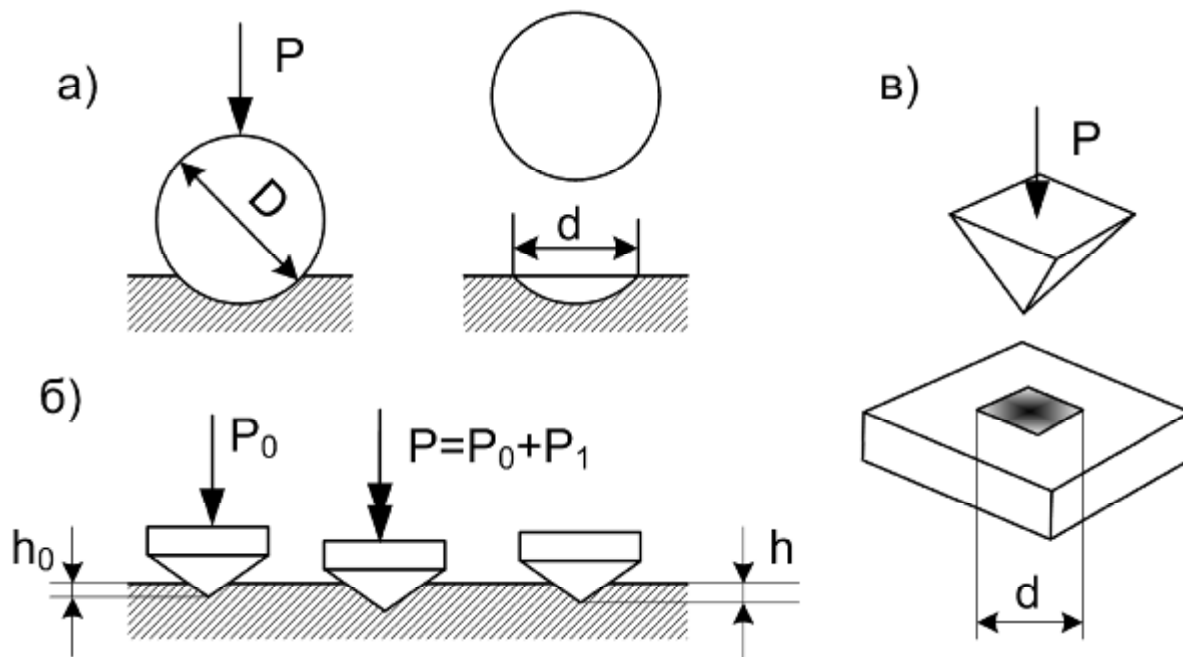


Рис. 1. Схемы получения отпечатков инденторов при определении твердости различными способами:

а) по Бринеллю, б) по Роквеллу, в) по Виккерсу

Размер шарика выбирается в зависимости от толщины испытуемого образца: обычно пользуются шариками стандартных размеров диаметрами в 10, 5 или 2,5 мм.

Нагрузка на шарик выбирается в зависимости от рода материала и должна быть пропорциональна квадрату диаметра шарика:

для стали и чугуна

$$P = 30D^2,$$

для меди и медных сплавов

$$P = 10D^2,$$

для баббитов и свинцовистых бронз

$$P = 2,5D^2.$$

Более подробные сведения по выбору нагрузки, времени приложения нагрузки для различных материалов приводятся в соответствующей таблице в лаборатории испытания твердости. Кроме того, нагрузка считается выбранной правильно, если выдерживается соотношение:

$$0,2D < d < 0,6D. \quad (3)$$

Диаметр отпечатка измеряют с помощью лупы Бринелля или микроскопа в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют как среднее арифметическое из двух измерений. Лупа имеет шкалу, малое деление которой (или цена деления) равно 0,05 мм. На рис. 2 показано измерение диаметра отпечатка с помощью лупы. В этом примере диаметр отпечатка оказался равным $d \sim 2,25 - 2,30$ мм.

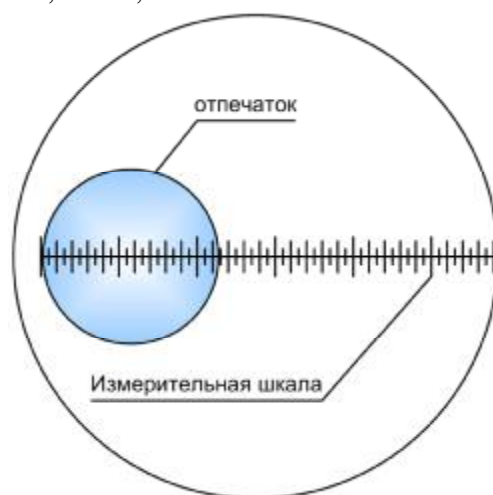


Рис. 2. Измерение диаметра отпечатка с помощью лупы Бринелля

По результатам измерения диаметра отпечатка рассчитывается твердость материала по формуле (2).

Между механическими свойствами (в частности, пределом прочности σ_B и твердостью по Бринеллю) существует линейная зависимость (корреляция), которая может быть выражена эмпирической формулой:

$$S_B = C \cdot HB \cdot 10 \quad [\text{МПа}], \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности определяется для различных материалов из таблицы:

| | |
|----------------|-----------------------|
| сталь | $C = 0,33 \dots 0,36$ |
| алюминий | $C = 0,4$ |
| медь | $C = 0,48$ |
| дуралюмин | $C = 0,37$ |
| латунь, бронза | $C = 0,53$ |

Для хрупких материалов (чугун, силумин) надежной корреляции между твердостью и пределом прочности получить не удастся. Для определения предела прочности серого чугуна пользуются следующей эмпирической формулой:

$$S_B = \frac{10 \cdot (HB - 40)}{6} \quad [\text{МПа}].$$

Твердость по методу Роквелла. Определение твердости по Роквеллу основано на вдавливании в исследуемый материал алмазного конуса с углом в вершине 120° (шкалы A и C) и последующим измерением глубины вдавливания h (рис. 1 б) или стального шарика диаметром $1,5875$ мм (шкала B).

Твердость по Роквеллу, в отличие от метода Бринеля, выражается не имеющей физического смысла величиной, зависящей от глубины вдавливания h , и отображается на измерительной шкале испытательной машины.

Метод Роквелла позволяет проводить испытания деталей после поверхностного упрочнения и объемной закалки. Определение твердости по этому методу практически не связано с порчей поверхности изделия.

Шкала C служит для испытания твердых материалов, не доступных методу Бринеля $HB = \text{до } 700 \text{ кгс/мм}^2$. Алмазный конус вдавливается под нагрузкой 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале C – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается HRC , например - $HRC65$, т.е. 65 единиц по шкале C метода Роквелла.

Шкала A используется при испытании очень твердых материалов или тонких поверхностных слоев ($0,5 \dots 1,0$ мм). Применяют тот же алмазный конус, но вдавливают под нагрузкой в 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале C , но обозначают HRA . Интервал измерения твердости по этой шкале от 70 до 85 единиц.

Шкала B предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм^2 . Стальной шарик диаметром $1,5875$ мм вдавливается под нагрузкой в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы B и обозначается HRB .

Твердость по Виккерсу. Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец (изделие) под действием нагрузки P и измерении диагонали отпечатка d , оставшегося после снятия нагрузки (рис. 1 в).

Нагрузка P может меняться от $9,8$ Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс). Твердость по Виккерсу

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2} \quad [\text{МПа}],$$

если P выражена в Н, и

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad [\text{кгс/мм}^2],$$

если P выражена в кгс.

Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка. Число твердости по Виккерсу *HV* определяют по специальным таблицам по измеренной величине *d* (диагонали отпечатка в миллиметрах – см. рис. 1 в).

Динамический метод измерения твердости

В предыдущих методах использовалась статическая нагрузка для определения твердости. В динамических способах измерения твердости используется ударное действие нагрузки. Результат определяют, например, по высоте отскока или скорости отскока шарика от поверхности образца. В лабораторной работе будет использован динамический метод определения твердости с помощью твердомера ТЭМП-3.

Твердомер электронный малогабаритный переносной типа ТЭМП – 3 предназначен для экспрессного измерения твердости сталей, сплавов и их сварных соединений по шкалам Бринелля (HB), Роквелла (HRC), Шора (HSD), Виккерса (HV).

Прибор может быть использован в производственных и лабораторных условиях в машиностроении, металлургии, энергетике и других отраслях промышленности, а также в ремонтно-монтажных организациях.

Его можно применять для оперативного контроля твердости деталей массового производства в цеховых условиях, например, для оценки стабильности технологических процессов (до и после термической и механической обработок, сварки, обработки давлением и т.д.). Прибор также используется для диагностирования эксплуатируемого оборудования с целью оценки его остаточного безопасного ресурса.

Объектами измерений могут быть крупногабаритные изделия, узлы и детали сложной формы, имеющие труднодоступные зоны измерений, в том числе: сосуды давления различного назначения, (корпуса химических реакторов, парогенераторы, коллекторы, котельные барабаны, газгольдеры и т.п.), трубопроводы, роторы турбин и генераторов, валки прокатных станов, коленчатые валы, шестерни, детали и узлы различных транспортных средств, рельсы, колеса вагонов, электро- и тепловозов, промышленные полуфабрикаты, (отливки, листы, трубы, обечайки, в том числе тонкостенные - менее 7 мм) и т.д.

Устройство и принцип работы

1. Твердомер представляет собой портативный электронный прибор динамического действия, состоящий из датчика и электронного блока.

2. Принцип измерения твердости прибором основан на определении отношения скоростей удара и отскока ударника, преобразуемого электронным блоком в условную единицу твердости *H*, которую затем переводят в требуемые единицы твердости HB, HRC, HSD, HV.

3. На лицевой стороне корпуса прибора расположены жидкокристаллический индикатор - ЖКИ (в дальнейшем "дисплей"), кнопка включения "Вкл", а на верхней - разъем для подключения датчика и гнездо крепления толкателя.

Кнопкой "Вкл" можно как включить прибор (при этом в левом разряде дисплея появляется цифра 1), так и выключить.

Перерасчет показаний прибора Темп-3, полученных в условных единицах, в значение твердости по HB проводится по формулам:

если показание < 490 усл.ед, то HB = 0,9156 * X - 233,64;

если показание > 490 усл.ед, то HB = 1,3443 * X - 441,7.

(5)

2. Выполнение лабораторной работы

Порядок работы

1. Прежде чем приступить к измерению твердости образца, необходимо выбрать методику определения твердости (Бринелль, Роквелл). Сначала нужно оценить твердость обыкновенным напильником. Если напильник скользит по поверхности образца или лишь незначительно царапает металлическую поверхность, то образец имеет высокую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Роквеллу. Если же образец хорошо

царапается напильником (легко снимается часть металла), то он имеет сравнительно низкую твердость, и тогда следует применять метод определения твердости по Бринеллю.

2. Зачистить поверхность образца в зоне измерения диаметром около 20 мм, предварительно удалив с поверхности окалину, окисную пленку, смазку, ржавчину и т.д. Поверхности образцов (испытуемая и опорная) зачищаются на мелкой наждачной шкурке или на мелкозернистом шлифовальном круге. Зачистка не должна сопровождаться нагревом образца выше 150 °С. Опорная поверхность образца должна обеспечивать плотное и устойчивое прилегание его к опорному столику.

3. Определить диаметр установленного в испытательной машине Бринелля шарика-индентора $D = 2,5$ или 5 или 10 мм.

4. Подсчитать нагрузку, установленную на испытательной машине.
 $P = 3000$ кгс (или другое значение).

5. Разместить образец на опорном столике испытательной машины и провести измерение.

6. Выполнить измерения твердости всех заданных образцов.

7. Все результаты испытания твердости по Бринеллю вносятся в общую таблицу.

Таблица результатов определения твердости образцов

| Номер образца | Материал образца | Диаметр отпечатка d , мм | Рассчитанная твердость, HB | Расчетный предел прочности σ_B , МПа | Показания прибора Темп-3, среднее по 3 измерен. усл. ед. | Пересчитанное значение показания прибора в HB |
|---------------|------------------|----------------------------|------------------------------|---|--|---|
| 1 | | | | | | |
| ... | | | | | | |

8. Используя формулы 2 и 4, рассчитайте твердость по Бринеллю и предел прочности каждого образца. Занесите результаты расчетов в таблицу.

9. Выполните измерение твердости тех же образцов – по 3 раза на каждый с помощью прибора Темп-3 и среднее значение для каждого образца запишите в таблицу.

Порядок работы с прибором следующий:

а) Соединить датчик с электронным блоком. Вставить в батарейный отсек элементы питания, соблюдая полярность. Привернуть толкатель к корпусу прибора.

б) Проверить, чтобы опорное кольцо датчика было плотно завернуто на направляющую трубку.

в) Включить прибор нажатием кнопки “Вкл”. При этом, слева на дисплее, должна появиться цифра 1.

г) Толкателем плавно загрузить ударник с торцевой части датчика до ощутимого защелкивания, затем извлечь толкатель.

д) Датчик установить нормально к испытуемой поверхности изделия, плотно прижав его к ней одной рукой, а другой - нажать на спусковую кнопку. После соударения ударника с поверхностью контролируемого изделия на дисплее прибора появится результат измерения в виде трехзначного числа H .

9. Для каждого образца выполните перерасчет показаний прибора Темп-3, полученных в усл.ед. в единицы твердости HB по формуле (5).

10. Составьте подробный отчет о выполнении лабораторной работы

3. Содержание отчета

1. Наименование работы и ее цель.
2. Оборудование и материалы, используемые при выполнении работы.
3. Краткое описание методов определения твердости и область их применения.
4. Таблицы экспериментальных данных для всех образцов.
5. Выводы по результатам выполнения работы. В выводе сравните значения, полученные для дюралюминия и сталей, низко-, средне- и высокоуглеродистых сталей, низко- и высоколегированных сталей.

Лабораторная работа №2 МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучить микроскопический анализ структуры металлов и сплавов.

Задачи работы:

1. Освоить приемы работы на металлографическом микроскопе.
2. Изучить процесс приготовления микрошлифов.
3. Измерить величину зерна в заданном образце из сплава железа, сделать заключение о зернистости сплава и его механических свойствах.

Теоретическая часть.

Микроскопический анализ металлов

Микроскопический анализ металлов заключается в исследовании структуры металлов и сплавов с помощью оптического микроскопа. Впервые микроскоп для исследования строения металлов был применен в 1831 г. русским инженером П.П. Аносовым, изучавшим булатную сталь.

С помощью микроанализа можно определить количество, форму и размеры отдельных фаз, их взаимное распределение, имеющиеся включения, т.е. судить о свойствах сплавов и металлов, в ряде случаев – о предшествующей обработке этих сплавов и металлов (прокатка, термообработка).

Исследованию подвергаются микрошлифы, приготовленные специальным образом.

Микроскопический анализ состоит из следующих этапов:

1. приготовление шлифов;
2. травление шлифов;
3. исследование структуры металлов и сплавов под микроскопом.

Приготовление шлифов

В микроскопе рассматриваются *микрошлифы* – специальные образцы металла, имеющие шлифованную, полированную поверхность, отражающую световые лучи.

В зависимости от цели исследования и формы исследуемой детали на ней выбирают подходящее место и вырезают небольшой образец. Затем на наждачном круге или опиловкой напильником получают плоскую поверхность образца. После этого исследуемую поверхность образца шлифуют наждачной бумагой. Шлифование проводят последовательно шлифовальной бумагой различных номеров: сначала крупнозернистой, затем средне- и мелкозернистой. Поверхность шлифа должна полностью соприкоснуться с бумагой.

Шлифование наждачной бумагой нужно проводить только в одном направлении. При переходе на бумагу другого номера шлифовать следует в направлении перпендикулярном к рискам, оставшимся после шлифования на предыдущей бумаге, пока эти риски не будут уничтожены, т.е. шлиф нужно поворачивать на 90°. После шлифования для удаления остатков абразива шлиф промывается водой. Для удаления мелких рисок образец после шлифования полируют на вращающемся круге с натянутым полировальным материалом (фетр, бархат, тонкое сукно). Полировальный материал периодически смачивается водой, в которой находятся взвешенные частицы абразивного материала (окись алюминия, окись железа, окись хрома и т.д.).

Полировальный круг должен быть влажным, а нажатие образца на круг – незначительным. Полирование считается законченным, когда поверхность образца приобретает зеркальный блеск и даже под микроскопом не видны риски или царапины.

После полирования шлиф промывают водой, если его поверхность на воздухе легко окисляется, его промывают в спирте и просушивают фильтровальной бумагой.

Образец металла, приготовленный для рассмотрения его строения невооруженным глазом или с помощью лупы, называется *макрошлифом*. Макрошлифы имеют обычно большие размеры, поэтому отрезка заготовки для макрошлифа производится либо на токарном станке, либо механической ножовкой. Выравнивание плоскости макрошлифа производят на станках – токарном, фрезерном или плоскошлифовальном, в зависимости от формы заготовки и

твердости. Рабочую поверхность шлифа либо сразу подвергают травлению, либо доводят вручную до более гладкого состояния посредством шлифовальной бумаги, водя по шлифу бумагой, а не наоборот. При этом при переходе с одного номера бумаги на другой меняется направление шлифовки на 90° . Макрошлифы полированию не подвергаются.

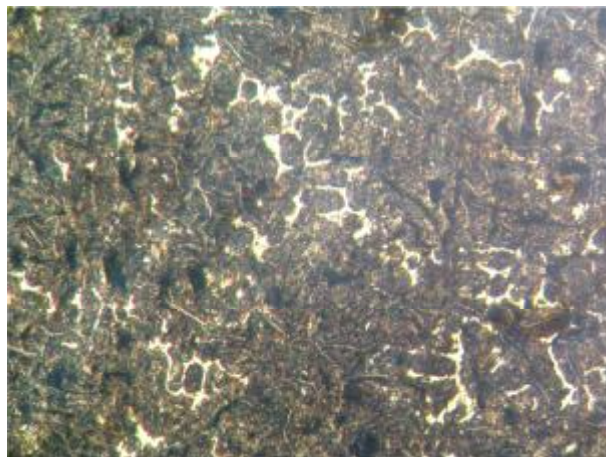
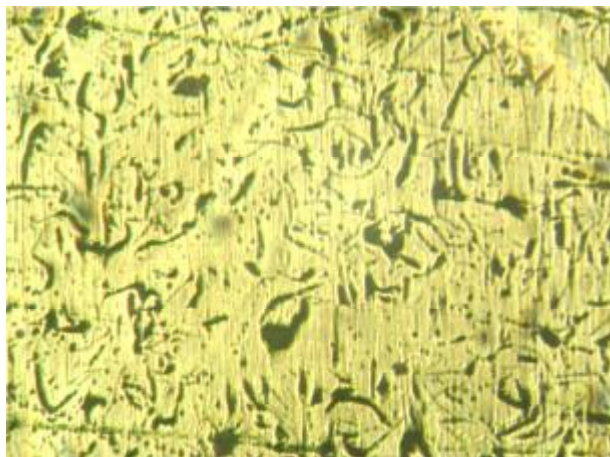
Травление шлифов

Нетравленный полированный шлиф металла под микроскопом имеет вид светлого круга. На таком шлифе можно увидеть только неметаллические включения (графит, оксиды, сульфиды, шлак и др.). После определения неметаллических включений шлиф подвергается травлению.

Зерна металлов и сплавов имеют неодинаковую кристаллографическую ориентировку – зерна хаотично распределены в объеме образца. По этой причине на плоскости микрошлифа оказываются зерна, срезанные по разным кристаллографическим направлениям и имеющие в этих направлениях неодинаковые свойства. Степень травимости зерен оказывается различной, больше травятся неграненные слои. Свет, падающий на срез, отражается от всех зерен по-разному. Под микроскопом они имеют отличные друг от друга оттенки. На участках стыков зерен возникает значительное рассеивание света, и отраженные лучи попадают в поле зрения. Поэтому границы зерен обозначены темными линиями, которые и воспроизводят картину действительных границ зерен.

Для травления шлифов применяют различные реактивы. Выбор подходящего реактива производится по специальным справочникам. Наиболее распространенным для простых углеродистых сталей и чугунов является 4-5% раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Реактив наливают в стеклянную чашку и погружают в него микрошлиф на непродолжительное время (4-6 с.). Затем шлиф просматривают под микроскопом. Если структура просматривается плохо, шлиф травят дополнительно. Если структура слишком затемнена, шлиф снова полируют и травят.

При исследовании макрошлифов с целью выявления структуры сплава, их тоже подвергают травлению как микрошлифы. Механизм воздействия травителей на сплавы аналогичен воздействию на микрошлифы, с той лишь разницей, что травление макрошлифов должно быть более глубоким, с более крепким и сильнодействующими реактивом.



Микроструктура чугунного блока цилиндров автомобиля до и после травления

Микроскопические исследования приготовленных шлифов проводятся с помощью металлографического микроскопа, где предмет изучается в отраженном свете.

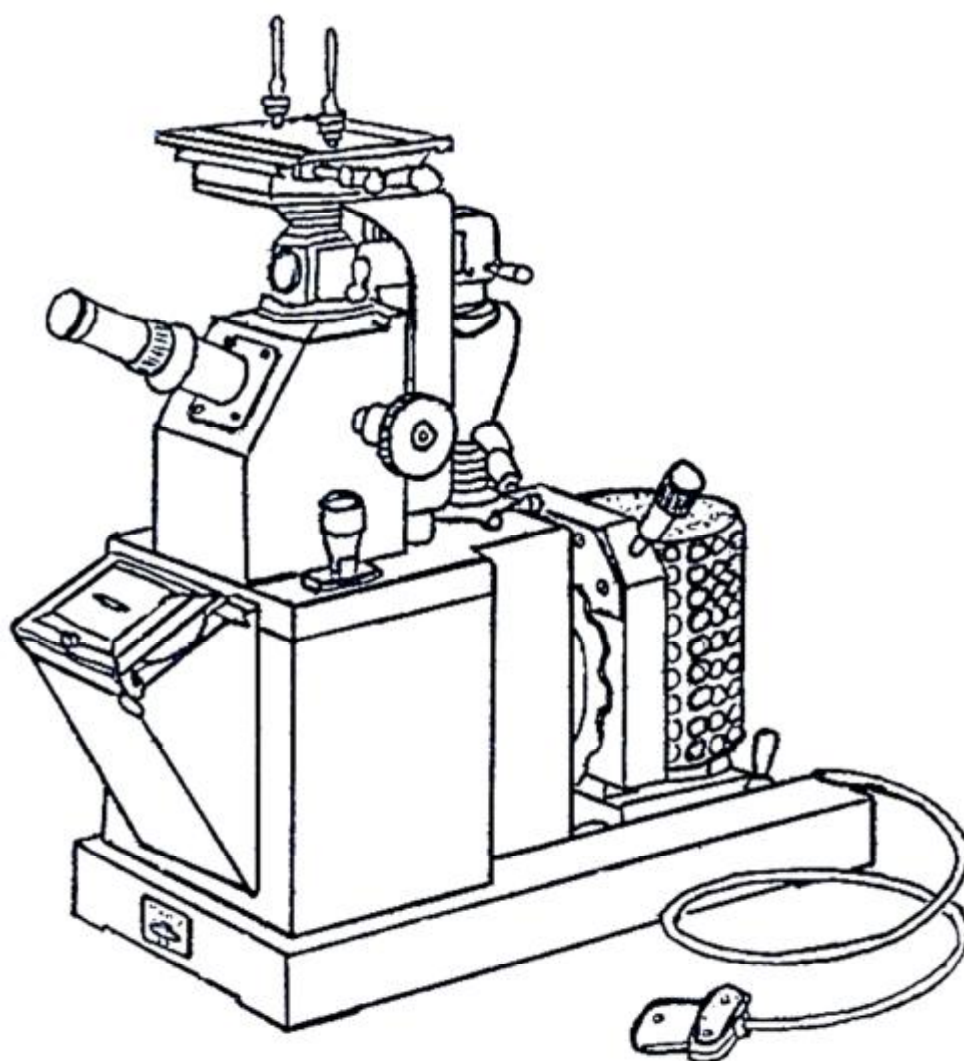
Устройство микроскопа.

Для микроскопического исследования структуры металлов используют металлографические микроскопы, которые позволяют рассматривать предметы в отраженном свете. Промышленностью выпускаются металломикроскопические микроскопы вертикальные (МИМ-6, МИМ-7) и горизонтальные (МИМ-9) с увеличением до 2000 раз.

Микроскопы состоят из оптической системы, осветительного устройства и механической регулирующей системы.

Оптическую систему составляют объектив, окуляр, зеркало, призма. **Объектив** представляет собой систему линз в металлической оправе, обращенных к рассматриваемому объекту. Он дает обратное увеличенное действительное изображение объекта. **Окуляр** – это система линз, размещенных в одной оправе и обращенных к глазу наблюдателя. Окуляры исправляют оптические дефекты и дают мнимое увеличенное изображение, полученное объективом. Общее увеличение, которое дают микроскопу совместно объектив и окуляр при визуальном наблюдении, равно произведению величин увеличения объектива и окуляра. Увеличение окуляров и объективов указывают на их металлических оправках и в инструкциях, приводимых в описаниях микроскопа.

Освещение микрошлифа проводится через объектив осветительным устройством, состоящим из источника света, серии линз, светофильтров и диафрагм. В качестве источника света используют низковольтные электрические лампы накаливания, а при фотографировании – лампы с напряжением 110-120 В. При визуальном наблюдении рекомендуется применять желто-зеленые светофильтры, наиболее чувствительные для глаза человека.



Микроскоп МИМ-7

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. В этом заключается его отличие от биологического микроскопа.

Если шлиф металла не травлен, то практически весь световой поток отражается от шлифа и попадает в окуляр микроскопа. На травленном шлифе образуется микрорельеф из-за различной способности к растворению и окислению границ зерен, основы зерна и различных

фаз. В результате различные участки шлифа по-разному отражают лучи света, что и позволяет наблюдать в микроскоп структуру металлов и сплавов.

Получение четкого изображения микроструктуры обеспечивается механической регулирующей системой микроскопа, которая состоит из корпуса, предметного столика, макро- и микровинтов и тубуса. На предметный столик помещают шлиф исследуемой поверхностью вниз. Столик может перемещаться по взаимно перпендикулярным направлениям, позволяя рассмотреть структуру различных участков шлифа без изменения выбранного фокусного расстояния. С помощью макровинта можно выполнить грубую оптическую фокусировку. Точная фокусировка производится поворотом микровинта не более чем на один, пол-оборота в ту или иную сторону.

Экспериментальная часть

1. Определение цены деления окуляр-микрометра.

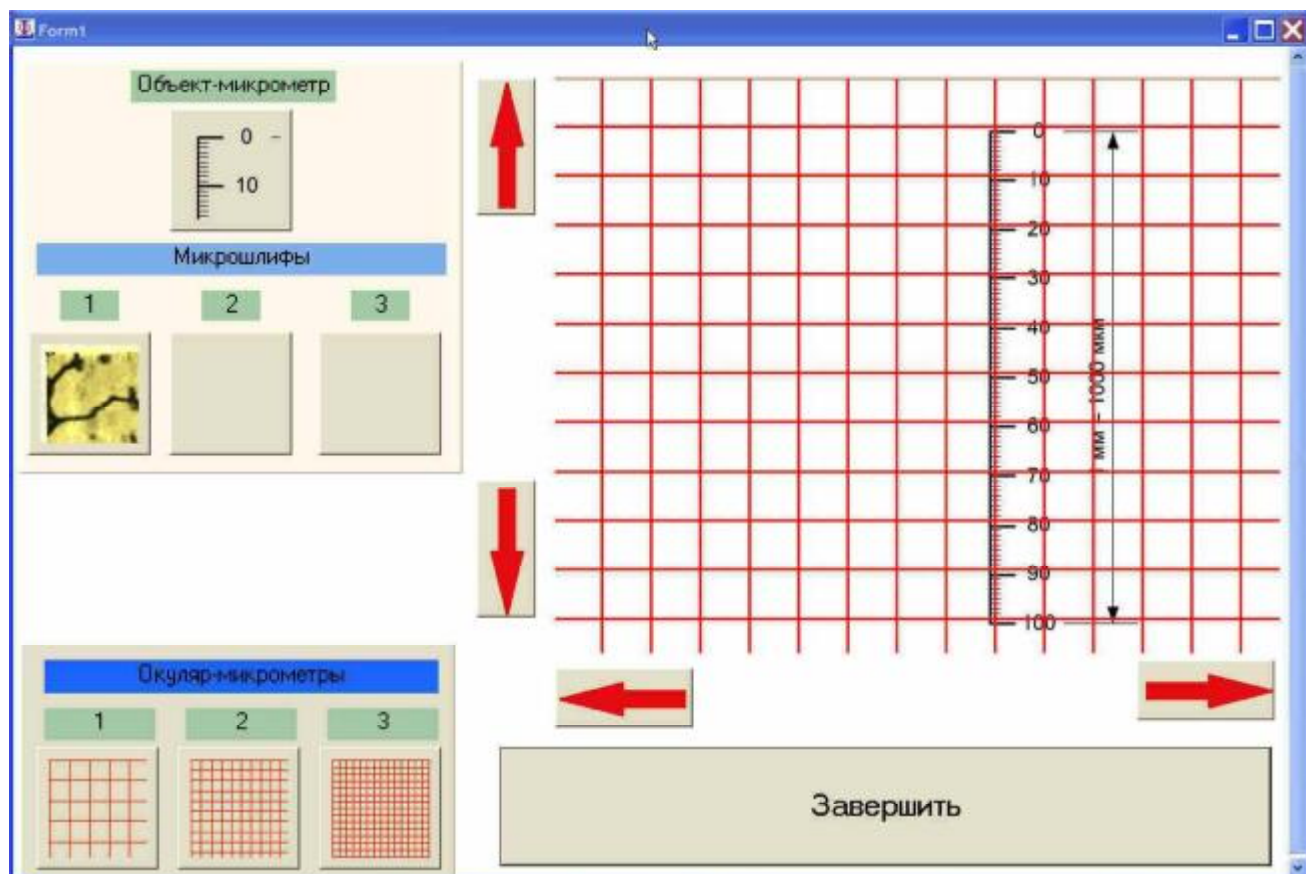
Микроанализ позволяет проводить не только качественное исследование структуры, но и количественную оценку структурных составляющих, например, измерение размеров зерен, определение глубины слоя и т.д. Для выявления размеров зерен используют объект- и окуляр-микрометры.

Объект-микрометр представляет собой стеклянную или металлическую пластинку с нанесенной на нее шкалой длиной в 1 мм с ценой деления 0,01 мм (10 мкм).

Окуляр-микрометр отличается от обычного окуляра лишь наличием стеклянной пластинки со шкалой, имеющей 100 делений. Цена деления окуляр-микрометра зависит от установленного в микроскопе объектива. Для определения цены деления окуляр-микрометра на предметный столик вместо шлифа устанавливают объект-микрометр и шкалы обоих микрометров совмещают.

Поочередно выбрав в программе управления микроскопом все три окуляр-микрометра, определите цену каждого из них.

Для перемещения отображаемой области используйте кнопки с красными стрелками «вверх», «вниз», «вправо», «влево».



Запишите полученные результаты в таблицу.

| № окуляр-микрометра | Цена деления, мкм | Площадь одной клетки окуляр-микрометра |
|---------------------|-------------------|--|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |

2. Определение размера зерна в сплаве

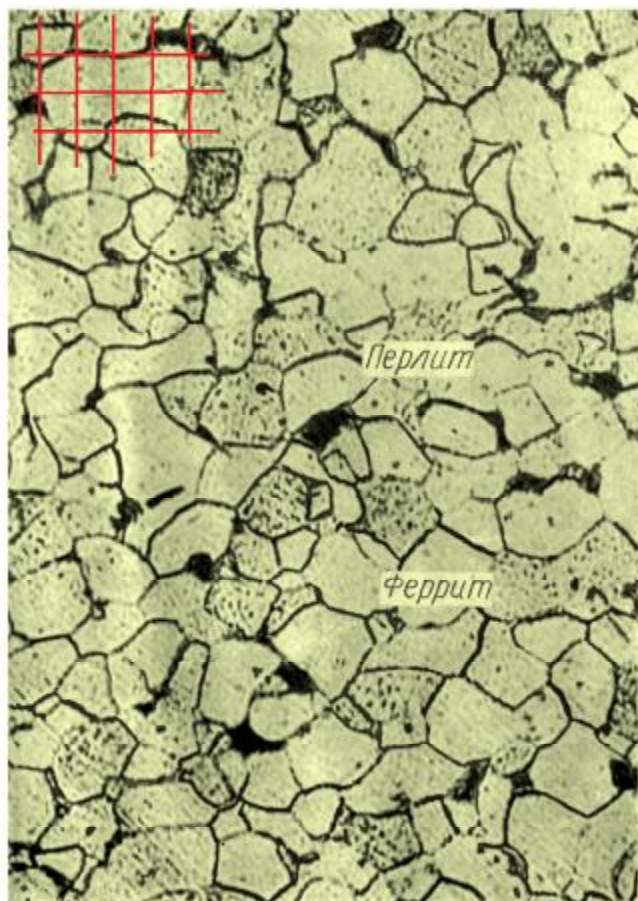
Зная цену деления *окуляр-микрометра*, можно с помощью микроскопа измерить размер видимого в объектив микрообъекта, например, размер зерна. Для этого на предметный столик вместо объект-микрометра необходимо поместить исследуемый микрошлиф, просмотреть всю его поверхность, выбрать наиболее характерные для исследуемого шлифа зерна:

- 3 зерна, которые можно считать крупными;
- 3 зерна, которые можно считать средними;
- 3 зерна мелких.

Старайтесь выбирать именно характерные зерна, т.е. если ищем крупные, то таких, каких достаточно много, а не 1 или 2 штуки на весь шлиф.

Далее нужно провести измерение площади выбранных зерен. Измерение получится очень приблизительным. Зерно неправильной формы придется представить прямоугольником, площадь которого приблизительно равна площади рассматриваемого зерна.

Например, для крупного зерна, выбранного на рисунке слева, площадь можно определить как 4 полные клетки в верхнем ряду и 4 неполные клетки площадью приблизительно 75% от полной. Тогда площадь зерна составит 7 полных клеток. Если ранее при определении цены деления мы выяснили, что сторона клетки равна 10 мкм, то площадь одной клетки составит 100 мкм². Отсюда можно заключить, что площадь выбранного зерна приблизительно равна 700 мкм².



Рассчитав площади всех 9 выбранных зерен, запишите результаты в таблицу.

| № зерна | Категория зерна | Площадь зерна, мкм ² | Средняя площадь | Класс зерна по таблице зернистости |
|---------|-----------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| 1 | крупное | | | |
| 2 | крупное | | | |
| 3 | крупное | | | |
| 4 | среднее | | | |
| 5 | среднее | | | |
| 6 | среднее | | | |
| 7 | мелкое | | | |
| 8 | мелкое | | | |
| 9 | мелкое | | | |

Затем нужно рассчитать среднюю площадь тройки крупных, тройки средних и мелких зерен. Далее с помощью таблицы нужно оценить балл зернистости исследуемого шлифа.

Табличная шкала включает восемь номеров зерен. Структура металла или сплава с преобладанием зерна № 1, 2, 3, 4 считается крупнокристаллической, с площадью зерна № 7, 8 – мелкокристаллической, с площадью зерна № 5, 6 – среднекристаллической.

Наилучшим результатом работы будет такой результат, когда для всех зерен получится одинаковый класс зернистости или, хотя-бы, номера классов будут очень близки, например крупные зерна принадлежат 5 классу, средние – 6, мелкие – 5, что позволит отнести изучаемую структуру к среднекристаллической.

Таблица зернистости

| Структура зернистости | Класс зернистости | Площадь зерна мкм ² | | |
|------------------------|-------------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | мелкого | среднего | крупного |
| крупно-кристаллическая | 1 | 40 000 | 64 000 | 80 000 |
| | 2 | 20 000 | 32 000 | 40 000 |
| | 3 | 10 000 | 16 000 | 20 000 |
| | 4 | 5 000 | 8 000 | 10 000 |
| средне-кристаллическая | 5 | 2 500 | 4 000 | 5 000 |
| | 6 | 1 200 | 2 000 | 2 500 |
| мелко-кристаллическая | 7 | 600 | 1 000 | 1 200 |
| | 8 | 300 | 500 | 600 |

По завершению работы оформите отчет, в котором отразите название, цель работы, кратко теорию эксперимента и описание оборудования, результаты эксперимента и, обязательно, выводы по работе.

Лабораторная работа №3

Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов

Цель работы: изучить методику построения диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.

1. Теоретические основы работы

1.1 Фазовый состав сплавов

Чистые металлы обладают низкой прочностью и не обеспечивают требуемых от материала свойств. Поэтому на практике чистые металлы не применяются. При производстве различных металлических изделий, деталей машин используют сплавы металлов. Сплавы получают сплавлением, т.е. разбавлением в жидком расплавленном состоянии двух или более металлов или металлов с неметаллами. Химические элементы, сплавлением которых образуется сплав, называются **компонентами** сплава. **Фазой** называют однородные составные части материала, имеющие одинаковый состав, кристаллическое строение и свойства, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от других частей поверхностью раздела.

В сплавах могут образовываться следующие фазы:

- жидкие растворы;
- твердые растворы;
- химические соединения.

Твердыми растворами называют фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других компонентов располагаются в решетке первого компонента. Твердый раствор имеет один тип решетки и представляет собой одну фазу. При образовании твердого раствора **замещения** атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя. В твердых растворах **внедрения** атомы растворенного компонента размещаются в междоузлиях решетки растворителя.

В химических соединениях компоненты соединяются за счет химической связи, обычно в результате химической реакции. Примерами таких соединений могут служить карбид железа, оксид меди, нитрид титана и т.д.

Фазовый состав сплава в удобной форме можно показать с помощью **диаграммы состояния** или **диаграммы фазового равновесия**. Эти диаграммы характеризуют окончательное состояние сплавов, т.е. полученное после того, как все превращения полностью закончились.

Закономерность изменения числа фаз в гетерогенной системе определяется правилом фаз. Это правило устанавливает зависимость между числом степеней свободы системы S , числом компонентов K и числом фаз Φ . Оно выражается уравнением:

$$S = K + 1 - \Phi$$

Под **числом степеней свободы** понимают возможность изменения температуры, без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Т.к. число степеней свободы не может быть отрицательным $S \geq 0$, то $K - \Phi + 1 \geq 0$, и тогда:

$$\Phi \leq K + 1.$$

Таким образом, из правила фаз следует, что число фаз в сплаве, находящемся в равновесном состоянии не может быть больше числа компонентов плюс единица. Например, в двойной системе в равновесии может находиться не более 3 фаз, в тройной – не более 4 и т.д.

При нагреве чистого металла переход из жидкого состояния в твердое состояние происходит при одной температуре, называемой **температурой плавления** металла. Эта же температура определяет противоположный процесс – процесс кристаллизации, - перехода из жидкого состояния в твердое состояние. При охлаждении расплавленного металла по достижению температуры плавления, начинают образовываться кристаллы твердого вещества. Это продолжается до тех пор, пока вся жидкая фаза не перейдет в твердое состояние.

Для сплавов процесс кристаллизации происходит по более сложному механизму.

В жидком состоянии большинство металлов неограниченно растворяются друг в друге, образуя однофазный жидкий раствор. Однако при охлаждении сплава скорость роста кристаллов в жидких растворах ниже, чем в чистых металлах.

1.2 Построение диаграммы равновесия двухкомпонентного сплава.

Чтобы построить диаграмму состояния двухкомпонентного сплава, проводят серию, например из 10 опытов, по охлаждению предварительно нагретого до жидкого состояния сплава с различным соотношением компонентов в его составе. Готовят исходные компоненты в твердом состоянии, например в гранулированной или порошкообразной форме, так, чтобы массовая доля компонента В в общей смеси была равна C_1 , например $C_{B1} = 0,1$ (10%), тогда концентрация компонента А составит $C_{A1} = 1 - C_{B1}$, в нашем случае $C_{A1} = 0,9$ (90%). Пока еще холодные гранулы А и В перемешивают и в специальной емкости, устойчивой к высоким температурам - тигле, ставят в печь. Далее смесь гранул нагревают до ее полного расплавления и получения однородной жидкой фазы. После небольшой выдержки жидкий расплав медленно охлаждают прямо в печи, выключив ее, и одновременно измеряют его температуру. Температура определяется через равные промежутки времени до полного затвердевания сплава. Откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат – соответствующую температуру, получают так называемую **кривую охлаждения**. Пример кривой охлаждения для чистого металла А ($C_{A1} = 100\%$, $C_{B1} = 0\%$) показан на рис. 1 а.

По графику а) видно, что до достижения температуры кристаллизации (плавления) температура чистого металла плавно снижается. Достигнув температуры плавления, ее снижение приостанавливается. Происходит процесс кристаллизации при постоянной температуре. Процесс кристаллизации - перехода вещества из жидкого состояния в твердое состояние является экзотермическим процессом. В момент кристаллизации выделяется столько тепла, что оно компенсирует снижение температуры в результате охлаждения. Только после того, как весь расплав затвердеет, температура начинает вновь снижаться за счет охлаждения теперь уже твердой фазы.

Кривая охлаждения для двухкомпонентного сплава показана на рис. 1 б). На ней можно выделить температуру начала процесса кристаллизации и температуру его окончания. Из-за наличия двух компонентов, которые плавятся при разных температурах, площадки с постоянной температурой здесь нет. Во время затвердевания температура продолжает медленно снижаться.

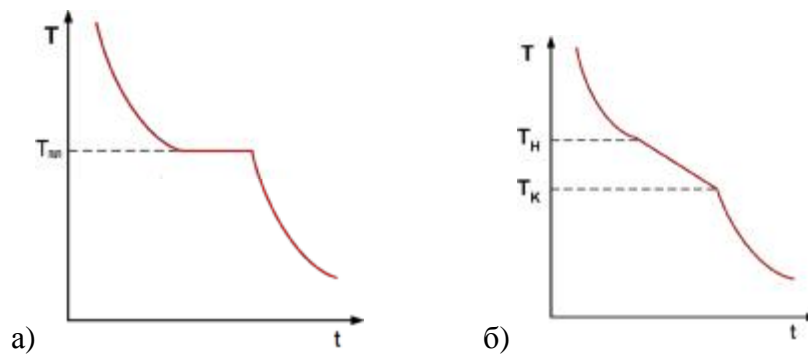


Рисунок 1 - Кривая охлаждения: а) чистого металла, б) сплава

Допустим, построено 7 кривых охлаждения для 7 разных концентраций компонента В в сплаве. Для чистых компонентов А и В ($C_{B1} = 0\%$, $C_{B7} = 100\%$) получаются кривые охлаждения с горизонтальными площадками. Если компонент В является более тугоплавким: его температура кристаллизации выше температуры кристаллизации компонента А. Остальные кривые получены при разных концентрациях компонента В в сплаве, например 10%, 30%, 50%, 70%, 90%. Проецируя температуры начала и конца кристаллизации на график зависимости температуры кристаллизации сплава от содержания в нем компонента В, получаем диаграмму состояния (рис. 2 справа).

Чем больше было проведено опытов с разными концентрациями компонентов, тем больше получится точек на диаграмме состояния и тем точнее она будет выглядеть.

Для некоторых сплавов на кривой охлаждения может получиться больше переломов, не только 2, как показано на рисунке 1 б). Эти точки тоже нужно зафиксировать. Они обозначают температуры, при которых происходят фазовые переходы уже в твердом состоянии.

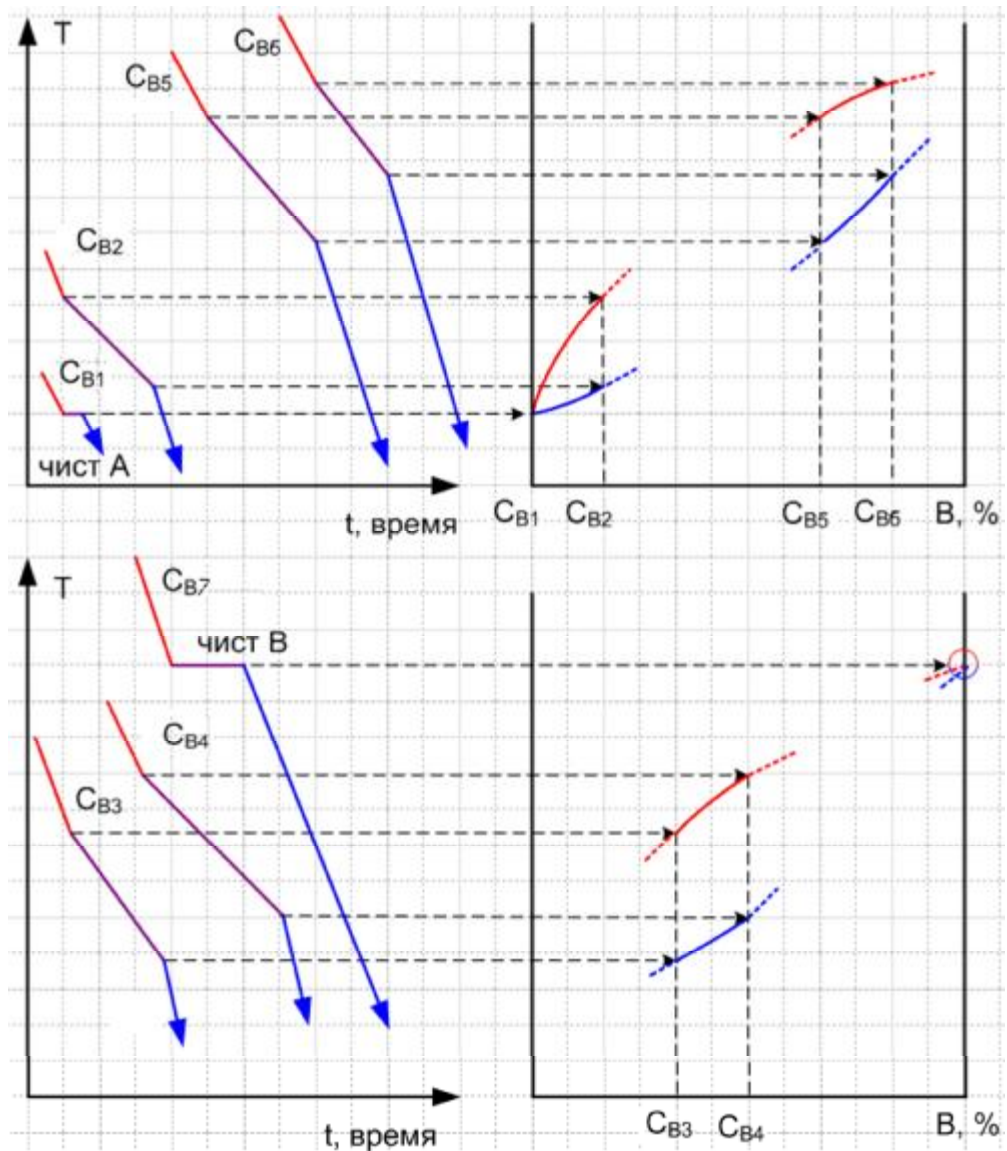


Рисунок 2. - Построение диаграммы состояния

1.3. Классификация двухкомпонентных сплавов по типу диаграммы состояния

Если построить диаграммы состояния множества различных сплавов можно заметить, что из-за некоторой схожести все они могут быть разделены на 4 группы (рисунки 3, 4, 5, а также 6 и 7).

Диаграмма, показанная на рис. 3, относится ко второму типу – типу диаграмм, которые характерны для сплава, компоненты которого растворимы в твердом состоянии при любой концентрации. На диаграмме состояния определяются две линии – линия **солидус** и линия **ликвидус**. *Солидус* – это нижняя линия. Она ограничивает область твердой фазы от области, в которой в равновесии существуют сразу две фазы – жидкая и твердый раствор. Верхняя линия *ликвидус* ограничивает область жидкой фазы.

Такой сплав в твердом состоянии состоит всего из одной фазы – α -раствора – твердого раствора компонента В в компоненте А (рисунок 3).

Сплавы с диаграммами второго типа встречаются редко. Для большинства бинарных сплавов растворимость компонентов в твердом состоянии невысока. Все существующие сплавы имеют свои диаграммы, которые можно отнести к одному из четырех классов:

- 1) диаграмма для случая полной нерастворимости компонентов в твердом состоянии;
- 2) диаграмма для случая неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 3) диаграмма для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 4) диаграмма для случая, когда компоненты сплавов образуют устойчивое химическое соединение.

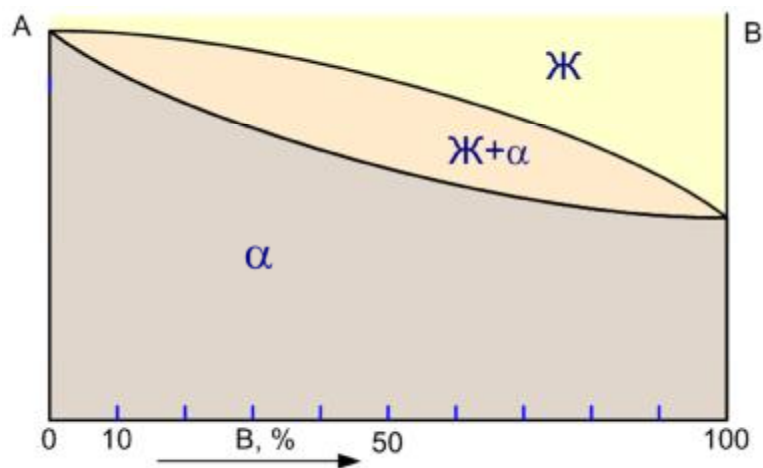


Рисунок 3. Диаграмма состояния сплава с полной растворимостью компонентов (диаграмма второго типа)
 α -раствор – это раствор компонента В в компоненте А.

1.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (диаграмма первого типа)

В жидком состоянии компоненты неограниченно растворяются друг в друге. Но в твердом состоянии для большинства сплавов растворимость ухудшается. В результате один из компонентов выпадает из истинного раствора в чистом виде. Есть и такие сплавы, в которых в твердом состоянии компоненты вообще не растворяются. Структура такого сплава перестает быть однородной и при рассмотрении в микроскоп можно увидеть зерна нескольких фаз. Такие сплавы имеют более сложную, по сравнению с рассмотренной на рис. 3, диаграмму состояния (рис. 4).

Между линиями ликвидус и солидус в равновесии находятся 2 фазы: жидкая и твердая - кристаллы компонента А в левой части диаграммы и кристаллы компонента В – в правой части.

Эвтектикой называют механическую смесь двух (и более – для многокомпонентных сплавов) компонентов (например А и В), одновременно кристаллизующихся из жидкого раствора. На рис. 4 эвтектика показана буквой Э.

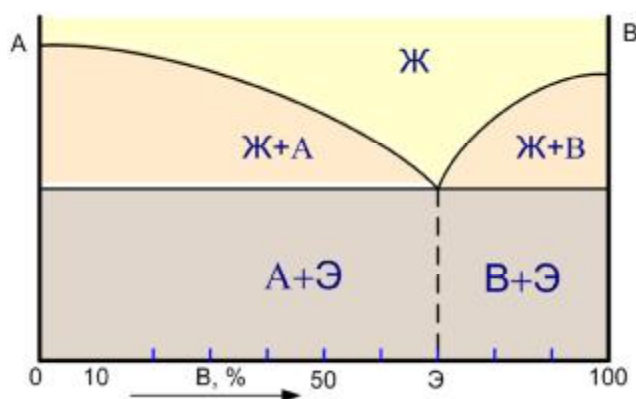


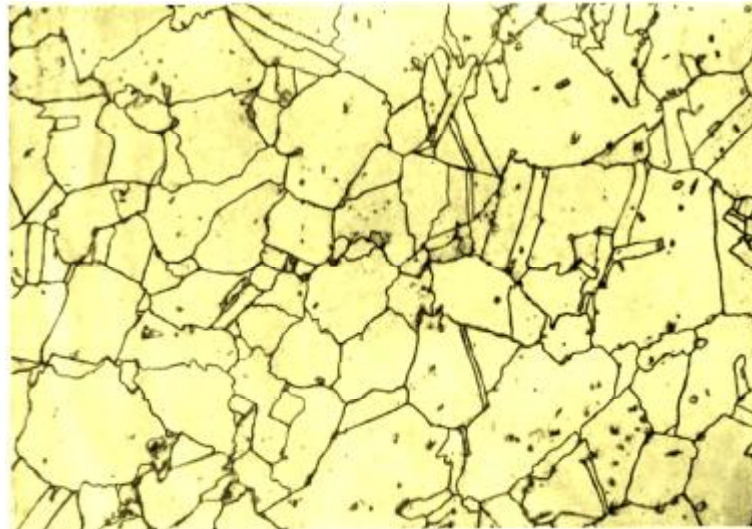
Рисунок 4 - Характерная диаграмма состояния для сплавов, компоненты которых не растворимы в твердом состоянии (диаграмма первого типа)

Сплав, состоящий только из эвтектики, называется **эвтектическим**. На рис. 4 концентрация эвтектического сплава обозначена буквой Э на оси абсцисс. Он кристаллизуется при постоянной и наиболее низкой для данной системы температуре; все остальные сплавы затвердевают в интервале температур

Сплавы находящиеся левее эвтектики называются **доэвтектическими**, правее эвтектики – **заэвтектическими**. Под микроскопом они выглядят по-разному. Пример, сплав свинец-сурьма тоже представляет собой механическую смесь. В твердом состоянии ни свинец, ни сурьма, друг в друге не растворяются вообще.

1.5. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма второго типа)

Диаграмма для сплавов такого типа показана на рис. 3. Такие диаграммы не имеют точки эвтектики. Компонент В полностью растворяется в компоненте А (или наоборот) и под микроскопом просматривается однородная структура, характерная для настоящих твердых растворов. Сплошная однородность нарушается только границами зерен, которые ориентированы произвольно в пространстве.



1.6 Диаграмма состояния сплавов, ограниченно растворимых в твердом состоянии (диаграмма третьего типа)

В жидком состоянии компоненты полностью растворяются друг в друге. В твердом состоянии растворимость сильно падает. В компоненте А растворяется только небольшое количество В. Излишки В при кристаллизации жидкого раствора выдавливаются за пределы зерен. Такие сплавы представляют собой механические смеси фаз с истинными твердыми растворами и нерастворенными компонентами.

а-раствором принято называть раствор компонента В в компоненте А. Он существует в левой части диаграммы состояния (рис. 5). **б-раствором** называют раствор компонента А в компоненте В. Он существует в правой части диаграммы.

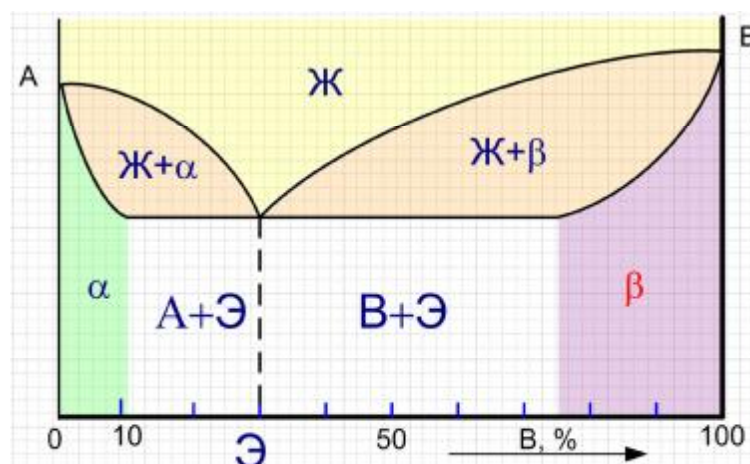


Рисунок 5 - Характерная диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии (диаграмма третьего типа)

Чистый α -раствор, также как и β -раствор, может существовать только, если концентрация растворенного вещества мала. Если она становится больше некоторого определенного значения в составе сплава появляется другой компонент и сплав становится механической смесью. Другой компонент появляется не в чистом виде, а виде альтернативного, например, β -раствора, смешанного с α -раствор в форме зерен эвтектики Э.

Для заэвтектических сплавов (после т. Э) наблюдается противоположная картина.

В областях диаграммы (крайняя левая и крайняя правая) кристаллизация происходит аналогично кристаллизации сплавов второго типа. Для сплавов, лежащих в центральной части диаграммы, кристаллизация происходит аналогично кристаллизации сплавов первого типа.

В некоторых сплавах после затвердевания тоже происходят фазовые превращения. Они происходят в результате распада твердого раствора по причине изменения растворимости компонентов в твердом состоянии. Кристаллизационные процессы образования новых фаз в твердом состоянии подчиняются тем же закономерностям, что и процессы кристаллизации из жидкости.

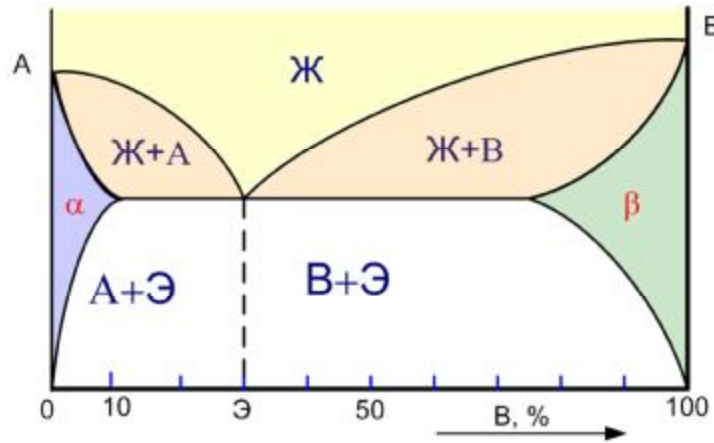


Рисунок 6 - Характерная диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии (диаграмма третьего типа, но с фазовыми превращениями в твердом состоянии)

1.7 Диаграмма состояния сплавов, компоненты которого образуют химическое соединение (диаграмма четвертого типа)

Диаграмма такого сплава показана на рис. 7.

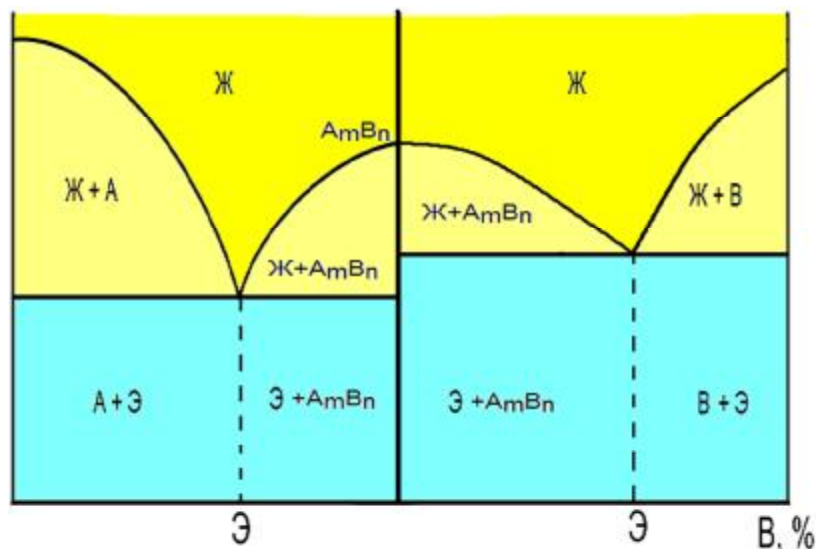


Рисунок 7 - Диаграмма состояния четвертого типа

Вертикальная линия по середине диаграммы соответствует химическому соединению A_mB_n , образуемому компонентами А и В, а точка на линии ликвидус — его температуре плавления. Эта точка называется сингулярной. На диаграмме имеются две эвтектические точки. Эвтектический сплав, соответствующий первой точке представляет механическую смесь кристаллов А и химического соединения A_mB_n а эвтектический сплав второй точки — механическую смесь кристаллов В и химического соединения A_mB_n . Кристаллизация сплавов по этой диаграмме происходит так же, как и кристаллизация сплавов первого типа, только в

данном случае образуется механическая смесь не компонентов А и В, а химического соединения A_mB_n и кристаллов компонента А и В.

Возможны и другие случаи, например, когда диаграмма состояния четвертого типа представляет собой двойную диаграмму состояния второго типа или одна часть диаграммы представляет диаграмму состояния первого типа, а вторая ее часть — диаграмму состояния второго типа и т. д.

2. Экспериментальная часть

Чтобы построить подробную диаграмму состояния двухкомпонентного сплава, нужно провести серию опытов с кристаллизацией расплавов с самой разной концентрацией исходных компонентов. Для каждого соотношения компонентов получается своя кривая охлаждения, на которой нужно найти точки начала и завершения процесса кристаллизации.

Чтобы провести один опыт, нужно сначала рассчитать количество компонента В и количество компонента А, которые нужно смешать, чтобы получить требуемое соотношение компонентов в сплаве. Затем гранулы этих компонентов перемешивают, помещают в тигель, устанавливают термopару. Тигель со смесью компонентов помещают в нагревательную печь. Терморегулятор печи устанавливают на требуемое значение температуры. Вилку печи включают в электрическую сеть и включают тумблер питания. Далее ожидают выхода печи на установленный температурный режим и полного расплавления металла.

После небольшой выдержки при постоянной температуре включают потенциометр, к которому подключены выходы термopары. Далее запускают механизм протяжки бумажной диаграммной ленты. Теперь измерительная система готова к работе.


Далее выключают тумблер питания нагревателя печи. Осторожно открывают дверцу печи и ждут полного остывания печи и сплава. Затем выключают потенциометр и снимают с потенциометра диаграмму с кривой охлаждения.

Полученную кривую охлаждения в определенном масштабе следует перерисовать в отчет о лабораторной работе. На этой кривой нужно определить температуру начала и конца кристаллизации.

Аналогичным образом проводятся остальные опыты и получается необходимое количество точек для построения диаграммы состояния сплава.

В лабораторной работе требуется выполнить только один реальный опыт с расплавлением бинарного сплава в муфельной печи. Остальные опыты проводятся с помощью компьютерной модели, что призвано сократить время выполнения работы.



Для начала работы с моделью с помощью ярлыка  запустите программу на выполнение.

В окне выбора компонентов и состава смеси задайте требуемые значения (рис. 8).

В окне задания температуры нагрева печи установите регулятор на значение, превышающее температуру плавления наиболее тугоплавкого компонента. Например, для сплава олово-свинец следует задать 350 °С.

Включите режим разогрева (рис. 9).

После завершения разогрева и набора нужной температуры, включите режим охлаждения.

Снижение температуры во времени в процессе охлаждения выводятся в табличную форму компьютерной модели. После снижения температуры до комнатной программа экспортирует табличные данные на лист табличного процессора MS Excel (рис. 10). По данным этой таблицы в табличном процессоре постройте кривую охлаждения (рис. 10).

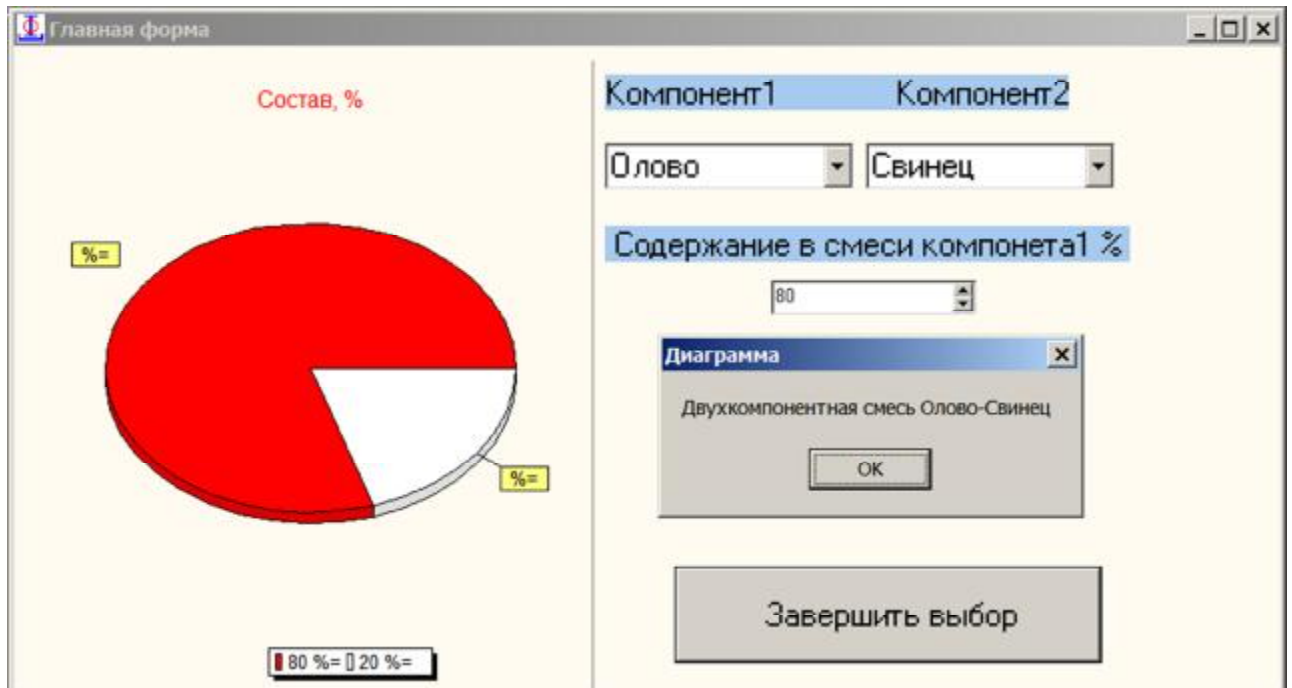


Рисунок 8 – Окно выбора компонентов и состава сплава



Рисунок 9 – Процесс разогрева печи в компьютерной модели

Из табличных данных и по кривой охлаждения определите точки начала процесса кристаллизации и его завершения. Например, для данных, показанных на рис. 8, это будет 15-ая и 19-минуты, которым соответствуют температуры 205 и 185 °С.

Повторите этот процесс необходимое число раз, чтобы заполнить табл. 1.

По полученным кривым охлаждения следует определить температуры начала и конца кристаллизации для каждого соотношения компонентов. Результаты измерений нужно поместить в табл. 1.

По данным табл. 1 постройте диаграмму состояния сплава. Построение можно выполнить с помощью мастера диаграмм табличного процессора MS Excel.

Сама диаграмма состояния должна быть помещена в отчет по лабораторной работе.



Рис. 10 – Табличные результаты и кривая охлаждения

Таблица 1

Данные для построения диаграммы состояния

| концентрация В в сплаве | температура кристаллизации | |
|-------------------------|----------------------------|-------------|
| | Т начала | Т окончания |
| 0% | | |
| 3% | | |
| 10% | | |
| 20% | | |
| 40% | | |
| 60% | | |
| 80% | | |
| 90% | | |
| 97% | | |
| 100% | | |

Сделайте выводы по работе.

В выводе отметьте:

- 1) К какому типу относится изучаемый сплав.
 - 2) Если на диаграмме определяется эвтектика, запишите ее концентрацию и температуру плавления.
 - 3) Запишите температуры плавления исходных компонентов.
 - 4) На диаграмме состояния в каждой области укажите состав фаз.
- Оформите отчет по работе.