

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТАЛЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных
технологий» очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 669.01
ББК 30.3
М34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «26» января 2026 г.,
протокол № 11

Составитель канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации к лабораторным работам предназначены для
студентов специальности 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе
трехмерных технологий» очной формы обучения.

Учебное издание

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Ответственный за выпуск

Д. И. Якубович

Корректор

И. В. Голубцова

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ...	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение ударной вязкости по методам Шарпи и Изода.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Определение твердости полимерных материалов дюрометром по шкале Шора.....	11
3 Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента трения конструкционных материалов	15
4 Лабораторная работа № 4. Макроанализ металлических изделий.....	21
5 Лабораторная работа № 5. Микроскопический метод исследования металлов и сплавов.....	27
6 Лабораторная работа № 6. Спектральный анализ химического состава сплавов	31
7 Лабораторная работа № 7. Анализ диаграмм состояния сплавов и использование их в технологической практике.....	35
8 Лабораторная работа № 8. Изучение зависимости между структурой и свойствами сплавов цветных металлов.....	42
Список литературы.....	48

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

1 К работе с учебным оборудованием допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторной работы.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Запрещается выполнять лабораторные работы на оборудовании и установках с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током.

4 Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования.

5 В лаборатории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

6 **Перед началом работы** необходимо провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе. Убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки.

7 Проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов и расходных материалов.

8 Обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

9 **При выполнении лабораторной работы** запрещается включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя, вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки.

10 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами технической эксплуатации соответствующего учебного оборудования.

11 **По окончании работы** необходимо отключить от электросети оборудование и приборы.

12 Убрать рабочее место.

13 В случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

1 Лабораторная работа № 1. Определение ударной вязкости по методам Шарпи и Изода

Цель работы: ознакомление с методами измерения ударной вязкости полимерных материалов; приобретение навыков измерения ударной вязкости методами Шарпи и Изода.

Оборудование и инструмент: маятниковый копер с компьютерным управлением Kason XJ-50Z, образцы полимерных материалов.

1.1 Общие положения

Данный метод, согласно ГОСТ 4647–2015 (ISO 179-1: 2010), применяют для оценки поведения образцов под действием ударных нагрузок посредством определения ударной вязкости образцов с надрезом и без надреза в пределах, установленных условиями испытания.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 4647–2015 (ISO 179-1: 2010) предусматривает использование образцов для испытания, которые могут быть изготовлены методами прессования, литья под давлением или экструзии, механической обработкой из готовых изделий, полуфабрикатов, слоистых пластиков и листов, полученных экструзией или литьем.

Другие факторы, такие как энергия маятника, скорость нанесения удара и условия кондиционирования образцов, также влияют на результаты испытания.

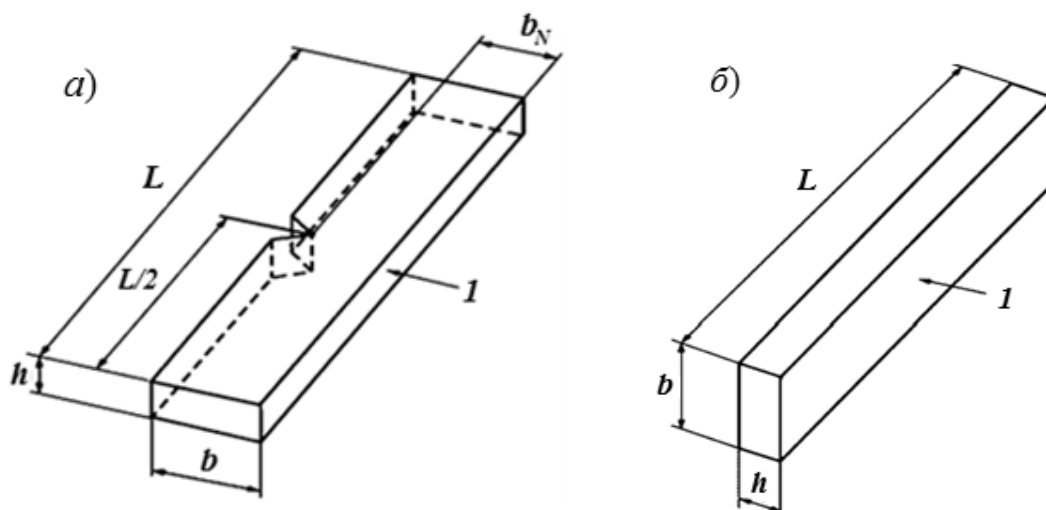
Результаты испытаний используют для контроля качества пластмасс и готовых изделий из пластмасс, для сравнения свойств пластмасс, а также при проведении исследовательских работ. Данный метод не рекомендуется применять для конструкторских расчетов.

Сущность метода заключается в испытании, при котором образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару маятника с постоянной скоростью (при ударе «плашмя» или «в ребро»).

Примечание – Направление удара по отношению к толщине h и ширине b образца обозначают как удар в ребро « e » и удар плашмя « f » соответственно.

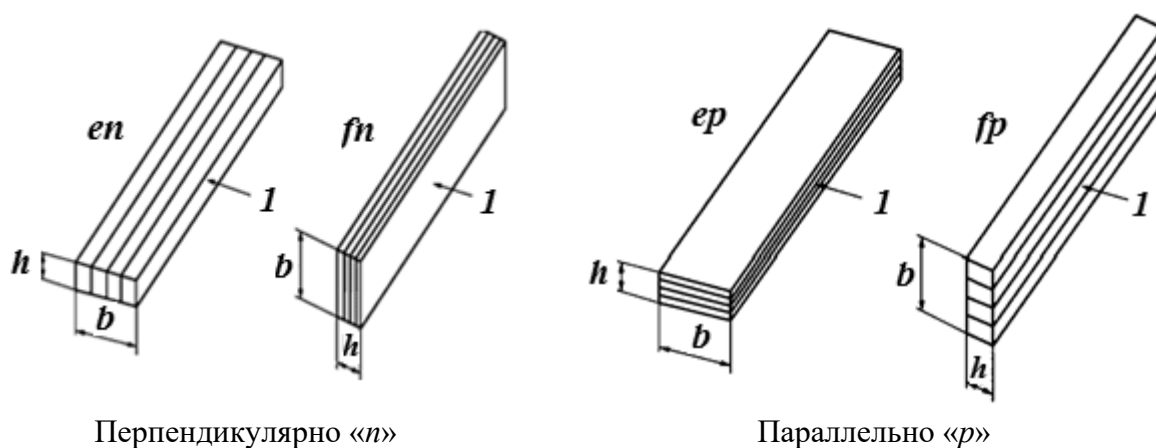
Обозначения перпендикулярного « n » и параллельного « p » удара устанавливают направление удара по отношению к плоскости слоистого листа (рисунки 1.1 и 1.2).

Испытания на удар по Шарпи « fn » и « ep » используют для изучения слоистых пластиков, а испытание на удар по Шарпи « en » и « ep » – для всех других материалов. Испытание на удар по Шарпи « fn » и « fp » используют для изучения материалов, проявляющих поверхностные эффекты.



a – в ребро «e»; *б* – удар плашмя «f»

Рисунок 1.1 – Удар по Шарпи



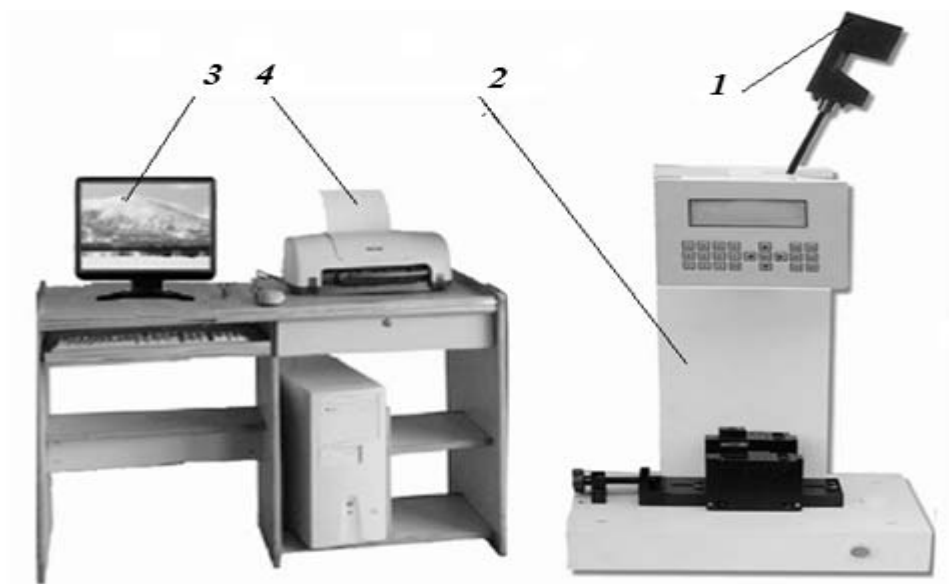
Перпендикулярно «n»

Параллельно «p»

Рисунок 1.2 – Схема обозначений, описывающих направление удара

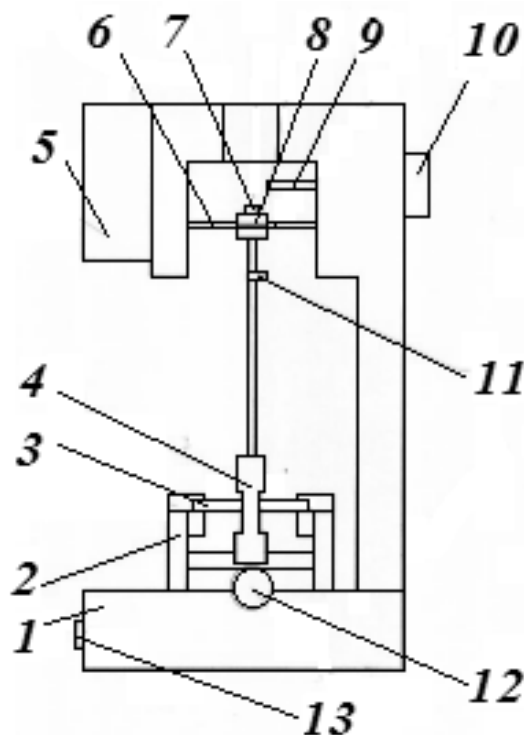
1.2 Оборудование

Для испытания используют маятниковые копры, обеспечивающие измерение энергии удара, затраченной на разрушение образца и определяемой как разность между первоначальным запасом потенциальной энергии маятника и энергией, оставшейся у маятника после разрушения испытуемого образца. В данной лабораторной работе используется маятниковый копер с компьютерным управлением Kason XJ-50Z (рисунки 1.3 и 1.4). Эта машина с широким спектром энергии удара, отличающаяся простотой конструкции, неприхотливостью в эксплуатации и высокой точностью испытаний.



1 – маятник; 2 – копер; 3 – компьютер; 4 – принтер

Рисунок 1.3 – Маятниковый копер Kason XJ-50Z



1 – рама; 2 – тиски; 3 – образец; 4 – маятник; 5 – панель управления; 6 – вал маятника; 7 – зажимной винт; 8 – втулка шарнира; 9 – фиксатор маятника; 10 – маятниковый электромагнит; 11 – кронштейн фиксатора маятника; 12 – маховик регулировки зазора; 13 – включатель

Рисунок 1.4 – Схема маятникового копра

1.3 Испытание по методу Шарпи

1.3.1 Подготовка к проведению испытания.

1 Перед испытанием образцы кондиционируют в соответствии с требованиями нормативного документа или технической документации на материал. При отсутствии таких требований рекомендуемые условия кондиционирования – атмосфера 23/50 по ГОСТ 12423.

2 Установить оснастку для испытаний по методу Шарпи. Выбрать маятник с соответствующим запасом энергии и такой скоростью, чтобы на разрушение образца было израсходовано не менее 10 % и не более 80 % запаса энергии маятника (таблица 1.1). Если этому требованию удовлетворяют характеристики нескольких маятников, выбирают маятник с наибольшим запасом энергии. Определить потери энергии маятника на трение и корректировать величину поглощенной образцом энергии в соответствии с ГОСТ 10708.

3 Установить центрирующую пластину на ударной кромке так, чтобы ударная кромка маятника вошла в надрез пластинки, затем настроить расстояние между опорами L . После регулировки снять центрирующую пластину.

4 Поставить испытуемый образец на наковальню, установить с помощью маховика II зазор между ударной кромкой маятника и образцом, равный 0,5 мм, и затянуть крепежный винт.

5 Настроить параметры испытаний на цифровом дисплее (рисунок 1.5).

Таблица 1.1 – Технические характеристики

Параметр	Значение
По Шарпи	
Скорость удара, м/с	2,9 и 3,8
Энергия маятника, Дж	1; 2; 4; 5; 7,5; 15; 25; 50
Расстояние до центра образца, мм	221, 380
Угол маятника	160
Момент удара, Н·м	Pd1 = 0,5155, Pd2 = 1,0311, Pd4 = 2,0622, Pd5 = 2,5777, Pd7,5 = 3,8662, Pd15 = 7,7324, Pd25 = 12,8888, Pd50 = 25,777
Расстояние между опорами, мм	40, 60, 70, 95
Угол ударного ножа, град	30
Ударный радиус режущей кромки, мм	$R = 2$
По Изоду	
Скорость удара, м/с	3,5
Энергия маятника, Дж	1; 2,75; 5,5; 11, 22
Расстояние до центра образца, мм	322
Угол маятника, град	160
Момент удара, Н·м	Pd1 = 0,5155, Pd2,75 = 1,4177, Pd5,5 = 2,8355, Pd11 = 5,6711, Pd22 = 11,3419
Расстояние между ножом и образцом, мм	22

Цифровой дисплей

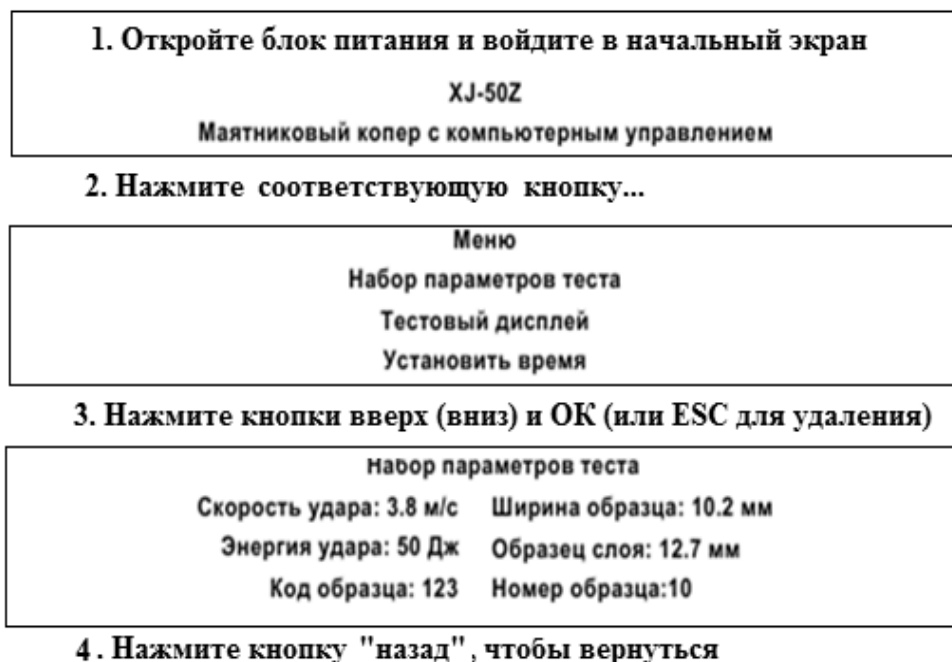


Рисунок 1.5 – Схема цифрового дисплея

1.3.2 Проведение испытаний.

Испытания проводят в тех же условиях, которые использовались для кондиционирования образцов, если в нормативном документе или технической документации на материал нет других указаний.

1 Поднять маятник вправо до удержания его фиксатором 9.

2 Для освобождения маятника нажать кнопку удара на панели 5, после совершения рабочего хода задержать маятник на отмашке слева для недопущения второго рабочего хода.

3 Записать значение пиковой потребляемой энергии, указанной на цифровом дисплее.

1.3.3 Обработка результатов.

Если используют удар «в ребро», указывают это в нормативном документе или технической документации на материал, если такие указания отсутствуют, используют удар «плашмя».

В расчет принимают результаты, полученные на образцах, разрушившихся полностью, или с разделением на части, удерживающиеся на тонкой пленке (нитке).

Если образец без надреза не разрушается, а проскальзывает между опорами маятникового копра, определяют показатель «сопротивление удару».

Ударную вязкость по Шарпи образца без надреза a_n или a_{cU} , кДж/м², вычисляют по формуле

$$a = \frac{A_n}{b \cdot h} \cdot 10^3,$$

где a – ударная вязкость, кДж/м²;

A_n – энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

За результат испытания принимают среднеарифметическое значение всех образцов.

В случае необходимости вычисляют стандартное отклонение и коэффициент вариации по ГОСТ 14359.

Все вычисленные значения округляют до двух значащих цифр.

1.3.4 Протокол испытания.

Протокол испытания должен содержать:

- ссылку на настоящий стандарт, обозначение испытуемого материала;
- дату и метод изготовления образцов, условия кондиционирования;
- тип и размеры образца, тип надреза, атмосферные условия в помещении испытания;
- количество испытанных образцов, тип маятникового копра;
- скорость удара, номинальный запас энергии маятника;
- место и направление вырезки образцов из анизотропных пластмасс;
- при испытании образцов слоистых пластиков – положение надреза и направление удара относительно расположения слоев;
- при испытании образцов, вырезанных из полуфабрикатов или готовых изделий – положение образца в изделии, из которого он вырезан;
- внешний вид образцов после испытания с указанием, разрушается образец или нет;
- значение определяемого показателя каждого образца;
- среднеарифметическое значение определяемого показателя и среднеквадратичное отклонение при его вычислении или результат определения показателя «сопротивление удару по Шарпи» при его определении.

При испытании литевых и экструзионных материалов могут происходить разрушения, которые подразделяют на четыре типа, обозначаемые буквенными символами (таблица 1.2):

1) C – полное разрушение: разрушение, при котором образец разделяется на две или несколько частей;

2) H – шарнирообразное разрушение: неполное разрушение, при котором обе части образца удерживаются вместе только тонким периферийным слоем в форме шарнира, имеющего низкую остаточную жесткость;

3) P – частичное разрушение: неполное разрушение, которое не подходит под определение шарнирообразного;

4) N – разрушения не произошло: образец проскальзывает между опорами, возможно в сочетании его «побелением» от напряжения.

Если образцы одной партии имеют разные типы разрушения, указывают число образцов и среднеарифметические значения ударной вязкости для каждого типа разрушения.

Таблица 1.2 – Представление результатов испытаний

Тип разрушения			Обозначение
C	P	N	
X	«	♦	xC^*
X	(P)	•	$xC(P)$
X	*	(W)	$xC(W)$
♦	X	♦	xP^*
(C)	X	•	$xP(C)$
♦	X	(W)	$xP(W)$
♦	«	N	N^*
(C)	*	N	$W(C)$
	(P)	N	$W(P)$
<i>Примечание</i> – В таблице использованы следующие обозначения: X – среднеарифметическое значение ударной вязкости для наиболее часто встречаемого типа разрушения, исключая тип N; C, P или N – наиболее часто встречающийся тип разрушения; (C), (P) или (N) – второй наиболее часто встречающийся тип разрушения записывают, если к нему относится более 1/3 разрушений; добавляют при наличии менее 1/3 разрушений			

1.4 Испытания по Изоду

Установить оснастку для испытаний по методу Изода, подготовить и провести испытания аналогично п. 1.3.

Задание

- 1 Установить образец на маятниковый копер, записать технические характеристики копра, провести испытание.
- 2 Составить протокол испытания.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите области применения и особенности методов Шарпи и Изода.
- 2 Перечислите составные части маятникового копра.
- 3 Укажите порядок проведения испытаний и составления протокола.

2 Лабораторная работа № 2. Определение твердости полимерных материалов дюрометром по шкале Шора

Цель работы: ознакомление с методом измерения твердости полимерных материалов; приобретение навыков измерения твердости полимеров дюрометром по шкале Шора типа D.

Оборудование и инструмент: прибор для измерения твердости по Шору TBP-DM, образцы полимерных листовых материалов.

2.1 Общие положения

Первоначально измерения твердости резин и пластмасс проводились методами Роквелла, Бринелля и Виккерса. Однако после снятия нагрузки эластичные материалы восстанавливали первоначальную форму, что затрудняло определение размера отпечатка индентора. Для измерения твердости полимерных материалов используют метод вдавливания конусных инденторов на приборах Шора (так называемых дюрометрах, от лат. *duro* – твердость). Метод является эмпирическим испытанием, предназначенным прежде всего для контроля данного показателя. Не существует простой зависимости между твердостью, определяемой с помощью описываемого метода, и каким-либо фундаментальным свойством испытываемого материала.

Для определения твердости пластмасс и эластомеров вдавливанием, согласно ГОСТ 24621–2015 (ISO 868–2003), применяют дюрометры двух типов: дюрометра типа А, применяемого для испытания более мягких пластмасс (полиуретаны, ПВХ, различные каучуки, резины, силиконы, неопрены, кожи и т. д.), и дюрометра типа D, применяемого для испытания эбонита, твердых резин и более твердых пластмасс (твердые полиуретаны, плексиглас, полистирол, полипропилен, лавсан, пластины из винилацетата и другие термопласты).

Рекомендуется при получении с помощью дюрометра типа А значений выше 90 испытания проводить с дюрометром типа D, а при получении с помощью дюрометра типа D значений меньше 20 испытания проводить с помощью дюрометра типа А.

Метод позволяет измерять глубину начального вдавливания, глубину вдавливания после заданных периодов времени или и то и другое вместе. Твердость при вдавливании обратно пропорциональна глубине вдавливания и зависит от модуля упругости и вязкоэластичных свойств материала. На получаемые результаты влияют форма индентора и прилагаемая к нему сила, поэтому между результатами, получаемыми при испытаниях с дюрометрами разных типов или другими приборами для измерения твердости, не может быть прямой зависимости.

2.2 Состав прибора

Устройство дюрометра представлено на рисунках 2.1–2.4.

В конструкцию механизированной модели дюрометра ТВР-DM входят следующие части:

- опорная поверхность с отверстием диаметром от 2,5 до 3,5 мм, центр которого находится на расстоянии не менее 6 мм от любого края опоры; индентор в виде закаленного стального стержня диаметром 1,10...1,40 мм, форма и размеры которого для дюрометров типа А показаны на рисунке 2.1, а для дюрометров типа D – на рисунке 2.2;

- индикаторное устройство дюрометра ТВР-D (рисунок 2.3), показывающее степень выдвижения конца индентора за пределы опорной поверхности в условных единицах в диапазоне от 0 (при полном выдвижении индентора, равном 2,50 мм) до 100 (при отсутствии выдвижения вообще, что происходит, когда опорную поверхность индентора прижимают к стеклянной пластинке);

- механический штатив с грузом 49 Н, обеспечивающий равномерное нагружение и получение большей точности измерений (рисунок 2.4).

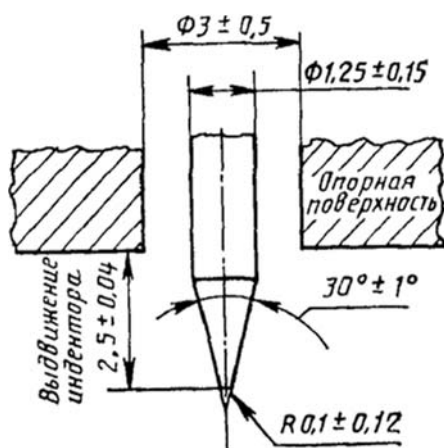


Рисунок 2.1 – Индентор дюрометра типа А

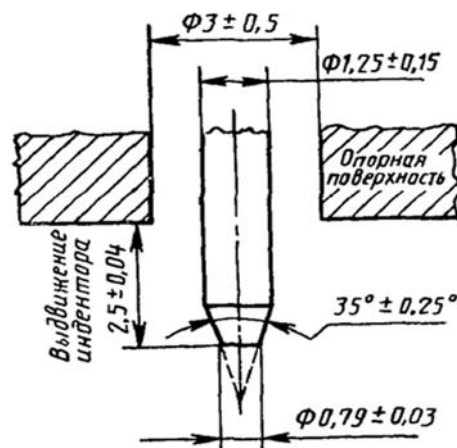


Рисунок 2.2 – Индентор дюрометра типа D



Рисунок 2.3 – Индикаторное устройство



Рисунок 2.4 – Механический штатив с дюрометром

2.3 Подготовка образцов

1 Толщина образца для испытания должна быть не менее 6 мм. Размеры образцов должны позволять проводить испытание на расстоянии не менее 12 мм от любого края. Поверхность образца в месте контакта с опорной поверхностью на площади радиусом не менее 6 мм от кончика индентора должна быть очень ровной. На кривых, неровных или шероховатых поверхностях нельзя получить удовлетворительные результаты измерения твердости с помощью дюрометра. Число образцов и их толщину указывают в нормативно-технической документации на материал. Образцы должны иметь ровную поверхность без раковин, вздутий, трещин и вмятин.

2 При испытании материалов, твердость которых не зависит от относительной влажности, дюрометр и образцы для испытания следует кондиционировать при температуре испытания в течение не менее 1 ч перед испытанием. При испытании материалов, твердость которых зависит от относительной влажности, образцы для испытаний следует кондиционировать согласно соответствующим стандартам на материал.

2.4 Последовательность проведения испытаний

1 Образец для испытания помещают на твердую горизонтальную ровную поверхность. При помощи рычага-зажима установите консоль штатива таким образом, чтобы игла-индентор дюрометра находилась над образцом на расстоянии около 10 мм (осторожно! консоль штатива с грузом весит около 6 кг и, падая на заготовку, может повредить иглу-индентор). Если расстояние будет большим, то игла не будет касаться образца во время нагружения.

Дюрометр устанавливают в вертикальном положении так, чтобы конец индентора находился на расстоянии не менее 12 мм от любого края образца. Быстро, но без толчка к образцу, прижимают опорную поверхность дюрометра, держа ее параллельно поверхности испытываемого образца. Снимают показания индикаторного устройства спустя 15 ± 1 с. Если необходимо произвести мгновенное измерение, то показание снимают в течение 1 с после прижатия опорной поверхности к образцу. В этом случае записывают максимальное значение, которое покажет красная стрелка – фиксатор дюрометра.

2 Проводят пять измерений твердости в разных местах поверхности образца, но на расстоянии не менее 6 мм от точки предыдущего измерения, и определяют среднее значение.

3 В протокол испытания следует записывать следующие данные:

- ссылку на настоящий стандарт;
- полную идентификацию испытываемого материала;
- описание образца для испытания, включая толщину и число слоев;
- температуру испытания и относительную влажность, если твердость испытываемого материала зависит от влажности (особенно важно соблюдение температурного режима $21\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 25\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- тип дюрометра D;

- если известно и если требуется, время, прошедшее с момента изготовления образца до момента измерения твердости;
- отдельные значения твердости и интервал времени, по истечении которого эти показания снимались. Показания можно записывать по следующей форме, твердость по Шору D/15:60 означает показание 60, полученное с помощью дюрометра типа D в течение 15 с или 60 HD;
- среднее значение твердости.

Задание

- 1 Подготовить образцы в соответствии с заданными размерами, проверить их состояние.
- 2 Установить образец на предметный столик штатива.
- 3 Провести необходимое количество испытаний.
- 4 Составить протокол испытания.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите области применения дюрометров Шора А и D.
- 2 Перечислите составные части дюрометра Шора.
- 3 Укажите последовательность проведения испытаний твердости пластмасс.

3 Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента трения конструкционных материалов

Цель работы: ознакомление с методом измерения фрикционных свойств материалов при их скольжении; приобретение навыков в работе с прибором для измерения коэффициента трения.

Оборудование и инструмент: измеритель коэффициента трения COF-01, образцы материалов.

3.1 Общие положения

Сила трения скольжения – сила, возникающая между соприкасающимися телами при их относительном движении.

По физике взаимодействия трение принято разделять на:

- сухое – когда взаимодействующие твёрдые тела не разделены никакими дополнительными слоями (смазками). Это очень редко встречающийся на практике случай (отличительная черта сухого трения – наличие значительной силы трения покоя);
- сухое с сухой смазкой (графитовым порошком);
- жидкостное – при взаимодействии тел, разделённых слоем жидкости или газа (смазки) различной толщины;

– смешанное – когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения;

– граничное – наиболее распространённый случай, когда в области контакта могут содержаться слои и участки различной природы (оксидные плёнки, жидкость и т. д.).

Величина, характеризующая фрикционные свойства поверхности, называется коэффициентом трения и обозначается чаще всего латинской буквой «*k*» или греческой буквой «*μ*».

Коэффициент трения – отношение силы трения к силе (обычно силе тяжести), действующей перпендикулярно поверхностям, находящимся в контакте. Этот коэффициент является мерой относительного усилия, с которым поверхность одного материала скользит по соприкасающейся поверхности такого же или другого материала.

Статический или начальный коэффициент трения связан с измеренной силой, необходимой для начала движения одной поверхности по другой. Кинетический коэффициент трения или коэффициент трения скольжения связан с силой, необходимой для поддержания такого движения.

В первом приближении величина силы трения скольжения может быть рассчитана по формуле

$$F_{mp} = kN,$$

где *k* – коэффициент трения скольжения;

N – сила нормальной реакции опоры.

Механизм возникновения сил трения представляет собой сложную физико-механическую проблему, рассмотрение которой показывает, что силы трения имеют электромагнитную природу и определяются характером взаимодействия атомов и молекул в соприкасающихся слоях. Коэффициенты μ_0 и μ зависят от состояния поверхностей соприкасающихся тел, их химической природы и практически не зависят от площади контакта тел. При малых скоростях относительного движения тел коэффициент μ не зависит от скорости. При увеличении скорости относительного движения μ вначале уменьшается, а затем начинает возрастать. Этот факт можно связывать с тем, что вначале при увеличении скорости выступы шероховатых поверхностей тел все меньше попадают в углубления на этих поверхностях (трение уменьшается). Затем с увеличением скорости происходит разрушение выступов и их измельчение (трение увеличивается).

У полимерных материалов существует ряд особенностей фрикционных свойств. Фрикционные свойства полимерных пленок представляют большой интерес при их использовании для упаковки.

Способность к скольжению в некоторых полимерах, например в полиэтилене, вызывается добавками. Эти добавки имеют разную степень совместимости с матричным материалом пленки. Некоторые из них выступают на поверхность, смачивая ее и делая более скользкой. Поскольку поверхностный налет может быть неоднородным по площади пленки, то результаты могут иметь ограниченную воспроизводимость.

Фрикционные свойства пленок могут зависеть от скорости скольжения соприкасающихся поверхностей, поэтому необходимо тщательно контролировать скорость перемещения.

Фрикционные свойства могут сильно зависеть от возраста пленки или листов и состояния их поверхностей. Свойство многих добавок образовывать скользящий поверхностный налет зависит от времени. Поэтому иногда не имеет смысла сравнивать характеристики трения пленок или листов, изготовленных в разное время, если только не стоит задача специально исследовать такой эффект.

Если материалы изготавливались по разной технологии или по одинаковой технологии, но на разных машинах, то качество их поверхности может зависеть от типа оборудования или его состояния. Эти факторы необходимо учитывать при оценке фрикционных свойств.

Кроме того, на статический коэффициент трения сильное влияние оказывают значения силы, сжимающие трущиеся поверхности, и время с момента приложения этой силы до момента начала испытаний.

Экспериментальные методы определения коэффициента трения скольжения:

- метод «движения тела по горизонтальной поверхности»;
- метод «наклонной плоскости».

3.2 Метод «движения тела по горизонтальной поверхности»

В соответствии со стандартом ISO 8295 для измерения статического и кинетического коэффициентов трения полимерных пленок методом «движения тела по горизонтальной поверхности» используется прибор COF-01. С помощью определяемых фрикционных характеристик можно контролировать качество герметизации упаковок и скорость упаковывания.

3.2.1 Состав прибора.

В состав прибора входят (рисунок 3.1) рабочая плоскость, зажим, блок скольжения, тензодатчик, принтер, сенсорный экран.

Рабочая плоскость – плоскость, предназначенная для расположения испытуемого образца.

Зажим – предназначен для удержания испытуемого образца.

Блок скольжения – квадратный стальной брусок, предназначенный для закрепления второго испытуемого образца и создания заданного прижимного усилия.

Тензодатчик – датчик, регистрирующий развиваемое усилие.

Принтер – предназначен для печати отчета об испытаниях.

Сенсорный экран – дисплей для установки параметров испытаний.

3.2.2 Последовательность проведения испытаний.

1 Подготовка образцов. Образец пленки, закрепляемый на рабочей плоскости, должен иметь размер 250×130 мм, второй образец, прикрепленный к блоку скольжения, должен быть квадратным со сторонами 120 мм. Все образцы

должны быть плоскими и недеформированными.

Техническая характеристика оборудования представлена в таблице 3.1.

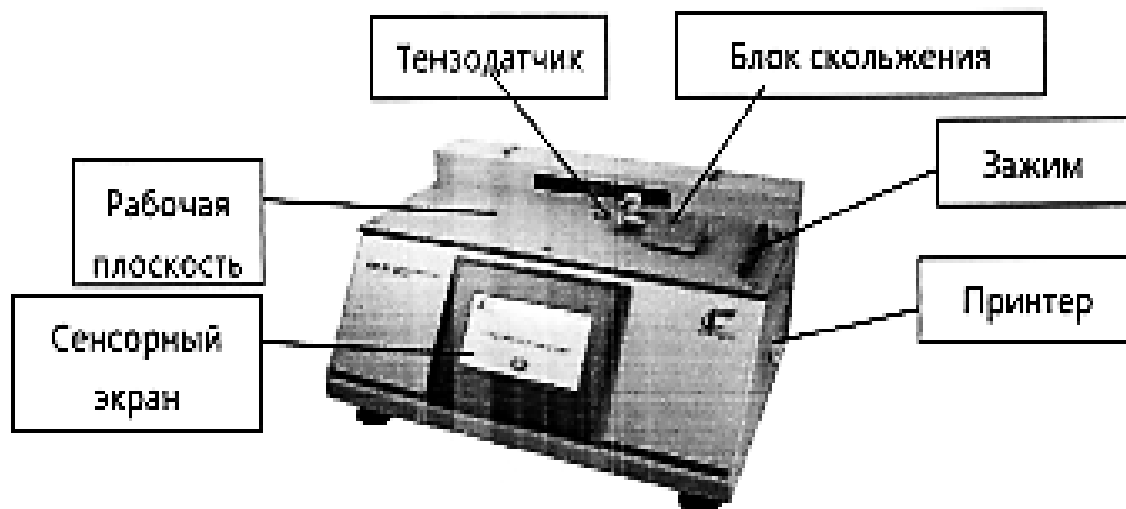


Рисунок 3.1 – Общий вид прибора

Таблица 3.1 – Техническая характеристика

Модель	COF-01
Диапазон силы, Н	0...5
Масса блока скольжения, г	200 ± 5
Скорость испытания, мм/мин	0...100
Источник питания	110...220 В, 50 Гц
Габаритные размеры, мм	$540 \times 380 \times 240$
Условия эксплуатации	Температура 10 °С...40 °С, относительная влажность 20 %...70 %

2 Закрепить образец на рабочей плоскости, для чего поднять зажим, вставить правый конец образца и опустить зажим. Если образец неровный или скрученный, левый конец необходимо зафиксировать на рабочей плоскости при помощи скотча.

3 Прикрепить скотчем края второго образца к блоку скольжения.

4 Установить параметры испытания с помощью сенсорного экрана:

- количество испытаний: *Num* – 3;
- масса блока скольжения: *Slid mass* – 200 г;
- период времени после нажатия кнопки до начала движения образца:

Adjust time – 15 с;

- скорость движения: *Speed* – 100 мм/мин.

5 Испытание. После установки параметров нажать кнопку *o* в правом нижнем углу для входа в основной интерфейс. Нажать кнопку *Test* и войти в раздел «Испытание». На сенсорном экране (рисунок 3.2) в соответствующих окнах будут отражаться следующие параметры:

- μ_s – значение статического коэффициента трения;

- μ_d – значение динамического коэффициента трения;
- δ, δ_d – значения стандартных отклонений статического и динамического коэффициентов трения соответственно;
- *Num* – номер текущего испытания и общее количество испытаний;
- *Slid mass* – масса блока скольжения;
- *Adjust time* – пауза до начала движения образца;
- *Speed* – скорость движения;
- *Force* – мгновенная сила, прикладываемая к блоку скольжения.

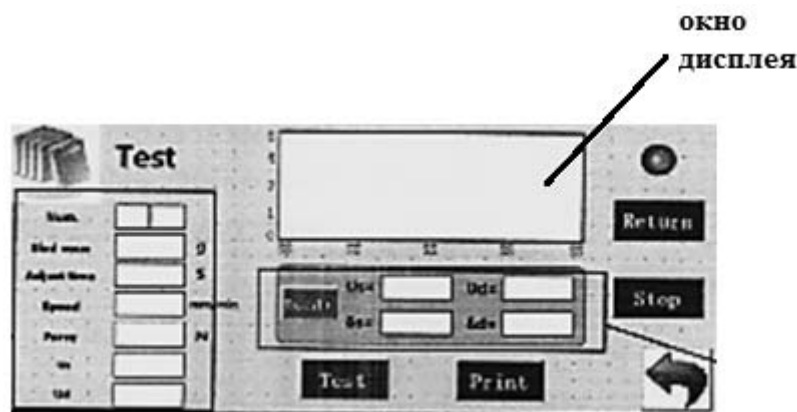


Рисунок 3.2 – Вид сенсорного экрана в режиме «Испытание»

В окне дисплея отражается график изменения коэффициента трения в реальном времени. Кроме того, на сенсорном экране находятся кнопки:

- *Test* – кнопка запуска испытания;
- *Print* – кнопка печати результатов испытания;
- *Return* – кнопка возврата тензодатчика в начальное положение;
- *Stop* – остановка тензодатчика в любой момент.

6 Провести испытание и записать результаты. После каждого испытания блок скольжения должен быть снят перед возвращением тензодатчика. Для возвращения тензодатчика нажать на кнопку *Return*. Когда тензодатчик вернется в исходное положение, снова установить блок скольжения на тензодатчик и повторить испытание.

3.3 Метод «наклонной плоскости»

Для определения статического коэффициента трения скольжения μ_s положим тело А на наклонную поверхность В, угол наклона которой к горизонту можно менять (рисунок 3.3). Зафиксируем угол наклона плоскости к горизонту α в тот момент, когда тело А начинает скользить по наклонной плоскости или двигаться по ней с постоянной скоростью.

На рисунке 3.3 изображены силы, действующие на тело А.

Тело начинает скользить по наклонной плоскости, значит, в предельном случае $F_{тр} = F_{ск}$, где $F_{тр}$ – сила трения скольжения; $F_{ск}$ – скатывающая сила. Из схемы действия сил видно, что $F_{тр} = F_{ск} = mg \sin \alpha$; $N = mg \cos \alpha$.

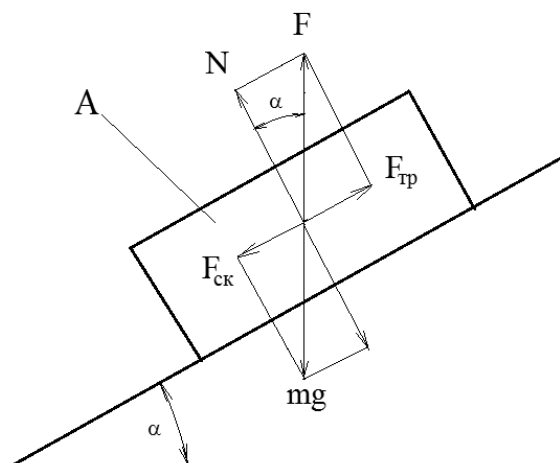


Рисунок 3.3 – Схема сил, действующих на тело, находящееся на наклонной плоскости

Тогда

$$\mu_s = \frac{F_{mp}}{N} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Таким образом, коэффициент трения μ_s равен тангенсу угла α наклонной плоскости, при котором тело А начинает скользить по наклонной плоскости.

Задание

- 1 Подготовить образцы в соответствии с заданными размерами.
- 2 Закрепить образцы на рабочей плоскости и блоке скольжения.
- 3 Установить параметры испытания с помощью сенсорного экрана.
- 4 Провести необходимое количество испытаний.
- 5 Записать:
 - значение статического коэффициента трения μ_s ;
 - значение динамического коэффициента трения μ_d ;
 - значения стандартных отклонений статического и динамического коэффициентов трения δ и δ_d соответственно.
- 6 Определить статический коэффициент трения скольжения методом «наклонной плоскости» и сравнить с результатами, полученными методом «движения тела по горизонтальной поверхности».

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные виды трения.
- 2 Укажите факторы, влияющие на фрикционные свойства полимеров.
- 3 Перечислите составные части прибора COF-01.

4 Лабораторная работа № 4. Макроанализ металлических изделий

Цель работы: ознакомление с методикой проведения макроскопического анализа; изучение поверхностей деталей, изломов, макрошлифов; выявление макродефектов и причин разрушения металлов; приобретение навыков зарисовки макроструктур.

Оборудование и инструмент: образцы отливок, поковок, деталей машин, набор оптических луп.

4.1 Макроанализ излома металла

По виду излома устанавливают характер и причины разрушения изделия, неоднородность структуры, обусловленную термической и химико-термической обработкой (толщину цементованного, закаленного, обезуглероженного слоя), и другие особенности строения.

Хрупкий излом имеет кристаллическое строение. В нем обычно можно видеть форму и размер зерен металла. Такой излом проходит или по границам зерен (межкристаллический), или по зернам (транскристаллический). Их разновидностями являются нафтелинистый (рисунок 4.1) и камневидный (рисунок 4.2).

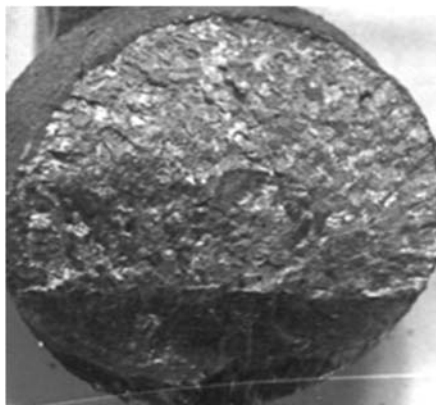


Рисунок 4.1 – Нафтелинистый излом

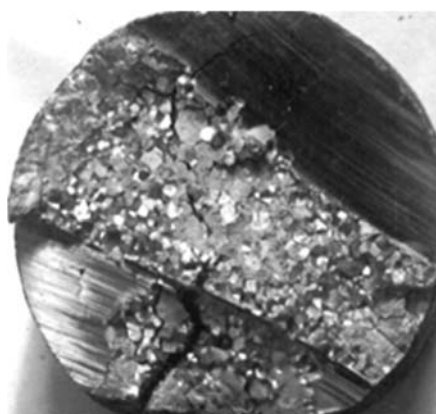


Рисунок 4.2 – Камневидный излом

Вязкий излом имеет волокнистое строение. Из-за значительной степени пластической деформации форма и размеры зерен не различаются.

Усталостный излом имеет две зоны разрушения: усталостную с мелкозернистым, фарфоровидным, часто ступенчато-слоистым строением, иногда с отдельными участками блестящей гладкой поверхности и зону обычного (вязкого или хрупкого) разрушения.

4.2 Дефекты макроструктуры

Центральная пористость (усадочная) в непрерывно-литой заготовке (рисунки 4.3 и 4.4). Причины возникновения: не обеспечивается достаточное поступление жидкого металла в объемы, где заканчивается затвердевание.

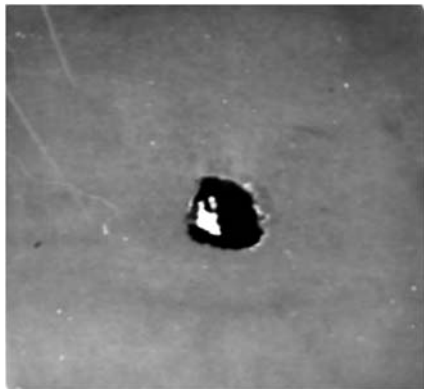


Рисунок 4.3 – Единичная пора

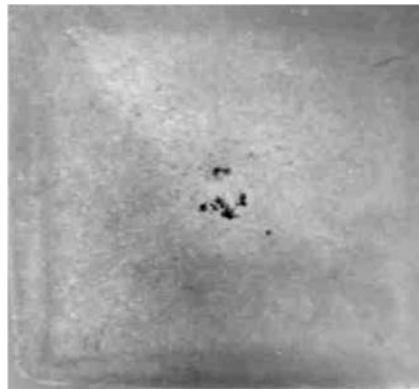


Рисунок 4.4 – Скопление пор

Предупреждение: оптимальная температура металла при разливке, соблюдение скорости разливки.

Примечание – Если усадочные поры не вскрыты, то при горячей деформации они завариваются.

Усадочная раковина – полость, возникающая в прибыльной части слитка вследствие усадки стали. При неполном удалении прибыли остатки усадочной раковины переходят в прокат. Выявляются в изломе в виде темных полос, расслоений, стенки которых содержат неметаллические и шлаковые включения.

Пористость по оси – мелкие пустоты, не заварившиеся при горячей обработке давлением слитка (рисунок 4.5). На макрошлифе пористость выявляется в виде темных точек различного размера. Развитие дефекта определяется количеством и размерами отдельных пор. Пористость оценивается соответствующим баллом.

Пористость по сечению – мелкие травящиеся точки, расположенные по всему сечению макрошлифа (рисунок 4.6).



Рисунок 4.5 – Пористость по оси

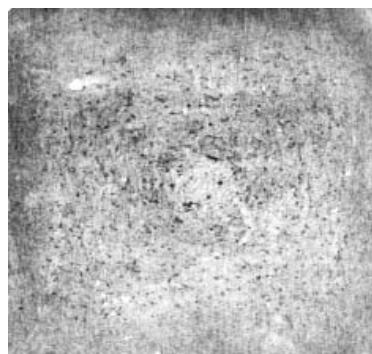


Рисунок 4.6 – Пористость по сечению

Причины возникновения: недостаточное раскисление стали, при быстром затвердевании из расплава не полностью удалились газы.

Подкорковые пузыри представляют собой внешний «контур» газовых раковин, характерный для кипящих сталей. Расположены очень близко к поверхности и обнажаются при нагреве слитка и последующей прокатке в виде дефектов округлой или овальной формы.

Пустоты различной величины и формы, чаще одиночные, образуются вследствие раскрытия и неполной заварки термических трещин и называются скворечниками. Вокруг дефекта отсутствуют ликвация углерода, серы и фосфора, а также неметаллические включения.

Ковочные трещины. Неверный режим ковки может вызвать появление ковочных трещин, которые появляются внутри заготовки около осевой зоны в виде трещин по диагоналям (ковочного креста) либо нескольких трещин, направленных от оси заготовки в стороны.

Рванины – раскрытые разрывы, образовавшиеся вследствие пониженной пластичности металла, расположенные поперек направления деформации (см. образец). Причиной понижения пластичности может являться перегрев металла или слишком низкая температура заготовки при горячей обработке металлов давлением (ОМД). Дефекты имеют вид разветвленных разрывов с окисленной поверхностью.

Осевые интеркристаллитные трещины, в отличие от ковочных, более прямолинейные и широкие. В изломе межкристаллитные трещины имеют вид грубых окисленных расслоений. Вследствие чрезмерного повышения температуры, вызывающего диффузию кислорода вдоль границ зерен, возникает явление пережога. На темплете пережог выглядит в виде сильно разветвленных трещин, часто расположенных в виде сетки (рисунок 4.7). В процессе горячей пластической деформации при пережоге может произойти разрушение по границам зерен. Такой вид дефекта называется *черновиной*, которая на макрошлифе выявляется в виде рыхлой, сильно травящейся зоны.

Внутренние трещины от напряжений обусловлены чрезмерно высокими внутренними напряжениями, возникающими в процессе формирования заготовки, и пониженной прочностью и пластичностью стали в различных температурных интервалах. Степень развития трещин зависит от величины напряжений, а также от содержания в металле вредных примесей.

Диагональные трещины в отливках (рисунок 4.8) возникают вследствие неравномерного охлаждения слитка в кристаллизаторе.

Трещины, расположенные перпендикулярно к поверхности заготовки, возникают из-за резкого охлаждения, из-за высоких напряжений, появляющихся при деформации поверхности заготовки.

Меры предупреждения: регламентировать содержание вредных примесей в металле, соблюдать температурный интервал разливки, оптимизировать процесс ОМД (не превышать предельно допустимые значения скорости и степени деформации).

Примечание – Трещины, не выходящие на поверхность заготовки, в дальнейшем завариваются при горячей деформации, т. к. границы их не окислены.

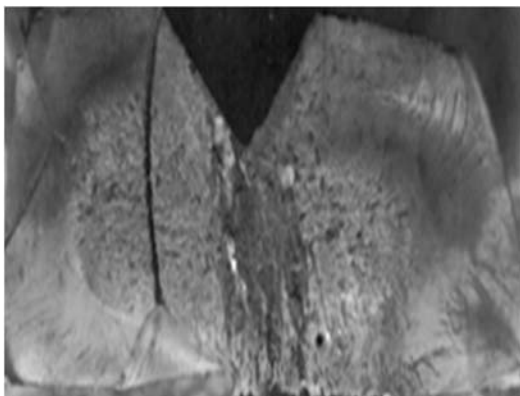


Рисунок 4.7 – Пережог

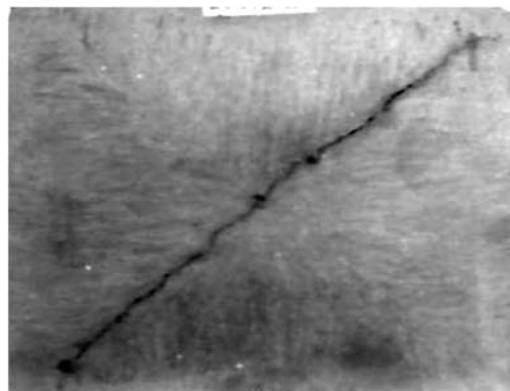


Рисунок 4.8 – Диагональные трещины

Флокены – тонкие извилистые трещины длиной до 30 мм, образующиеся в стали при повышенном содержании водорода (рисунок 4.9). В изломе флокены выявляются в виде округлых или эллиптических пятен серебристого или светлого оттенка. При последующей горячей деформации в заготовке могут образоваться скворечники от флокенов (рисунок 4.10).

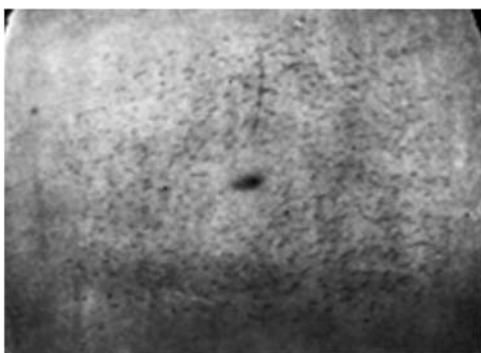


Рисунок 4.9 – Флокены

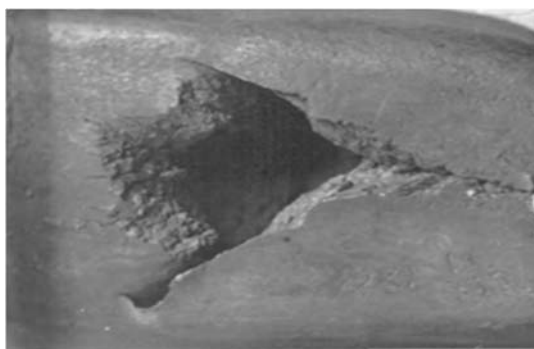


Рисунок 4.10 – Скворечник

Шлифовочно-травильные трещины являются результатом слишком сильного прижима металла при шлифовании очень твердым абразивным кругом и недостаточного охлаждения металла. Они имеют вид сетки, расположенной перпендикулярно к направлению шлифовки.

Свищи в прокате представляют собой крупные газовые включения, располагающиеся отдельно или группами по сечению заготовки. Выявляются в виде отдельных крупных пустот и пор круглой, овальной или вытянутой формы (рисунок 4.11).

Инородные металлические или неметаллические включения – кусочки различного рода нерастворившихся ферросплавов, утеплительных засыпок, шлака или случайно попавших в слиток частичек окисленного металла. Имеют различную с основным металлом травимость. В прокате обнаруживаются в виде волосовин (рисунок 4.12), неправильных по форме полостей, заполненных и окруженных неметаллическими включениями (рисунок 4.13), расслоений (рисунок 4.14). Классификация дефекта подтверждается анализом химического состава и макроструктуры.

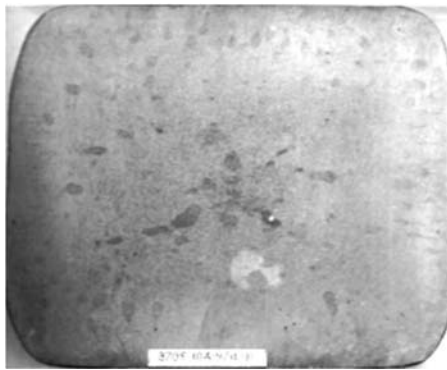


Рисунок 4.11 – Свищи



Рисунок 4.12 – Волосовины

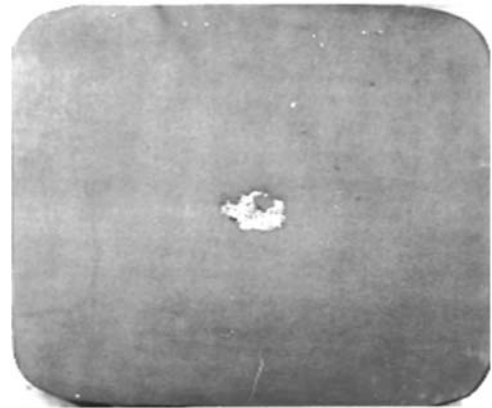


Рисунок 4.13 – Включения шамота

Ликвация – неоднородность отдельных участков металла по химическому составу и структуре.

Ликвационный квадрат представляет собой контуры ликвации, определяемые конфигурацией слитка (рисунок 4.15). На темплете выглядит в виде полоски металла, травящейся более интенсивно, чем остальная часть макрошлифа. В прокате можно также наблюдать ликвационный круг.



Рисунок 4.14 – Расслоения

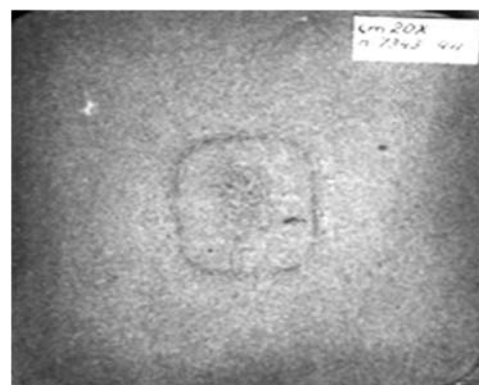


Рисунок 4.15 – Ликвация

4.3 Дефекты поверхности

Трещины от напряжений – угловые, поперечные, продольные – обусловлены, соответственно, искажением профиля, высокой скоростью разливки металла, высоким содержанием вредных примесей, неравномерным затвердеванием, трением слитка в кристаллизаторе и другими причинами, вызывающими высокие термические и фазовые напряжения.

Газовые поры возникают из-за избыточной влажности, газовыделения формы или смазки кристаллизатора, недостаточной раскисленности стали.

Загрязнения на поверхности заготовки, вкатанные металлические и неметаллические частицы – скопления неметаллических включений в виде пристывших, прикатанных кусочков шлака, металла или инородных частиц, попавших в металл вследствие размыва огнеупоров ковша, переполнения металла в калибрах.

Отслоения возникают на поверхности проката из-за наличия газовых пузырей, неметаллических включений, усадочной раковины и т. д.

Раскатанные дефекты имеют вид прямолинейных продольных групповых трещин на поверхности проката; *продольные трещины* подобны предыдущему дефекту, но более грубые, чаще одиночные (стенки покрыты окалиной и обезуглерожены); *корочки* выглядят в виде частичного местного отслоения металла или разрывов поверхности.

Рябизна – углубления от вдавленной окалины, образовавшиеся при ковке, прокатке или правке металла.

Закат – прикатанный продольный выступ металла с одной или двух диаметрально противоположных сторон, образовавшийся в результате вдавливания уса, подреза.

4.4 Дефекты формы

Раздутие (выпуклость) заготовки возникает из-за деформации корки заготовки под действием статического давления жидкого металла при недостаточном охлаждении в кристаллизаторе или при износе его гильз.

Отклонения от формы – овал (вместо окружности), не квадратность и др.

Усы – продольные выступы на поверхности профилей проката, возникающие из-за неправильной калибровки, износа калибра, низкой температуры деформируемого металла.

В сварных соединениях могут иметь место следующие дефекты: горячие трещины, холодные трещины, газовая пористость, зоны несплавления, непровары, подрезы, наплывы, прожоги и др.

Задание

- 1 Изучить сущность, возможности и методы макроанализа.
- 2 Изучить основные виды макродефектов заготовок, сварных соединений и готовых изделий.
- 3 Определить и описать вид излома предложенного образца.

4 Для выданного образца (выдаются по бригадам или индивидуально):

- зарисовать дефект и определить его вид (дать описание);
- установить причину возникновения дефекта;
- дать рекомендации для устранения дефекта;
- описать влияние дефекта на эксплуатационные характеристики металлоизделий.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определения основным видам дефектов.
- 2 Укажите причины возникновения типовых дефектов.
- 3 Чем отличаются различные виды трещин?
- 4 Как влияют типовые дефекты на эксплуатационные свойства изделий?

5 Лабораторная работа № 5. Микроскопический метод исследования металлов и сплавов

Цель работы: изучение устройства металлографического микроскопа и приобретение практических навыков работы на нем; проведение микроанализа сплавов; приобретение навыков зарисовки простейших микроструктур.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1 на базе металлографического микроскопа ЛабоМет-1, объект-микрометр, микрошлифы сталей.

5.1 Общие положения

Микроскопический метод исследования металлов и сплавов позволяет изучить структуру металла при помощи микроскопа на специально подготовленных образцах.

Для микроскопического исследования структуры металлов используются металлографические микроскопы, которые рассматривают предметы в отраженном свете и могут использоваться для исследования строения непрозрачных предметов (металлов, пластмасс, металлокерамики и т. д.).

5.2 Оптическая схема микроскопа

Лучи от источника света *1* (рисунок 5.1) проходят через коллектор *2*, теплофильтр *3*, осветительную линзу *4*, диафрагму *5*, отражаются от плоскопараллельной полупрозрачной пластины *6* и направляются через объектив *7* на объект исследования *8*. Лучи, отраженные от поверхности объекта, снова проходят через объектив, который совместно с линзой *9* проецирует изображение объекта в фокальную плоскость окуляров *10*. С помощью призмы *11* изменяется

направление оптической оси микроскопа. Призмный блок 12 бинокулярной насадки разделяет пучок лучей и обеспечивает возможность бинокулярного наблюдения объекта.

При наблюдении в поляризованном свете дополнительно используют анализатор 13 и поляризатор 14. Для повышения контрастности изображения применяют светофильтр 15.

Общий вид микроскопа ЛабоМет-1 представлен на рисунке 5.2.

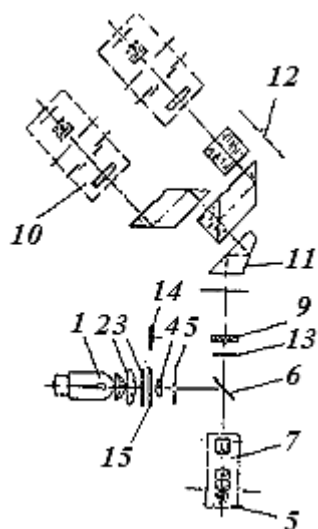


Рисунок 5.1 – Оптическая схема микроскопа

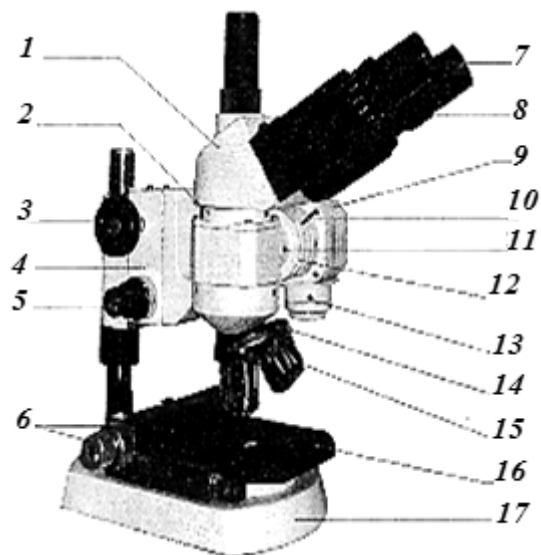


Рисунок 5.2 – Общий вид микроскопа ЛабоМет-1

В состав микроскопа входят осветитель отраженного света 9, штатив с механизмами фокусировок 4, револьверное устройство 14, предметный столик 16, тринокулярная насадка 1 и блок питания осветителя. Грубая фокусировка (перемещение штатива по вертикали) производится вращением рукоятки 3, точная фокусировка – вращением рукоятки 5.

Револьверное устройство обеспечивает установку в рабочее положение трех сменных объективов 15, имеющих увеличение 4, 10, 40. Предметный столик позволяет перемещать объект в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью рукояток 6.

Объектив представляет собой систему линз, обращенных к рассматриваемому объекту. Он дает обратное увеличенное действительное изображение объекта.

Окуляр – это система линз, обращенных к глазу наблюдателя. Окуляры дают мнимое увеличенное изображение, полученное объективом.

Общее увеличение, которое дают микроскопу совместно объектив и окуляр при визуальном наблюдении, определяется как

$$V = V_{об} \cdot V_{ок},$$

где $V_{об}$ – увеличение объектива микроскопа (маркируется на объективе);

$V_{ок}$ – увеличение окуляра (маркируется на окуляре).

Для удобства наблюдения микроскринер оснащен монитором (рисунок 5.3), позволяющим рассматривать изображение без использования окуляра. Зрительное поле монитора может разбиваться на 11 отрезков по ширине и высоте, что облегчает определение размеров зерен.

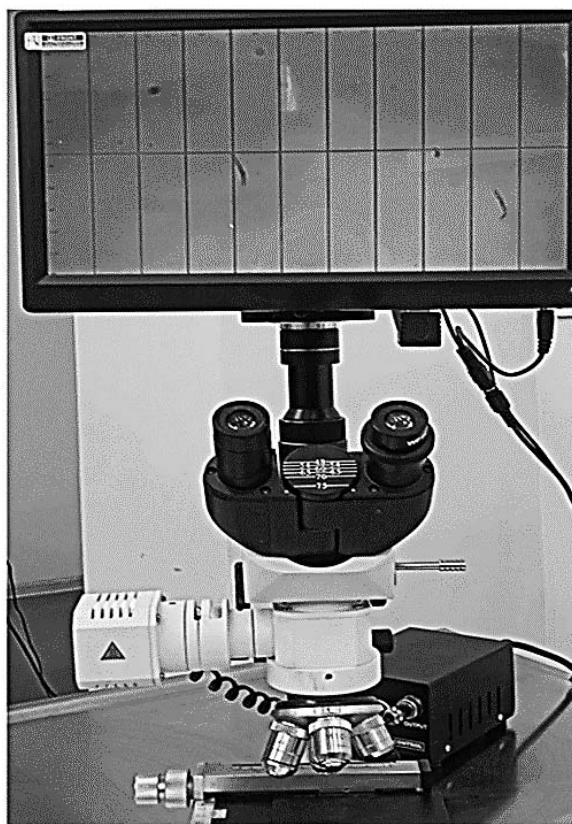


Рисунок 5.3 – Общий вид микроскринера

Микроанализ позволяет проводить не только качественное исследование структуры металла. Он используется и для количественной оценки структурных составляющих, например для измерения величины зерна, глубины слоя и т. д. При определении конкретных размеров используются объекты-микрометры и окуляры-микрометры.

Объект-микрометр – стеклянная или металлическая пластинка, на которую нанесена шкала длиной в 1 мм с ценой деления 10 мкм (0,01 мм).

Окуляр-микрометр отличается от окуляра лишь наличием шкалы, имеющей 100 делений.

Для определения цены деления окуляра-микрометра объект-микрометр устанавливается вместо шлифа на предметный столик и шкалы обоих микрометров совмещаются.

После совмещения некоторых участков шкал проводится вычисление цены деления окуляра по формуле

$$C_{ок} = (C_{об} T_{об}) / A_{ок},$$

где $C_{об}$ – цена деления объекта-микрометра, равная 0,01 мм;

$T_{об}$ – число делений объекта-микрометра, совпавших с числом делений окуляра-микрометра $A_{ок}$.

Зная цену деления окуляра-микрометра, можно измерить интересующий микрообъект, помещая его на предметный столик.

Например, средняя величина зерна d_z исследуемого металла или сплава может быть вычислена следующим образом:

$$d_z = (C_{ок} N_{ок}) / n_z,$$

где $C_{ок}$ – цена деления окуляра-микрометра, мм;

$N_{ок}$ – число делений окуляра, в границах которых подсчитывалось количество зерен;

n_z – среднее число зерен, уместившихся на отрезке длиной $C_{ок}N$ при горизонтальном и вертикальном положениях шкалы окуляра-микрометра.

Считая приближенно средний линейный размер зерна равным среднему диаметру зерна, площадь зерна определяется по формуле

$$S_{cp} = (\pi \cdot d_{cp}^2) / 4.$$

Рассчитав площадь зерна, можно определить его номер согласно таблице 5.1. Чем меньше размер зерна, тем выше комплекс механических свойств образца (при снижении размеров зерна от № 1 до 14 прочность любого сплава возрастает в 7–8 раз). Это объясняется тем, что границы зерен являются препятствиями для движения дислокаций.

Таблица 5.1 – Зависимость между номером зерна и его площадью

Номер зерна	Площадь зерна, мкм ²		
	наименьшая	средняя	наибольшая
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
5	2 500	4 000	5 000
6	1 250	2 000	2 500
7	625	1 000	1 250
8	312	500	625
9	156	250	312
10	78	125	156
11	38	62	78
12	19	31	38
13	10	16	20
14	5	8	10
Примечание – Зерна № 1–4 считаются крупными, а свыше № 6 – мелкими			

Задание

- 1 Изучить устройство микроскопа и освоить приемы работы на нем. Зарисовать схему хода лучей в микроскопе.
- 2 Исследовать микрошлиф после травления и зарисовать структуру.
- 3 Определить цену деления окуляра-микрометра.
- 4 Определить величину зерна микрошлифа и установить его номер.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите составные части микроскопа и их назначение.
- 2 От чего зависит полезное увеличение оптических микроскопов?
- 3 Как определяется цена деления окуляра-микрометра?
- 4 Как определяется размер зерна сплава?

6 Лабораторная работа № 6. Спектральный анализ химического состава сплавов

Цель работы: ознакомление с методом качественного и количественного содержания химических элементов в металлических сплавах.

Оборудование и инструмент: многоканальный спектрометр ЭМАС-200ДМ, образцы металлических сплавов.

6.1 Общие положения

Атомно-эмиссионный спектрометр предназначен для качественного и количественного анализа спектральных линий излучения атомов (эмиссионных спектров), которые возбуждаются в плазме дугового разряда. Исследуемый образец сплава, помещенный в межэлектродное пространство, превращается в излучающий плазменный разряд. Плазма состоит из электронов, ионов и возбужденных атомов испаренной пробы. Электромагнитное излучение плазмы включает в себя линейчатые спектры атомов и ионов, входящих в ее состав. Каждому химическому элементу соответствуют свои определенные линии в спектре плазмы, поэтому, исследуя спектр излучения, можно определить химический состав образца сплава. Измерение длины волны и интенсивности эмиссионных спектров осуществляется с помощью оптического многоканального анализатора (ОМА), который размещается в фокальной плоскости спектрографа.

Характерные спектральные линии выделяются из спектра и автоматически обрабатываются на компьютере с помощью программы-методики. Так как интенсивность аналитических спектральных линий связана с концентрацией соответствующих химических элементов, то возможно определить и их количество в пробе. Для этой цели используется метод сравнения спектров анализируемой пробы и стандартных образцов, содержание элементов в которых известно.

6.2 Состав прибора

Функциональная схема спектрографа ЭМАС-200ДМ представлена на рисунке 6.1.

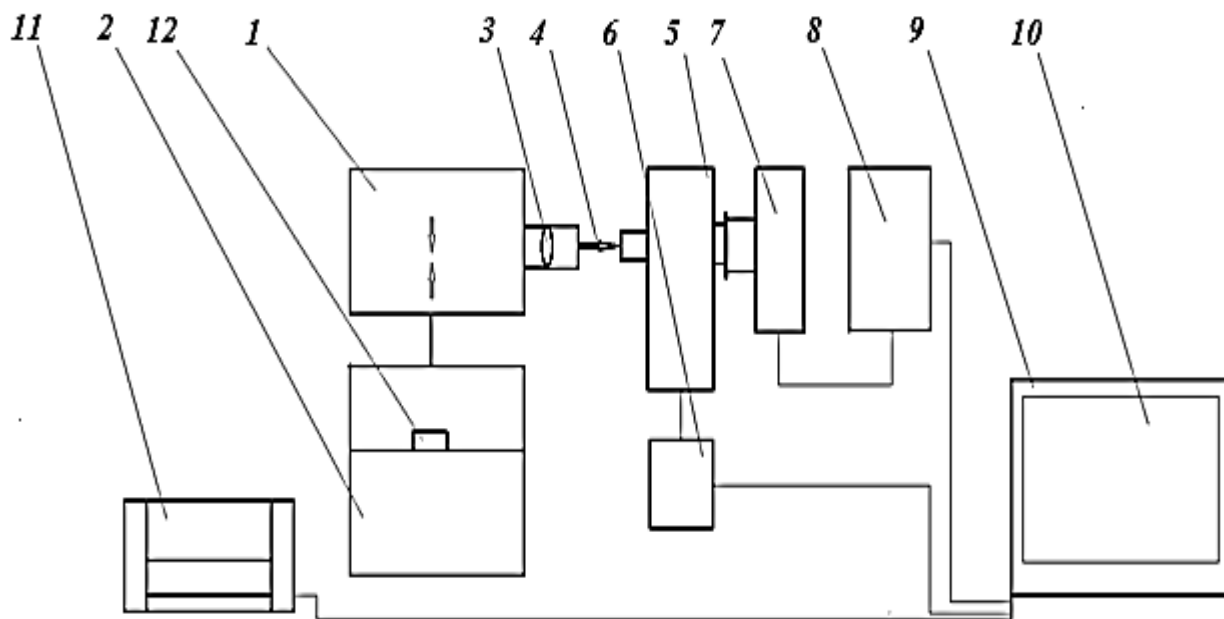


Рисунок 6.1 – Функциональная схема спектрографа ЭМАС-200ДМ

В состав спектрометра входят источник возбуждения спектров (ИВС) 1, штатив 2 с установленным образцом 12, спектрограф 5 с блоком управления 6, оптический многоканальный анализатор 7 с блоком питания 8. Спектрометр подключается к ноутбуку 9, соединенному с принтером 11. Излучение возбужденных атомов с помощью объектива 3 подается через кварцевый многожильный световод 4 на входную щель спектрографа, в котором оно разлагается в спектр. Выходящее из спектрографа излучение различных длин волн фокусируется на оптический многоканальный анализатор (ОМА). В качестве регистрирующего устройства ОМА используется фотодиодная линейка, состоящая из 1024 элементов.

Излучение определенной длины волны регистрируется на определенном участке линейки. Накопленные сигналы поступают на систему обработки информации ПЭВМ. Выбор режима работы спектрометра, включение ИВС, выбор аналитической программы режима работы регистрирующего устройства, времени обжига и экспозиции осуществляются оператором с помощью клавиатуры и дисплея монитора 10 в режиме диалога. Общий вид спектрографа представлен на рисунке 6.2.

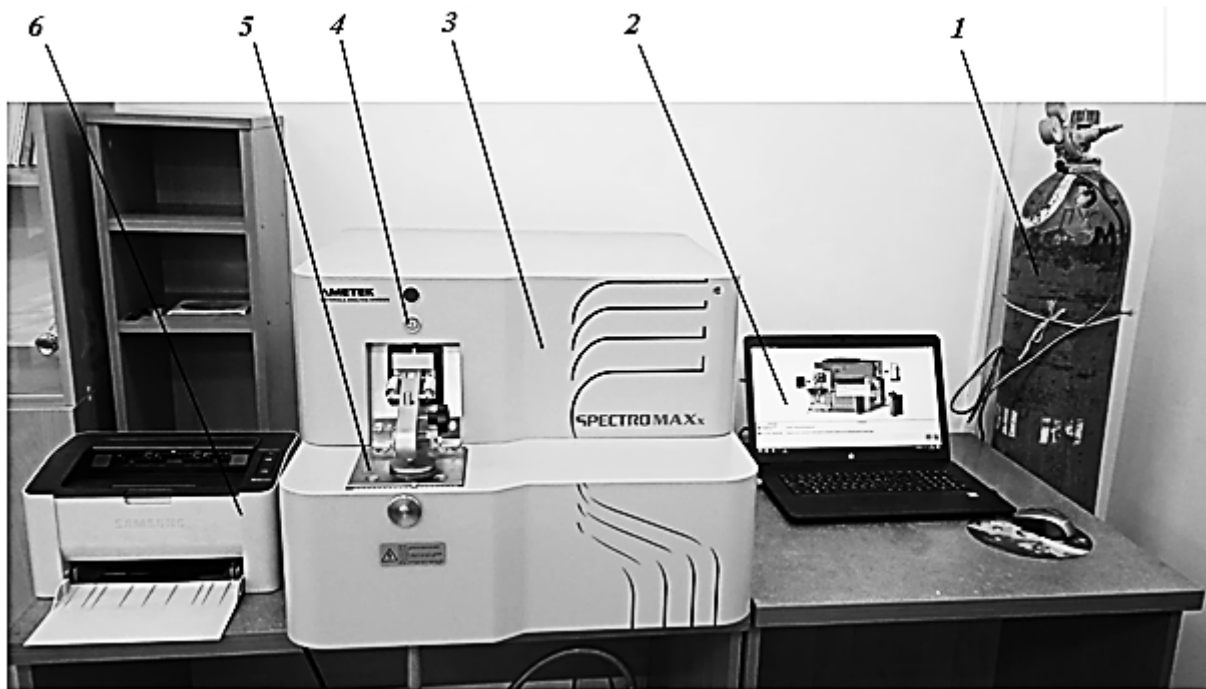


Рисунок 6.2 – Общий вид спектрографа ЭМАС-200ДМ

6.3 Порядок работы

6.3.1 Перед началом работы.

- 1 Проверить надежность заземления.
- 2 Включить вентиляцию.
- 3 Металлической щеткой зачистить электрод, находящийся на штативе, от нагара.
- 4 Подключить оборудование к сети с помощью удлинителя (располагается на полу).
- 5 Открыть вентиль баллона с аргонном (см. рисунок 6.2, поз. 1), повернуть рукоятку газового редуктора по часовой стрелке (установить расход газа 30 л/мин).
- 6 Открыть и включить ноутбук 2, ввести пароль, закрыть панель Яндексa, нажать на значок *Spark Analyzer Pro*, дождаться окончания загрузки (на экране монитора появится схема установки (рисунок 6.3)) и достижения рабочей температуры.
- 7 Включить красную кнопку генератора (начнется продувка камеры аргонном), на экране монитора появится таблица «Прибор будет продуваться 60 мин, процесс продувки можно прервать», процесс продувки можно прервать через 5...10 мин.
- 8 На схеме установки дождаться смены красной окраски на зеленую.
- 9 Когда температура достигнет заданной величины, на экране монитора появится таблица измерений.

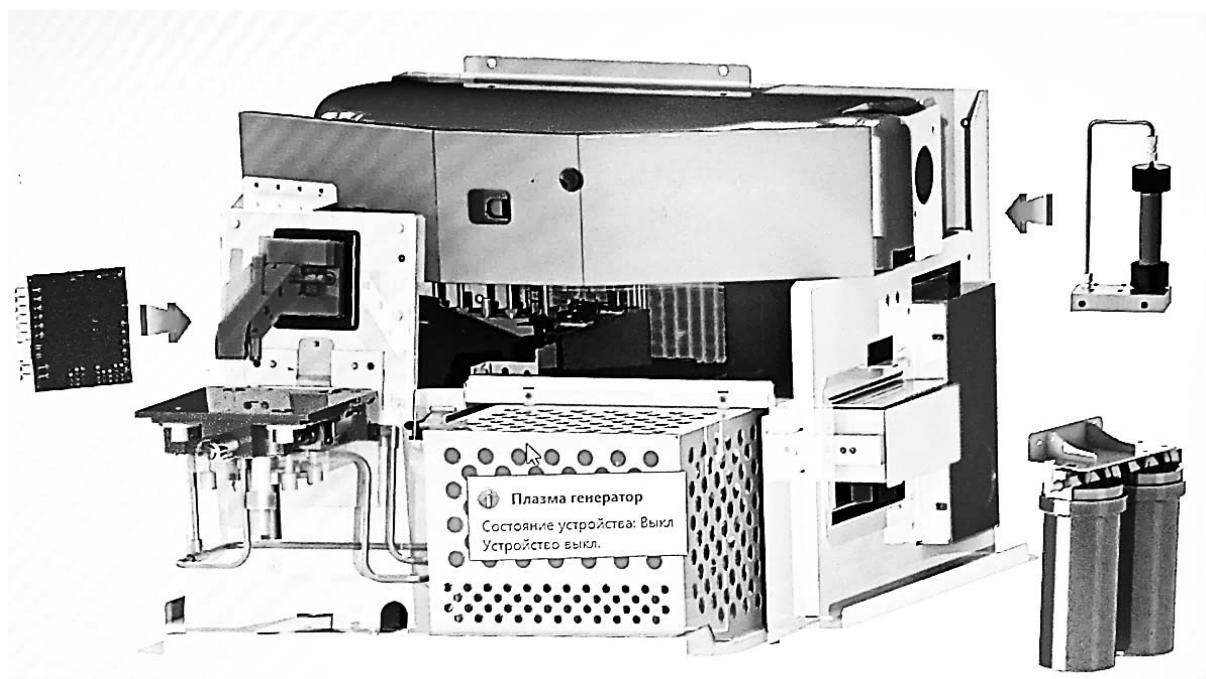


Рисунок 6.3 – Изображение степени готовности установки на экране монитора

6.3.2 Работа на спектрографе.

- 1 Нажать значок «Загрузка метода».
- 2 Выбрать нужный сплав (например, сталь).
- 3 Нажать значок «Правка образца».
- 4 Нажать значок «ИД образца» и задать имя образца (например, сталь 1), нажав на значок «v» «Принять».
- 5 Установить на штатив испытуемый образец, прижать его сверху кронштейном.
- 6 Нажать на экране монитора зеленую кнопку «Старт».
- 7 Дождаться окончания прожога образца и появления таблицы «Интенсивность референтной линии достигла предела».
- 8 Для чистоты эксперимента первый прожиг отвергают, т. к. поверхность образца может содержать следы смазки, загрязнений, оксидные пленки и пр. Для этого нажимают на значок «Отвергнуть» и повторяют испытание согласно пп. 6 и 7. Ознакомиться с результатами испытания в таблице измерений.
- 9 Если результаты испытания вас не устраивают, нажать на значок «Отвергнуть» и повторить испытание согласно пп. 6 и 7.
- 10 После окончания испытаний включить принтер и нажать значок «Печать». Полученная таблица содержит около 30 химических элементов, входящих в состав сплава.

6.3.3 После окончания работы.

- 1 На экране монитора нажать значок «Домой».
- 2 Войти в меню «Пуск» и нажать значок «Завершение работы».
- 3 При выключении оборудования совершить операции в обратном порядке согласно п. 6.3.1.

Задание

- 1 Указать назначение атомно-эмиссионного спектрометра и принцип его действия.
- 2 Определить химический состав предложенных образцов сплавов.
- 3 Установить, к какому классу сталей по химическому составу они относятся.
- 4 Оценить качество стальных образцов.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается сущность процесса спектрального анализа?
- 2 Чем производится измерение длины волны и интенсивности эмиссионных спектров?
- 3 Что используется в качестве регистрирующего устройства оптического многоканального анализатора?

7 Лабораторная работа № 7. Анализ диаграмм состояния сплавов и использование их в технологической практике

Цель работы: изучение основных типов диаграмм состояния двойных систем; приобретение практических навыков анализа превращений, протекающих в сплавах; анализ диаграмм состояния сплавов и использование их в технологической практике для определения возможности обработки давлением или литьем.

По диаграмме состояния сплава (ДСС) можно представить полную картину образования сплава, его переход из жидкого состояния в твердое, процессы перекристаллизации в твердом состоянии; определить оптимальную температуру заливки сплава, оценить его литейные и пластические свойства. Еще большее значение диаграммы состояния имеют для термической обработки сплавов, по ним можно определить, какую тепловую обработку может воспринимать данный сплав и какие температурные режимы будут для него наиболее рациональными. ДСС (рисунок 7.1) показывает графически, как с изменением химического состава и температуры изменяются структура, количество и состав фаз, находящихся в равновесии.

Фаза – это однородная часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую все свойства изменяются скачком.

Любая точка ДСС показывает:

- химический состав сплава;
- температуру сплава;
- фазовый и структурный состав сплава.

В качестве примера на рисунке 7.1 приведена ДСС для металлов А и В. По

оси ординат располагается температура, по оси абсцисс – концентрация компонента В. Из диаграммы видно, что выше заштрихованных областей (выше линии ликвидуса) сплавы находятся в жидком состоянии (от лат. liquidus – жидкий); ниже заштрихованных областей (ниже линии солидуса) сплавы находятся в твердом состоянии (от лат. solidus – твердый). В заштрихованных областях присутствуют две фазы (жидкая и кристаллы твердой фазы).

Два металла А и В (компоненты сплава) могут образовывать в рассматриваемой системе фазы, указанные на рисунке 7.1:

- химическое соединение определенного состава, которое может быть выражено формулой A_mB_n , где m и n – простые целые числа, например A_2B ;
- твердые растворы α , β , γ , ..., ω , например α -твердый раствор на основе компонента А;
- механические смеси фаз.

Предельная растворимость компонента В в компоненте А определяется вертикальной штриховой линией. Из диаграммы видно, что с понижением температуры растворимость компонента В в α -твердом растворе уменьшается.

На горизонтальных линиях происходят *эвтектические превращения*: жидкий раствор превращается в механическую смесь – эвтектику (от греч. εὐτηκτος – легкоплавкий). Например, первая эвтектика $\mathcal{E}_1$ состоит из кристаллов тех фаз, которые находятся на концах горизонтальной кривой (кристаллов α -твердого раствора и кристаллов химического соединения A_2B).

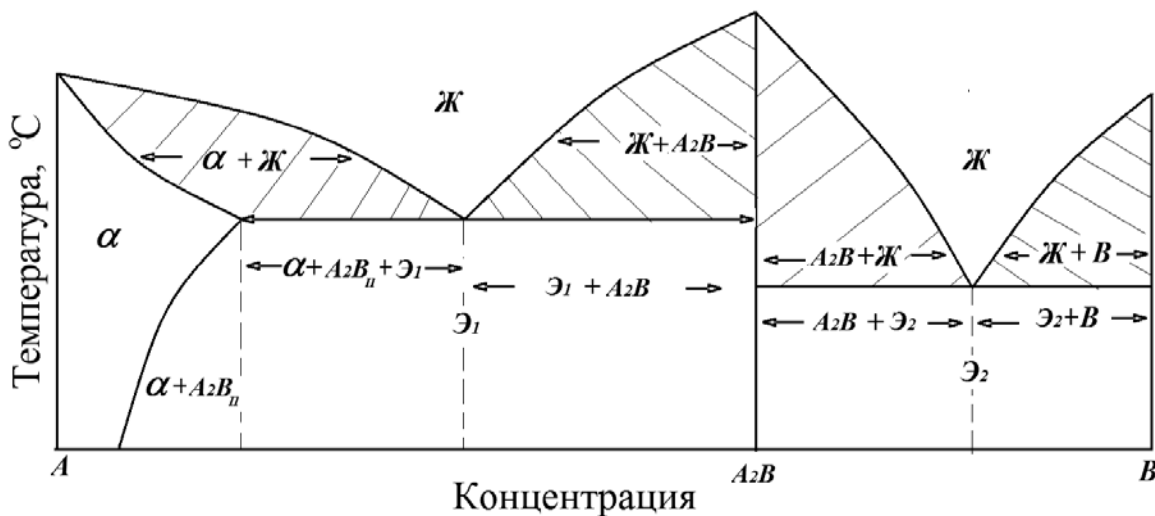


Рисунок 7.1 – Диаграмма состояния для компонентов А и В

Эвтектические сплавы являются более легкоплавкими, чем все остальные сплавы, и обладают *наилучшими литейными свойствами*, но очень низкой пластичностью.

В отличие от них *однофазные твердые растворы* всегда отличаются *высокой пластичностью* (что позволяет производить обработку давлением без нагрева) и низкими литейными свойствами. В технологическом смысле сплавы с эвтектикой и однофазными твердыми растворами являются антиподами.

Алгоритм анализа диаграмм состояния сплавов.

1 Под *наклонным* участком линии солидус находится только одна фаза – α -твердый раствор (рисунок 7.2).

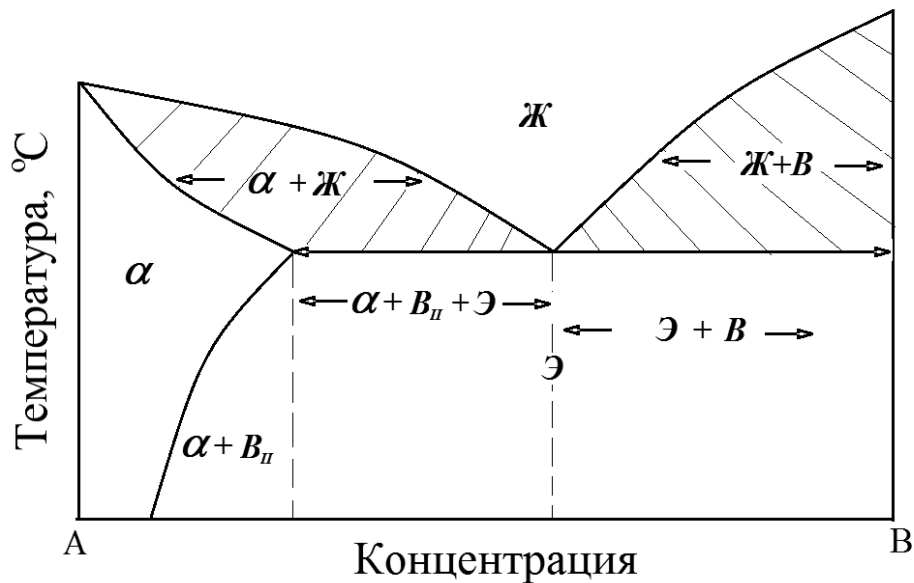


Рисунок 7.2 – Пример анализа диаграммы состояния сплава

2 Если имеется *эвтектика*, необходимо из самой низкотемпературной точки опустить перпендикуляр и указать состав эвтектики (ее состав смотри на концах прямой эвтектического превращения, смесь зерен α и В).

3 Под *горизонтальной прямой* линии солидус находится механическая смесь фаз. Состав этой смеси смотри на «боковых стенках», ограничивающих эту область (под левым участком прямой – смесь зерен $\alpha + B_{II} + Э$, под правым участком прямой – смесь зерен $Э + В$).

4 Если имеется *линия понижения растворимости*, то необходимо из ее вершины опустить перпендикуляр и указать состав выделяющейся *вторичной фазы*. Состав появляющейся под линией понижения растворимости вторичной фазы смотри на противоположном конце прямой эвтектического превращения (из пересыщенного α -твердого раствора выделяются кристаллы B_{II}).

Вторичная фаза, в отличие от первичной, образуется в пересыщенном *твердом растворе* (а не жидком) и поэтому имеет высокую степень дисперсности (ее размеры могут быть в 1000 раз меньше размеров зерен твердого раствора).

Появляющаяся в объеме зерен твердого раствора высокодисперсная вторичная фаза является препятствием для скольжения дислокаций (скольжение дислокаций обеспечивает пластическую деформацию металла) и приводит к упрочнению сплава в 3–4 раза.

Явление упрочнения сплава, происходящее в процессе распада пересыщенного твердого раствора, называется *старением*. Оно характерно для упрочняемых термообработкой алюминиевых, медных и никелевых сплавов (Д1, АК8, В95, Бр.Б2, Бр.Х, и т. д.).

По диаграммам состояния можно определить технологические свойства

сплавов:

- сплавы, состоящие из однофазных твердых растворов, зачастую можно подвергать *холодной штамповке* (вследствие высокой пластичности);
- сплавы, содержащие твердый раствор и вторичную фазу, можно подвергать *горячей штамповке* (при нагреве вторичная фаза растворяется и сплав становится высокопластичным однофазным твердым раствором);
- сплавы, содержащие *твердый раствор и вторичную фазу*, можно подвергать *закалке и старению* (термообработке, повышающей прочностные свойства в 3–4 раза);
- сплавы, включающие в себя *эвтектику*, используют только в качестве литейных («то, что льется, то не гнется, и наоборот»).

Задание

- 1 Дать определение понятию «фаза», записать характерные свойства эвтектики и однофазных твердых растворов.
- 2 Начертить заданную преподавателем диаграмму состояния (рисунок 7.3, варианты 1–22).
- 3 Записать алгоритм анализа диаграмм состояния сплавов.
- 4 Провести фазовый анализ всех областей диаграммы. Во всех областях диаграммы указать структуры, образующиеся в сплавах данной системы в состоянии равновесия.
- 5 Исходя из указанной диаграммы определить характерные технологические свойства сплавов разной концентрации.

Контрольные вопросы

- 1 Какие сплавы обладают высокими литейными свойствами, а какие высокой пластичностью?
- 2 Укажите механизм повышения прочности сплавов, подвергаемых старению.
- 3 Проведите фазовый анализ в любой из предлагаемых диаграмм состояния.

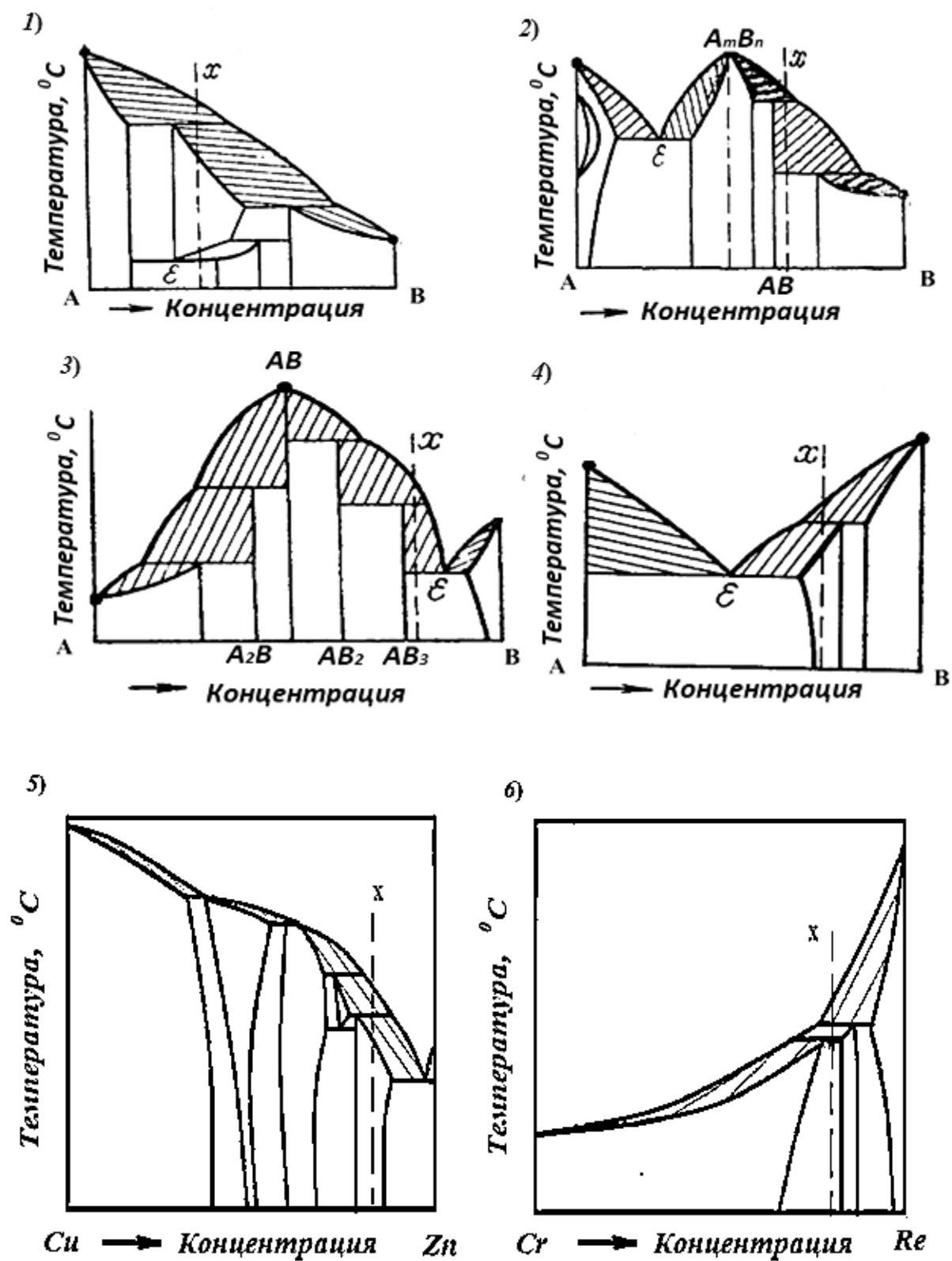
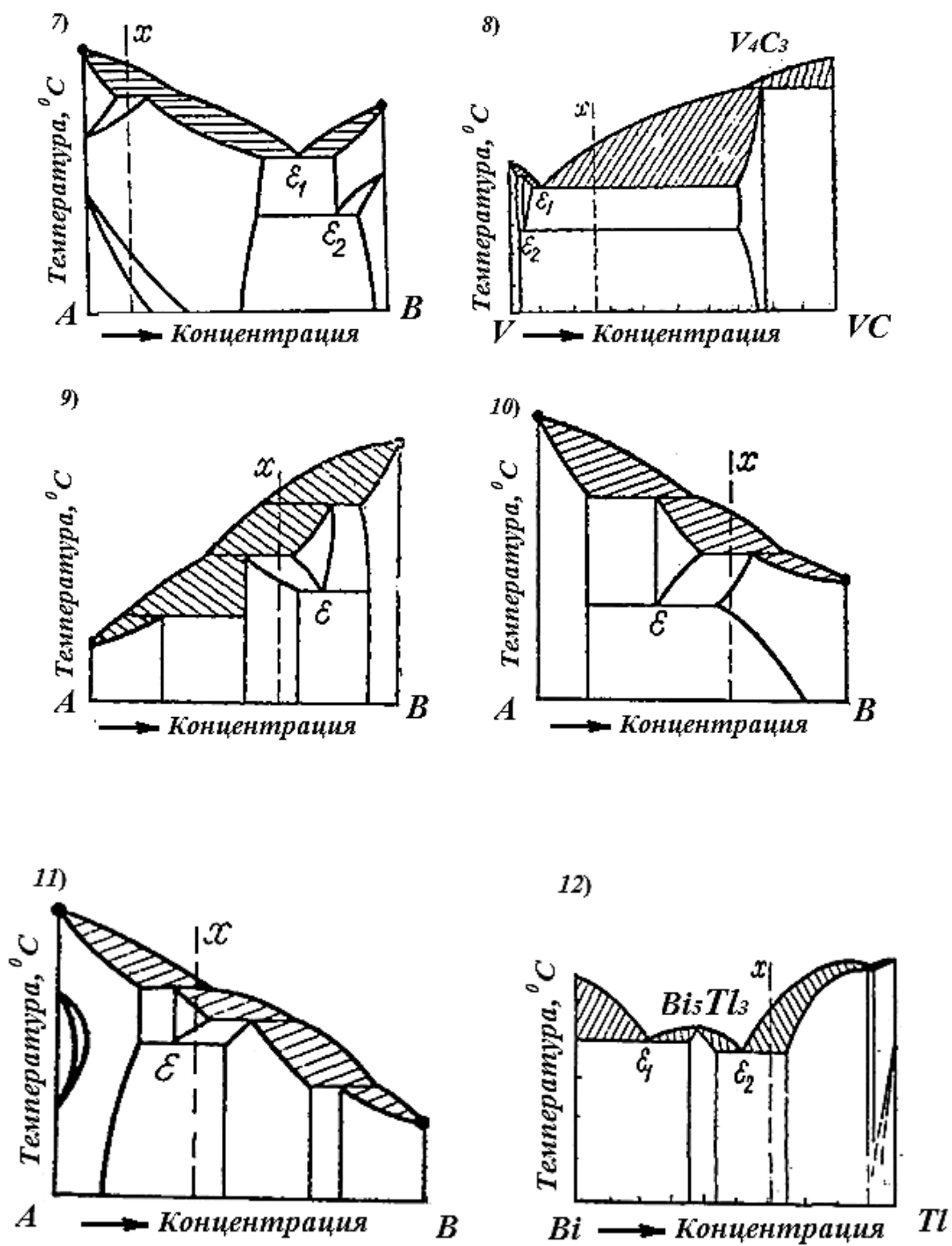
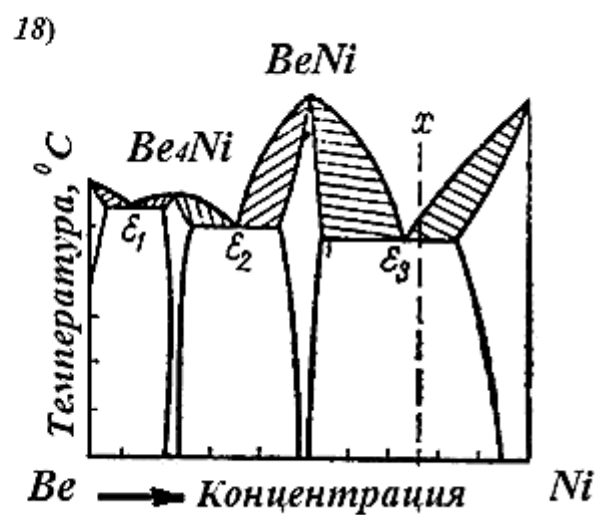
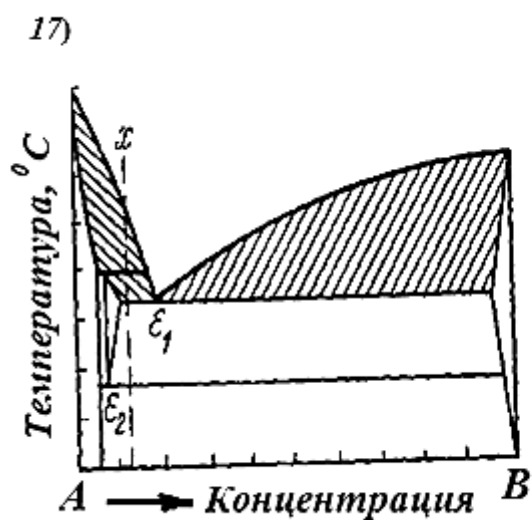
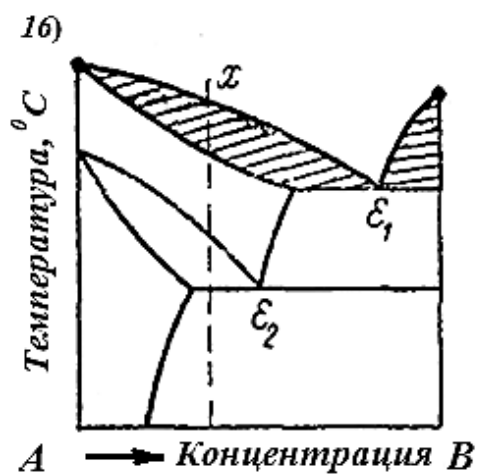
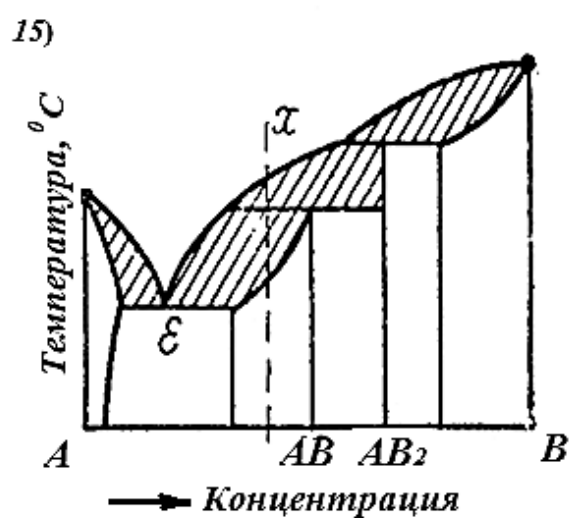
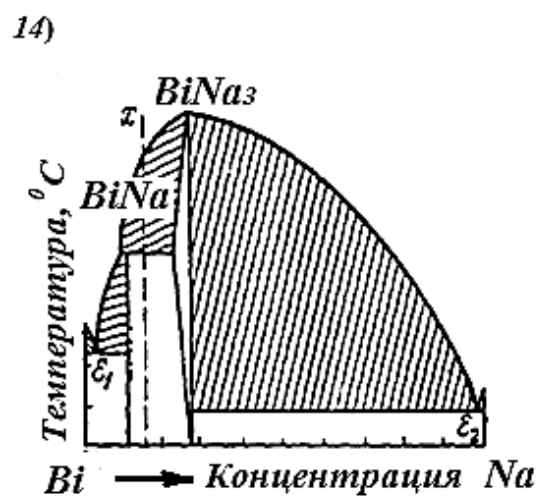
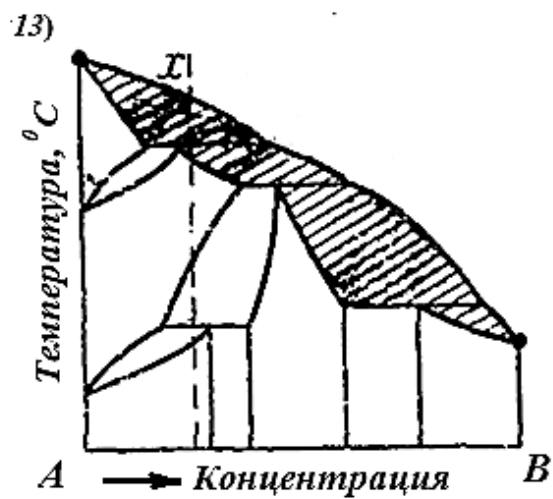


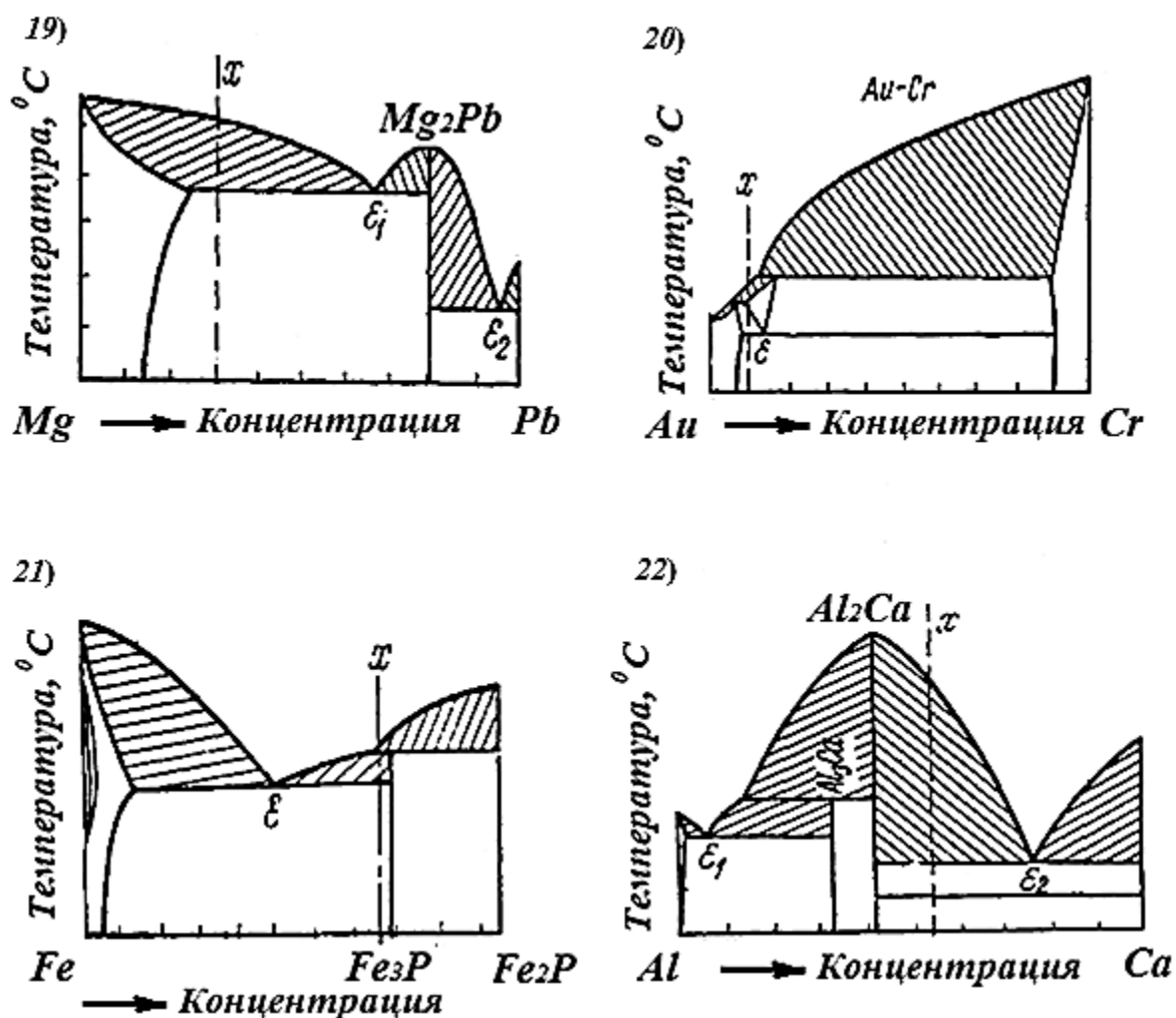
Рисунок 7.3 – Варианты диаграмм состояния сплавов



Продолжение рисунка 7.3



Продолжение рисунка 7.3



Окончание рисунка 7.3

8 Лабораторная работа № 8. Изучение зависимости между структурой и свойствами сплавов цветных металлов

Цель работы: изучение микроструктуры и свойств цветных металлов и сплавов и установление связи между структурой сплава и соответствующей диаграммой состояния.

Алюминий и его сплавы. Алюминий кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке. Наиболее характерные свойства его – малый удельный вес ($\gamma = 2,7$), низкая температура плавления (657°C), высокие тепло- и электропроводность, пластичность, отражательная способность.

Алюминий – один из важнейших промышленных металлов, находящихся широкое применение в электротехнике, в химическом аппаратостроении, в быту и других областях. Применение его как конструкционного материала ограничено низкой прочностью ($\sigma_s = 8 \dots 10 \text{ кг/мм}^2$). Алюминий упрочняется путем введения различных легирующих элементов, что позволяет получить сплавы с высокими прочностными свойствами. Применяющиеся в технике алюминиевые

сплавы делятся на *деформируемые*, представляющие собой твердые растворы, и *литейные*, содержащие в своей структуре эвтектику (рисунок 8.1).

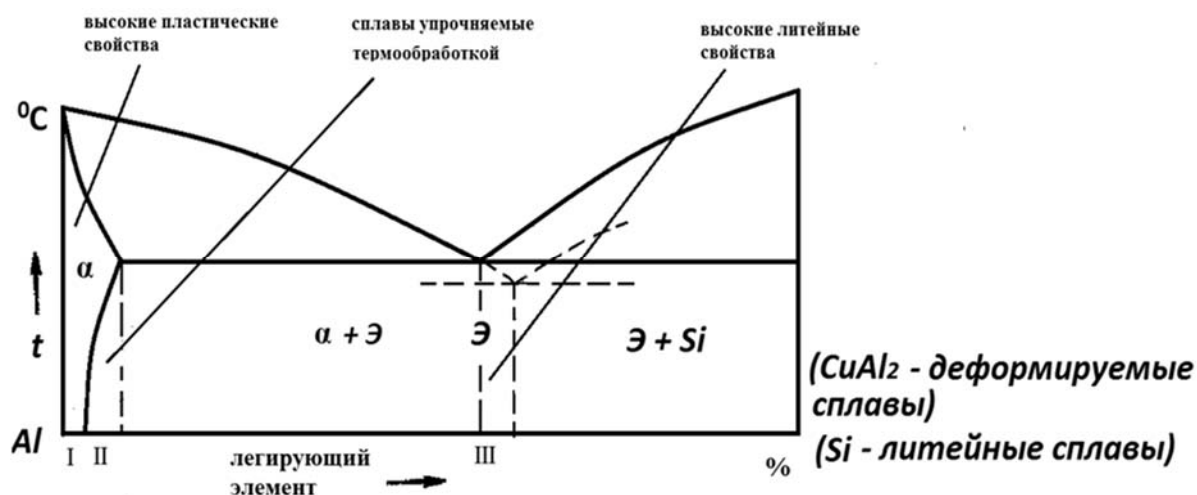


Рисунок 8.1 – Диаграмма состояния «Al – легирующий элемент»

Деформируемые сплавы. Сплавы этого класса подразделяются на упрочняемые термической обработкой (II группа) и неупрочняемые (I группа).

К первой группе относятся сплавы типа АМг1,5, АМц2. В связи с низким содержанием легирующих элементов (магния или марганца) они представляют собой однофазные α -твердые растворы, обладающие высокой пластичностью, свариваемостью, но низкими прочностью и твердостью. Повысить их прочность можно за счет наклепа, возникающего при холодной пластической деформации. Для них характерна широкая область применения: трубные конструкции, лифты, корпуса судов, автомобилей, различные емкости для жидкостей (фляги, баки, цистерны и пр.), радиаторы охлаждения, элементы строительных конструкций (окна, двери), посуда и т. д.

К сплавам второй группы относятся Д1, Д16, Д18; АК6, АК8; В93, В95.

Наиболее распространенным представителем этой группы является дуралюмины (Д1, Д16). Основными легирующими элементами являются медь, марганец и магний, поэтому этот материал может быть причислен к сплавам системы Al-Cu-Mn-Mg. Марганец вводится в дюралюминий главным образом для повышения коррозионной стойкости. Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений CuAl_2 , CuMgAl_2 (S-фаза), Mg_2Si , вызывающих упрочнение сплава в процессе термической обработки, заключающихся в закалке от 500 °С в воде с последующим естественным старением в течение 5...7 сут.

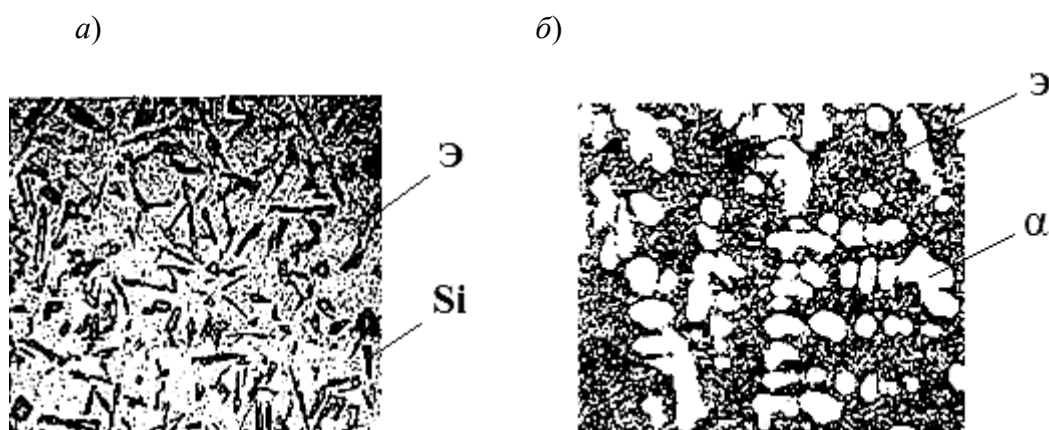
Самым простым сплавом II группы является сплав Д1, включающий 4,5 % меди и около 0,5 % магния и марганца. Магний и марганец переходят в твердые растворы, а медь образует химическое соединение CuAl_2 . При нагреве под закалку (510 °С) CuAl_2 полностью растворяется в α -твердом растворе, и при последующем быстром охлаждении фиксируется пересыщенный α -твердый раствор. После закалки сплав подвергают естественному или искусственному

(при 150 °С) старению, приводящему к распаду пересыщенного твердого раствора и выделению высокодисперсной вторичной фазы $\text{CuAl}_{2\text{II}}$, которая является препятствием для движения дислокаций и приводит к упрочнению сплава в 3–4 раза. По этой причине все сплавы II группы являются дисперсионно-твердеющими.

Дуралюмины хорошо свариваются точечной сваркой и не свариваются сваркой плавлением вследствие склонности к образованию трещин. Из них изготавливают обшивки, шпангоуты, стрингера и лонжероны самолетов, кузова грузовых автомобилей и т. д. Ковочные сплавы (АК6, АК8 ...) используют для тяжело нагруженных деталей сложной формы, изготовление которых требует высокой пластичности в процессе горячей штамповки (лопасти винтов вертолета и пр.).

Литейные сплавы. В качестве литейных сплавов на основе алюминия широкое распространение имеют сплавы III группы, системы Al–Si – *силумины* (алюминиевокремнистые сплавы, содержащие 5 %...14 % Si).

Силумины обладают высокой жидкотекучестью, малой усадкой, удовлетворительной коррозионной стойкостью и применяются для получения отливок сложной формы. Типичным силумином является эвтектический (или заэвтектический) сплав АЛ2 (11 %...12 % Si), структура которого имеет игольчатую эвтектику (основа сплава), состоящую из твердого раствора кремния в алюминии α и небольшого количества грубых игольчатых включений Si (рисунок 8.2, а). Повышение прочности и пластичности силумина достигается модифицированием – введением в расплав перед разливкой незначительного количества натрия и его солей. При этом изменяется структура сплава: введение модификатора вызывает смещение линии начала кристаллизации кремния в сторону более высокого содержания кремния и более низких температур (см. рисунок 8.1). Заэвтектический сплав с 11 %...12 % Si в этом случае становится доэвтектическим (рисунок 8.2, б), состоящим из эвтектики и округлых зерен α -твердого раствора.



а – немодифицированный (заэвтектический); б – модифицированный

Рисунок 8.2 – Микроструктура силумина АЛ2

При более высоких требованиях к прочностным свойствам применяют специальные силумины – доэвтектические сплавы с 4 %...10 % Si с добавками

меди, магния, марганца. Эти сплавы способны упрочняться при термической обработке. Маркировка сплавов АЛ: буквы указывают, что это алюминиевый (А), литейный (Л) сплав; цифры – порядковый номер в ГОСТе.

Медь и ее сплавы. Медь имеет гранецентрированную кубическую решетку. Удельный вес меди – $8,9 \text{ г/см}^3$, температура плавления – $1083 \text{ }^\circ\text{C}$. Она обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью, пластичностью в горячем и холодном состояниях и широко применяется в различных областях техники. Кроме того, медь является основой важнейших сплавов – латуней и бронз.

Сплавы меди с цинком (латуни). Практическое применение имеют сплавы с содержанием цинка до 45 %, которые называются латунями. Равновесная диаграмма состояния для этой системы приведена на рисунке 8.3. По структуре латуни делятся на две группы:

1) сплавы с содержанием цинка до 39 % (Л96...Л75) являются однофазными со структурой твердого раствора цинка и меди (α);

2) сплавы с содержанием цинка более 39 % (Л60, Л55) имеют двухфазную структуру ($\alpha + \beta$) (рисунок 8.4), где β -твердый раствор на базе соединения CuZn с электронным типом связи имеет кубическую объемно-центрированную решетку.

Цинк до определенного предела повышает прочность и пластичность сплавов. Максимальной пластичностью обладают материалы со структурой однофазного твердого раствора. Переход через границу однофазной области (39 % Zn) приводит к резкому снижению пластичности, повышению прочностных и литейных свойств. Максимальной прочностью обладает β -латунь при содержании цинка 45 %. Однако пластичность ее относительно низка. Литейные свойства двухфазных латуней характеризуются хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к ликвации, способностью к образованию концентрированной усадочной раковины.

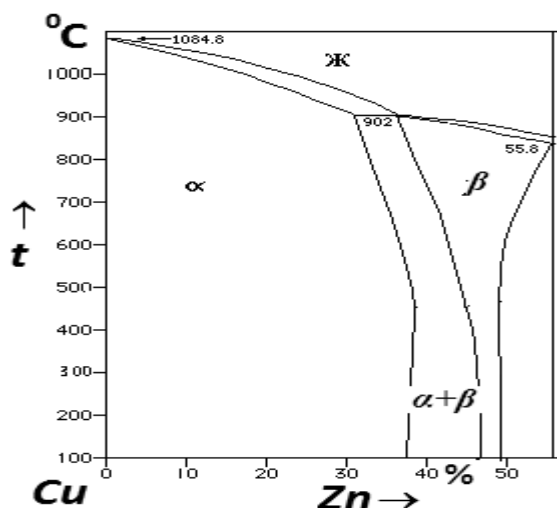


Рисунок 8.3 – Диаграмма состояния Cu–Zn



Рисунок 8.4 – Микроструктура литой двухфазной латуни

Однофазные латуни легко поддаются пластической деформации, поэтому их используют для производства листов, лент, профилей. Причем для прокатки в холодном состоянии применяют α -латуни, а для прокатки в горячем состоянии наиболее пригодны латуни со структурой $\alpha + \beta$ (при нагреве α -фаза растворяется и во время горячей обработки давлением их структура состоит из одной β -фазы).

Кроме простых латуней (сплавов меди и цинка), применяются специальные латуни, в которые для придания тех или иных свойств дополнительно вводят различные элементы: свинец – для улучшения обрабатываемости, олово – для повышения сопротивления коррозии в морской воде, алюминий и никель – для повышения механических свойств. Марки латуней начинаются с буквы «Л». Далее следуют буквы, указывающие наличие определенных легирующих элементов. Цифры указывают концентрацию меди и легирующих элементов.

Бронзы. Бронзами называются сплавы меди с другими элементами (за исключением цинка). В зависимости от основного легирующего элемента бронзы разделяются на оловянистые, алюминиевые, бериллиевые, марганцовистые и т. д. Марки бронз начинаются с букв «Бр». Далее следуют буквы, показывающие наличие определенных легирующих элементов, и цифры, указывающие их содержание. Бронзы применяют для получения отливок и поковок. Дорогостоящие и дефицитные оловянистые бронзы в настоящее время заменяются алюминиевыми.

Алюминиевая бронза. Наиболее распространены алюминиевые бронзы, содержащие 5 %...11 % Al. Диаграмма состояния этих сплавов аналогична диаграмме латуней. Сплавы с содержанием алюминия до 9,8 % (БрА5, БрА7, БрА9) имеют однофазную структуру твердого раствора алюминия в меди (α). При больших концентрациях алюминия сплавы имеют двухфазную структуру, состоящую из твердого раствора (α) и эвтектоида Э($\alpha + \gamma'$). Структура сплава БрА10 приведена на рисунке 8.5.



Рисунок 8.5 – Микроструктура литой бронзы БрА10

Алюминиевые бронзы среди медных сплавов выделяются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами, в связи с чем их широко используют в машиностроении для деталей конструкционного назначения. Наряду с простыми алюминиевыми бронзами используют сложные бронзы. При введении железа до 4 % происходит измельчение α -фазы, повы-

шение твердости и прочности бронзы за счет его растворения в меди. Легирование никелем приводит к повышению жаропрочности бронз.

Бериллиевая бронза обладает исключительно ценными качествами. В диаграмме состояния этой системы имеется линия понижения растворимости, как и в диаграмме алюминиевых сплавов, что позволяет проводить упрочнение сплава с помощью аналогичной термической обработки. После закалки и старения она имеет высокую прочность и твердость, повышенный предел упругости и усталости. Бериллиевая бронза является наилучшим пружинным материалом. Кроме того, она с успехом применяется для изготовления деталей, работающих на износ. Этот материал не дает искр при ударе, что позволяет изготавливать из нее ударники отбойных молотков на взрывоопасных производствах.

Наиболее высокие механические свойства имеют сплавы с 2,0 %...2,5 % бериллия. Они являются дисперсионно-твердеющими. Растворимость бериллия в меди при комнатной температуре не превышает 0,2 %. Закалка с 800 °С фиксирует пересыщенный α -твердый раствор бериллия в меди. Последующее искусственное старение при 300 °С...350 °С приводит к резкому повышению твердости и прочности, которое связано с выделением из твердого раствора вторичной фазы (CuBe_{II}) в форме дисперсных включений. Вторичная фаза труднорастворима при высоких температурах. Поэтому эта бронза является наилучшим жаропрочным материалом на основе меди и используется в качестве электродов контактной точечной сварки.

Широкому распространению бериллиевой бронзы препятствует ее высокая стоимость и дефицитность.

Легкоплавкие подшипниковые сплавы (баббиты). Подшипниковыми сплавами называются материалы, из которых изготавливаются вкладыши подшипников скольжения. При применении мягких легкоплавких сплавов (баббитов) обеспечивается минимальный износ шейки вала. Кроме того, они имеют минимальный коэффициент трения со сталью и хорошо удерживают смазку.

По условиям работы подшипниковый сплав должен иметь гетерогенную структуру и состоять из мягкой основы и твердых включений. Мягкая основа гарантирует хорошую прирабатываемость вкладыша к валу, твердые включения служат опорными точками для трущихся частей вала. Небольшая поверхность соприкосновения вала и опорных точек вкладыша уменьшает трение, а имеющиеся промежутки между валом и мягкой основой обеспечивают хорошую смазку.

В качестве баббитов применяются сплавы системы Pb–Sb (диаграмма состояния которой приведена на рисунке 8.6), Sn–Sb, Pb–Sn–Sb, сплавы на основе цинка с добавками Cu, Al и баббиты на основе алюминия с добавками Cu, Sb, Ni.

Широкое применение в промышленности получили заэвтектические сплавы системы «свинец – сурьма» (БС), содержащие 16 %...18 % Sb. Мягкой основой в этом сплаве является эвтектика ($\alpha + \beta$), твердость которой составляет 7...8 НВ. Твердыми включениями призматической формы являются зерна β -твердого раствора свинца в сурьме. Их твердость составляет 30 НВ. Микроструктура баббита БС16, содержащего 16 % Sb, приведена на рисунке 8.7.

Задание

- 1 Зарисовать диаграммы состояния для предложенных систем.
- 2 Используя диаграммы состояния, описать процессы, протекающие при охлаждении изучаемых сплавов.
- 3 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных сплавов.

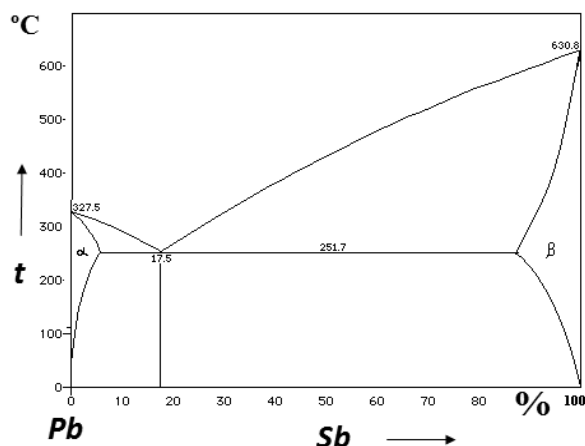


Рисунок 8.6 – Диаграмма состояния Pb–Sb



Рисунок 8.7 – Микроструктура баббита БС

Контрольные вопросы

- 1 Как меняются механические и технологические свойства алюминиевых и медных сплавов при увеличении количества легирующих элементов?
- 2 Дайте объяснение повышения прочностных свойств дисперсионно-твердеющих сплавов на основе алюминия и меди.
- 3 Изложите особенности сплавов АЛ2, АМг2, Д1, Л90, Л60, БрБ2, БС.

Список литературы

- 1 **Жарский, И. М.** Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский. – Мн. : Выш. шк., 2015. – 557 с.
- 2 **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение : учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 6-е изд., стер. – М. : Альянс, 2011. – 528 с.
- 3 **Худокормова, Р. Н.** Материаловедение. Практикум : учеб. пособие / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко, Д. А. Худокормов. – М. : Новое знание ; ИНФРА-М, 2014. – 311 с.: ил.
- 4 **Ловшенко, Ф. Г.** Механически легированные жаропрочные порошки для производства изделий аддитивными технологиями / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. – Могилев : Бел.-Рос. у-т, 2019. – 404 с.