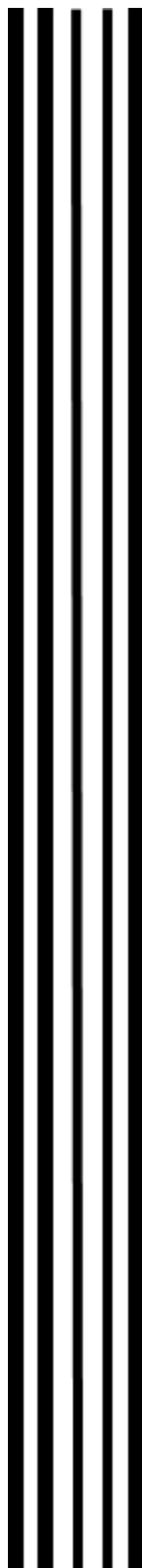


**КФЭУ**



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

**А. М. ПАВЛОВА**

**МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

**Практикум**

Казань  
2022

УДК 621.002.3

ББК 34.651

П12

**Павлова, Алиса Максимовна.**

П12 Микроскопические методы исследования строения материалов: практикум / А. М. Павлова. – Казань : КГЭУ, 2022. – 47 с.

Включает в себя описание лабораторных работ, методические указания по их выполнению и оформлению полученных результатов, а также теоретические вопросы.

Предназначен для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов, направленность (профиль) «Материаловедение и технологии материалов», изучающих дисциплину «Основы проектирования и методы исследования строения материалов».

УДК 621.002.3

ББК 34.651

## **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Основы проектирования и методы исследования строения материалов» включает общую характеристику и теорию способов анализа структуры известных материалов и служит профессиональной подготовке обучающихся к использованию методов испытаний, исследования и контроля качества материалов. В результате освоения получаемой информации студент приобретает умение ориентироваться в многообразии существующих современных способов анализа, пользоваться справочной и специальной литературой.

Изучение дисциплины в соответствии с учебным планом состоит из теоретической (лекционной) и прикладной (практической и лабораторной) частей. На лекциях обучающимся предоставляются теоретические знания в области физических и физико-химических явлений и процессов, лежащих в основе наиболее важных методов исследования состава и структуры полимеров, металлов и керамики. Содержанием же прикладной (практической) части являются понимание принципов устройства и работы типовых приборов и аппаратуры, используемых в данных методах, способов приготовления и подготовки образцов, обработки и анализа регистрируемых характеристик и источников возможных ошибок, определения точности экспериментов и их ограничений; приобретение знаний и навыков по оценке возможностей методов и их практическому использованию в исследовании материалов различной природы, процессов и явлений в них. Этим обучающиеся занимаются на лабораторных занятиях, которые проводятся для помощи в освоении материала, рассматриваемого в теоретическом курсе. Полученные в результате обучения знания необходимы студентам при подготовке, выполнении и защите выпускной квалификационной работы и при решении научно-исследовательских, проектно-конструкторских, производственно-технологических, организационно-управленческих задач в будущей профессиональной деятельности.

Цель лабораторных занятий – освоение информации, полученной на лекциях, и выработка определенных умений, связанных с изучением структуры различных материалов, выполнение лабораторных опытов и практических расчетов в области определения параметров, ее характеризующих.

В ходе выполнения практических работ у обучающихся формируются *способность и готовность* реализовать комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации.

Продолжительность лабораторной работы составляет 4 часа.

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Выполнение каждой лабораторной работы складывается из следующих этапов:

1. Самостоятельная подготовка обучающихся к работе. Перед началом работы необходимо четко представить себе ее цель, знать схему установки, методику проведения опыта, физическую сущность ожидаемых результатов. Должен быть предоставлен протокол измерений, содержащий таблицы для записи результатов исследования и основные расчетные формулы (если это необходимо).

2. Проведение эксперимента. Этот этап осуществляется в соответствии с методическими указаниями, содержащимися в каждой работе.

3. Отчет о проделанной работе должен выполняться на чистых листах формата А4 и содержать:

- а) титульный лист;
- б) название и цель работы, перечень основного оборудования и реактивов;
- в) рабочее задание;
- г) теоретическую часть;
- д) схему установки, основные технические характеристики приборов и описание методики измерения, а также расчетные формулы, используемые в работе (если они есть);
- е) числовой материал эксперимента и вычислений, сведенный в таблицу;
- ё) графики, построенные на основании числового материала эксперимента (если требуется по заданию); каждый график должен сопровождаться теоретическим обоснованием причин, влияющих на ход его построения, для чего в процессе составления отчета студент обязан по литературным источникам детально ознакомиться с материалом, который был объектом его исследования в лаборатории;
- ж) общие выводы по работе и заключение о качестве исследованных материалов;

з) ответы на контрольные вопросы.

4. Защита лабораторной работы проходит с предоставлением отчета. При ответе на контрольные вопросы обучающийся должен показать понимание сущности физических явлений в исследованных материалах, объяснить полученные результаты и сделать выводы.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При осуществлении работ в лабораториях различных методов исследования обучающиеся обязаны помнить о возможном поражении электрическим током, которое грозит как от низковольтной части аппарата (127–220 В), так и особенно от высоковольтных цепей, и необходимости соблюдения правил техники безопасности.

*При работе с установками, питающимися электрическим током, запрещается:*

1. Прикасаться к открытым токоведущим частям приборов, находящихся под напряжением.

2. Производить какие-либо измерения в схеме установок, находящихся под напряжением.

3. Включать приборы, находящиеся под напряжением, без разрешения преподавателя и без предупреждения всех работающих на данной установке.

4. Выполнять лабораторные работы без сотрудников лаборатории.

5. Категорически запрещается снимать оградительные стенки и щитки пультов управления и оперативных столов при работающей установке.

6. Оставлять без наблюдения лабораторные установки, находящиеся под напряжением.

При поражении электрическим током необходимо:

– сразу же обесточить аппаратуру;

– освободить пострадавшего от токоведущих частей;

– если быстро отключить оборудование нельзя, следует отделить пострадавшего от токоведущих частей, пользуясь при этом сухой палкой, веревкой, одеждой или другими сухими изоляторами;

– немедленно вызвать врача, до прихода его делать пострадавшему искусственное дыхание и массаж сердца.

Без ознакомления с правилами техники безопасности студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются. Обязательство выполнять требования этой инструкции фиксируется в контрольном листе по технике безопасности под роспись.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЕЙ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Среди всего многообразия природных и искусственных материалов для материаловедения наибольший интерес представляют материалы на основе металлов (главным образом различные сплавы), а также полимеров: органических и неорганических (таких как стекла, керамика). Вследствие огромной практической значимости в настоящее время именно эти группы материалов лучше всего изучены (в том числе их структура).

### Единая иерархия уровней структурной организации различных материалов

Наблюдать, измерять, анализировать структуру материала можно невооруженным глазом, а также с помощью различных световых и электронных микроскопов (рис. 1). По мере детализации элементов структуры (структурных составляющих) и уменьшения их размеров могут быть использованы лупа, металлографический, электронный, автоионный, туннельный и атомно-силовой микроскопы. При этом возрастает достигаемое увеличение изображения (от  $\sim 2$  до  $\sim 200\,000$  раз) и выявляются новые детали структуры: от внешней формы образца, размера зерна в изломе до отдельных дислокаций и их ансамблей при использовании трансмиссионного электронного микроскопа.

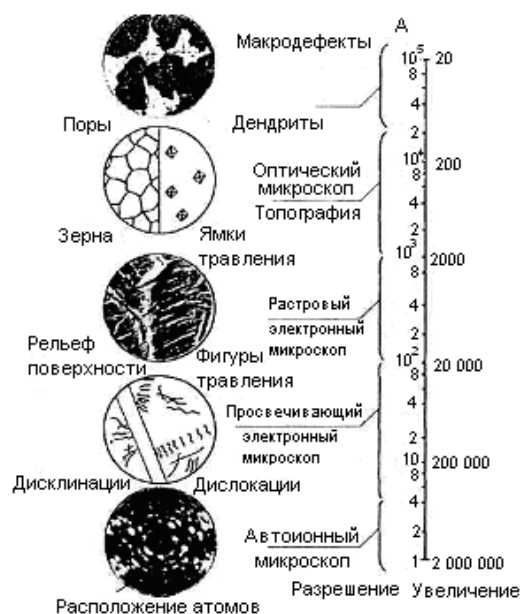


Рис. 1. Шкала увеличений и реальные примеры использования микроскопов при изучении структуры материалов

В металлографии (науке, изучающей структуру металлов и сплавов) структура материала традиционно подразделяется на четыре уровня (рис. 2, верхний ряд): макроструктура ( $\sim 10^{-1}$  м); микроструктура ( $\sim 10^{-4}$  м); субструктура ( $\sim 10^{-7}$  м); тонкая структура (субмикроструктура) ( $\sim 10^{-9}$  м). Современные достижения структурной химии и физики, а также механики привели к необходимости выработки общих подходов к иерархии структур по Л.И. Тушинскому (рис. 2, нижний ряд): макроструктура (вид излома, дендритное и полиэдрическое строение, размеры зерен и их ориентация,  $\sim 10^{-3} \dots \sim 10^{-1}$  м); мезоструктура (структура внутри зерен, дислокации и их ансамбли, дисклинации, ячейки, полигоны, их размеры и ориентация,  $\sim 10^{-7} \dots \sim 10^{-3}$  м); микроструктура (иначе – рентгеноструктура, точечные дефекты, размеры и тип кристаллических решеток, величиной  $\sim 10^{-10} \dots \sim 10^{-7}$  м), включая, видимо, и наноструктуры. Иногда в зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления различают следующие уровни структурной организации материала: тонкая структура, субструктура, микроструктура и макроструктура.

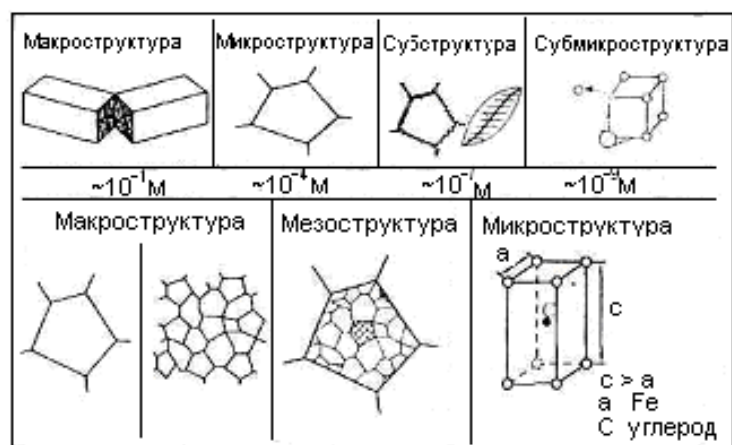


Рис. 2. Иерархия структур материалов (по Л.И. Тушинскому): верхний ряд – традиционная классификация; нижний ряд – новый подход (интеграция химии, физики, механики и материаловедения)

Данные классификации традиционно базируются на систематизации структур металлов (без попыток привязки к ним структур неметаллов, типа полимеров), а положения наноструктур в них определены недостаточно четко. Поэтому уточненную классификацию уровней структурной организации металлических и неметаллических материалов можно представить следующим образом: микроструктура (включая 3 подуровня: электронно-ядерная, молекулярная (образуют тонкую структуру) и наноструктура), мезоструктура и макроструктура. Размерные характеристики этих уровней для металлов и полимеров и элементы, их составляющие, приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Классификация основных уровней структурной организации металлических и полимерных материалов [1]

Уровни структуры и их размерный интервал	Структурные элементы в металлах	Структурные элементы в полимерах
<b>1. Микроструктура:</b>		
<i>m</i> <i>o</i> <i>n</i> <i>k</i> <i>a</i> <i>y</i> 1а) <i>электронно-ядерная</i> ; $\sim 1 - 5 \text{ \AA} (1-5 \cdot 10^{-10} \text{ м})$	Атомные остовы и обобществленные электроны, которые осуществляют химическую связь (преимущественно металлическую в металлах и ковалентную в полимерах); точечные дефекты: вакансии и т. д. (0,0001–0,0005 мкм)	
1б) <i>молекулярная</i> ; $\sim 5 - 10 \text{ \AA}$ $(0,5-1 \cdot 10^{-9} \text{ м})$	Молекулы в металлах отсутствуют	Фрагменты макромолекул (атомные группировки) и единичные межзвенные (ван-дер-ваальсовы (ВДВ) и водородные) связи (0,0005–0,001 мкм)
1в) <i>наноструктура</i> ; $\sim 10 - 10\,000 \text{ \AA}$ $(10^{-9} - 10^{-6} \text{ м})$	Наночастицы (0,001–0,1 мкм) и поверхности раздела; фрагменты, блоки, полигоны (0,1–1 мкм) и область когерентного рассеивания (0,001–0,01 мкм); линейные дефекты: дислокации и дисклинации (0,1–1 мкм)	Макро(олиго-)молекулы, внутри- и межмолекулярное ВДВ или водородное взаимодействие; НМС*: наночастицы и поверхности раздела; кристаллиты, ламели и границы раздела; линейные дефекты
<b>2. Мезоструктура</b> $\sim 10^4 - 10^7 \text{ \AA}$ $(10^{-6} - 10^{-3} \text{ м})$	Субзерна (1–100 мкм) и субграницы; зерна (100–1000 мкм) и границы между ними; поверхностные дефекты (дислокационные ансамбли)	НМС: небольшие аксиалиты, эдриты и сферолиты диаметром до нескольких десятков мкм; поверхностные и небольшие объемные дефекты (поры и т. д.)
<b>3. Макроструктура</b> $\sim 10^7 - 10^9 \text{ \AA} (10^{-3} - 10^{-1} \text{ м})$	Структуры, образованные зернами (волокна, дендриты и т. д.) и поверхность раздела; объемные дефекты (усадочные раковины, поры, трещины и т. д.)	НМС: крупные надмолекулярные образования в виде крупных аксиалитов, эдритов и сферолитов (от нескольких десятков мкм и выше); крупные объемные дефекты (трещины и т. д.)
*НМС – надмолекулярные структуры в полимерных материалах		



Причем данная классификация применима и для керамических материалов, так как их микроструктура (в том числе электронно-ядерная структура) во многом подобна полимерной (преимущественно ковалентное связывание ядер) и металлической (поликристалличность). Главные выводы, которые можно сделать, анализируя табл. 1:

1) электронно-ядерная структура является единой (общей по химической природе), базовой для любого вида металлического и неметаллического материала;

2) отличия в структуре последующих уровней (и, естественно, свойствах) усиливаются, начиная с молекулярного и нано-подуровней металлических и неметаллических материалов, а далее в мезо- и макроуровнях.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### Цель работы

1. Ознакомиться с различными видами полимерных теплоизоляционных материалов, применяемых в энергетике, и методами их получения.
2. Определить некоторые показатели образцов пенопластов, характеризующие структуру материалов.

#### Оборудование и материалы

Электронные весы, измерительная линейка, микроскоп МБС-10, пенопласт.

#### Теоретические положения

*Пенопласты* – это гетерогенные полимерные материалы, содержащие дисперсную или частично непрерывную газообразную фазу в полимерной матрице. Газовая фаза в пенопластах образует *закрытые* или *открытые* ячейки (*поры*). К пенопластам относят также пластики с *полым наполнителем*. Эти материалы имеют только закрытую структуру ячеек.

Свойства пенопластов определяются природой и свойствами полимерной фазы, соотношением полимерной и газовой фаз и фазовой структурой материала – формой и размерами ячеек, а также равномерностью их распределения по объему.

По природе полимерной фазы пенопласты делятся на *термопластичные (пенотермопласты)* и *терморреактивные (пенореактопласты)*. По объемному соотношению полимерной и газовой фаз, характеризующемуся *кажущейся плотностью*, пенопласты делят на *сверхлегкие* с кажущейся плотностью менее  $10 \text{ кг/м}^3$ , *легкие*, кажущаяся плотность которых меньше половины плотности монолитного полимера (менее  $500 \text{ кг/м}^3$ ), и *облегченные* (частично вспененные, подвспененные) с кажущейся плотностью более  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Различают также *эластичные (мягкие)*, *полужесткие* и *жесткие* пенопласты. Эта градация связана с отличиями в значениях кажущегося модуля упругости этих пеноматериалов. Обычно к эластичным относят пенопласты, имеющие напряжение сжатия при 50 %-ной деформации менее  $0,1 \text{ кгс/см}^2$ , а к жестким – более  $1,5 \text{ кгс/см}^2$ . Полужесткие пенопласты занимают промежуточное положение.

По соотношению закрытых ячеек и открытых пор пенопласты делят на *закрытоячеистые* и *пористые*. По распределению ячеек в объеме выделяют материалы с *равномерным распределением ячеек* и *интегральные* пенопласты с резко выраженным градиентом плотности от поверхности к центру.

Кажущаяся плотность пенопластов, их фазовая структура и свойства в решающей степени определяются способом и условиями получения материалов и их формования.

### **Методы получения пенопластов**

Технология получения пенопластов состоит из операций *приготовления композиции, введения газовой фазы* в полимерную среду (чаще всего путем вспенивания), *придания вспененной массе необходимой формы* с последующей ее фиксацией. Операция формообразования может предшествовать процессу вспенивания.

В процессе приготовления композиции совмещают ингредиенты пластической массы или резиновой смеси (форполимеры, олигомеры, полимеры, отвердители, катализаторы, пластификаторы, красители, стабилизаторы, наполнители, газообразователи и т. д.).

Для введения в полимерную среду газовой фазы применяют следующие способы:

- 1) смешивание композиции, находящейся в вязкотекучем состоянии, с газом при нормальном давлении (*механическое вспенивание*);
- 2) *насыщение композиций*, находящихся в вязкотекучем состоянии (расплавы полимеров, олигомеры, пасты, сырые резиновые смеси), *газом при высоком давлении*;
- 3) *насыщение композиций легкокипящими жидкостями*, которые при нагревании превращаются в пар;
- 4) введение в композицию веществ (*газообразователей*), разлагающихся при нагревании с выделением большого количества газообразных продуктов;
- 5) совмещение компонентов, взаимодействующих между собой с выделением большого количества газообразных продуктов;
- 6) получение заготовок прессованием из композиций, наполненных растворимыми в воде веществами, впоследствии вымываемыми;
- 7) спекание неуплотненных порошкообразных материалов или пористых заготовок, полученных из порошков прессованием в холодных формах.

При *механическом вспенивании* в растворы олигомеров или полимеров вводят поверхностно-активные вещества, способствующие равномерному распределению в объеме материала пузырьков газа и обеспечивающие устойчивость пены в течение времени, достаточного для отверждения смолы. Полученные этим способом материалы имеют преимущественно открытую структуру ячеек, так как растворитель, удаляясь в процессе сушки и отверждения из стенок ячеек, разрушает их. Этим методом получают пенопласты в основном из карбамидных смол и поливинилхлорида.

*Газом при высоком давлении* насыщают резиновые смеси, расплавы полимеров и полимерные пасты (суспензии полимеров в пластификаторе или мономере).

*Насыщение* термопластичных полимерных материалов, имеющих форму гранул, легкокипящими жидкостями производится в процессе их получения, например, при суспензионной полимеризации. Мономер и легкокипящую жидкость (изопентан, метилхлорид) подбирают таким образом, чтобы жидкость растворяла мономер, но не растворяла образующийся полимер. Выделение легкокипящей жидкости в виде отдельной фазы происходит в момент превращения капелек мономера в полимер. Поэтому в образующихся гранулах полимера появляются вкрапления равномерно распределенных капелек легкокипящей жидкости. Насыщенные таким образом гранулы засыпают в перфорированные стальные ограничительные формы и нагревают насыщенным водяным паром до температуры, превышающей температуру стеклования полимера. При этом происходит вспенивание гранул под давлением пара, образовавшегося из низкокипящей жидкости. Кажущаяся плотность получаемых пенопластов регулируется степенью заполнения ограничительной формы или содержанием низкокипящей жидкости в гранулах.

С помощью *газообразователей* получают пенопласты из термопластичных и термореактивных полимерных материалов. Изготовление пенопластов из термопластов производят обычно литьем, прессованием, вальцеванием, литьем под давлением, экструзией. Пенопласты из термореактивных пластмасс изготавливают вспениванием полуфабриката в ограничительной форме непосредственно перед или в процессе отверждения.

### **Свойства пенопластов и их применение в качестве теплоизоляционных и теплогидроизоляционных материалов в энергетике**

Низкий коэффициент теплопроводности пено- и поропластов позволяет успешно применять их для *теплоизоляционной* и *теплогидроизоляционной* защиты бетонных конструкций гидросооружений, подземных теплопроводов и других энергетических агрегатов и оборудования.

По назначению *теплогидроизоляция* подразделяется на надводную; изоляцию зон переменного горизонта воды; изоляцию зон изменяющегося горизонта воды; подземную.

Надводная изоляция должна обеспечивать защиту конструкций в атмосфере повышенной влажности от промораживания и резких температурных перепадов (обычно применяется только теплоизоляция). Для зон *переменного горизонта воды* теплогидроизоляция должна предотвращать разрушение бетона в условиях ежегодного многократного переменного замораживания и оттаивания. Теплогидроизоляция зон *изменяющегося горизонта воды* призвана защищать бетон от появления температурных трещин в условиях периодического воздействия воды, атмосферы повышенной влажности и резких температурных перепадов. *Подземная теплогидроизоляция* должна обеспечивать требуемый температурный режим сооружения в условиях механического воздействия водонасыщенного переменного замерзающего и оттаивающего грунта и агрессивного воздействия грунтовых вод.

В качестве основных материалов при устройстве полимерной теплогидроизоляции в основном применяют эпоксидные, эпоксидно-каменно-угольные и поливинилхлоридные пенопласты.

Как правило, пеноэпоксидная теплогидроизоляция выполняется в виде многослойного покрытия, состоящего из слоя эпоксидного пенопласта и защитного ограждения, которое может быть изготовлено из армированной эпоксидной гидроизоляции либо из листового металла или железобетонных плит.

Теплофизическими расчетами установлено, что покрытие толщиной 5 см из пеноэпоксидов с плотностью  $200 \text{ кг/м}^3$  практически исключает влияние наружных температурных колебаний.

Основные физико-механические и теплогидроизоляционные свойства эпоксидных пенопластов представлены в табл. 1.1.

Пенополивинилхлоридная теплогидроизоляция выполняется в виде многослойного покрытия и состоит из нескольких слоев плит поливинилхлоридных пенопластов, соединенных эпоксидным пенопластом, и из защитного ограждения из армированной эпоксидной гидроизоляции. Толщина теплогидроизоляционного слоя определяется в каждом конкретном случае теплотехническими расчетами.

*Теплоизоляция* предназначена для защиты надводных гидротехнических конструкций от резкой смены температур и от длительного действия низких температур (в северных районах). Полимерная теплоизоляция выполняется из фенольных, полистирольных, поливинилхлоридных и других пенопластов.

Типовая конструкция такой теплоизоляции включает слой пенопласта, толщина которого определяется теплотехническими требованиями, и защитный слой из окрасочной или армированной гидроизоляции, железобетона и других материалов. В качестве примера в табл. 1.2 приведены свойства пенополистирольных теплоизоляционных материалов.

Таблица 1.1

Свойства эпоксидных пенопластов

Показатели	Материалы	
	Пеноэпоксиды	Эпоксидно-каменноугольные
Предел прочности при сжатии, МПа	2,4–5,0	2,5–4,0
Предел прочности при растяжении, МПа	1,0–2,0	0,7–1,5
Предел прочности при изгибе, МПа	3,0–3,5	2,5–3,0
Полное объемное водопоглощение, %	4–2	5–9
Капиллярное водопоглощение, % объема	0–2	0,3–3,5
Гигроскопическое объемное водопоглощение, %	0–1	0,3–0,6
Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)	0,053–0,067	0,067–0,081
Объемная усадка, %	0,7–0,8	1,0–3,2

Таблица 1.2

Свойства пенополистирольных материалов

Показатели	Материал			
	ПС-1	ПС-4	ПС-Б	ПСБ-С
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	70–200	50–80	20–100	22
Предел прочности при сжатии, МПа	3–30	4	0,3–3,0	0,86
Водопоглощение за 24 часа, %	0,3	0,3	0,2–0,06	0,047
Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)	0,035	0,029–0,035	0,046	0,046

**Рабочее задание**

1. Изучите технологию работы с пенопластом.
2. Определите кажущуюся плотность образцов.
3. Вычислите размер ячеек и степень однородности ячеистой структуры пенопластов.

**Порядок и методика выполнения работы**

1. Определите кажущуюся плотность образцов.

Образцы пенопластов в форме куба взвесьте с точностью до 0,01 г. С помощью измерительной линейки определите геометрические размеры образцов с точностью до 1 мм и вычислите объем  $V$  (м<sup>3</sup>). Кажущуюся плотность образцов  $\gamma$  (кг/м<sup>3</sup>) найдите по формуле:

$$\gamma = m / V, \quad (1.1)$$

где  $m$  – масса образца (кг).

2. Определите размер ячеек и степень однородности ячеистой структуры пенопластов.

Срежьте тонкий слой гранул образца пенопласта и поместите его на предметный столик микроскопа МБС-10, в окуляре которого имеется шкала с известной ценой деления. Затем выберите участок поверхности образца площадью  $S$  (см<sup>2</sup>) и подсчитайте число ячеек, находящихся на этой поверхности. Переместите образец дважды и повторите замеры.

Поперечный диаметр  $d_1$  ячеек рассчитайте по формуле

$$d_1 = 2 \cdot S / \pi n (1 - \gamma / \rho_n),$$

где  $n$  – число ячеек на площади  $S$ ;  $\gamma$  – плотность пенопласта, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – плотность полимера, кг/м<sup>3</sup> (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Плотность некоторых полимеров, используемых в производстве пенопластов

Полимер	Полистирол	Полиэпоксиды	Полиуретан	Поливинилхлорид
Плотность	1050	1180	1120	1350

Средний диаметр  $d_{\text{ср}}$  ячеек рассчитайте как средне-арифметическое значение.

Степень однородности ячеистой структуры пенопласта вычислите по формуле:

$$v_d = d / d_{\text{ср}} \cdot 100 \%,$$

$$\Delta d = d_1 - d_{\text{ср}},$$

где  $d_1$  – диаметр ячейки в первом месте блока,  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр.

Результаты оформите в виде табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты расчета

Пенопласт	$m$ , г	$V$ , м <sup>3</sup>	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$S$ , см <sup>2</sup>	$n$	$d_1$	$d_{\text{ср}}$	$\Delta d$	$v_d$

3. Оформите отчет по работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение пенопластам.
2. Расскажите, от каких факторов зависят свойства пенопластов.
3. Охарактеризуйте способы введения газовой фазы в полимерную среду.
4. Расскажите, какое применение находят пенопласты в энергетике.
5. Опишите методику определения кажущейся плотности пенопластов.
6. Поясните, как определяют степень однородности ячеистой структуры пенопласта.



## Лабораторная работа № 2

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТАЛЬНЫХ МИКРОШЛИФОВ

#### Цель работы

Освоить методику изготовления шлифов различных металлов и сплавов для микроскопического исследования.

#### Оборудование и реактивы

Образцы различных материалов и сварных соединений из разнородных и однородных материалов (образец для изготовления микрошлифа); шлифовальный станок; полировальный станок; полировальная жидкость (водная суспензия абразива), фильтровальная бумага, раствор для травления – 4 % раствор  $\text{HNO}_3$  в  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ; микроскоп МИМ 7.

#### Теоретические положения

Изучение строения металлов и сплавов начинается с помощью наиболее простого и широко распространенного в научных и заводских лабораториях метода – световой микроскопии (часто этот метод называют металлографическим, хотя это понятие в принципе более широкое). Методом световой микроскопии изучают размеры, форму, взаимное расположение кристаллов (зерен), достаточно крупные включения в них, некоторые дефекты кристаллического строения (двойники, дислокации).

Так как большинство материалов – вещества непрозрачные (для видимого света), то форму кристаллов, а также их размер и взаимное расположение изучают на специально изготавливаемых микрошлифах.

Микрошлиф – это образец, поверхность которого подготовлена для микроанализа.

Правильное изготовление шлифов имеет важное значение, поскольку от этого зависит правильность толкования микроструктур.

Образец для исследования должен иметь микроструктуру, характерную для всего изучаемого изделия или его определенной части. Поскольку микроструктуру изучают в отраженном свете, имеет значение не только участок изделия, из которого отбирают образец, но и положение на образце исследуемой поверхности. Например, микроструктуру листового металла часто изучают в поверхности листа, а также в его продольном и поперечном сечениях; при исследовании изделий с измененным поверхностным слоем изучаемая поверхность образца должна пересекать этот слой и т. д.

Основной момент, о котором нужно помнить, – это предотвращение повреждения поверхности шлифа, состоящее в изменении микроструктуры поверхностного слоя материала в результате деформации или нагрева.

### **Форма и размеры микрошлифов**

Наиболее удобны простые формы образцов: цилиндр, куб. Образцы изготавливают со скошенными углами на поверхности микрошлифа, чтобы при полировке не рвать сукно. Размеры образцов: диаметр 10–20 мм или сторона квадрата 10–20 мм при высоте 10–15 мм.

Мелкие образцы неудобной формы (тонкие листы, проволока и т. д.) должны быть заключены в специальные приспособления: струбцины (винтовые зажимы), запрессовка в специальные формы, заливка эпоксидными смолами и терморезактивными пластмассами. В случае применения струбцин для сохранения краев образцов следует использовать прокладки между стенками зажима и образцом. Очень распространен способ заливки мелких образцов в легкоплавкие сплавы или пластмассы, твердеющие при комнатной температуре (эпоксидная смола и др.). При заливке на плоскую поверхность устанавливают обойму, внутрь нее помещают образец, а свободное пространство заливают соответствующим веществом, после застывания которого снимают обойму и приступают к изготовлению микрошлифа.

### **Отбор образца для микрошлифа**

Образец должен правильно представлять свойства исследуемого материала, поэтому отбор образцов должен быть произведен по продуманному плану, соответствующему задаче исследования, с учетом размеров, формы и металлургического происхождения изделия.

Иногда исследование более эффективно проводить на косых шлифах.

Изготовление косых шлифов осуществляется путем наклона поверхности полировки на небольшой угол к поверхности образца. Угол в  $5044''$  дает 10-кратное увеличение ширины.

Образцы вырезают ножовкой на токарном, фрезерном, строгальном станках. Из металлов и сплавов, обладающих высокой твердостью и плохой обрабатываемостью, образцы вырезают на тех же станках с применением режущего инструмента, изготовленного из твердых или сверхтвердых сплавов, либо при помощи тонкого наждачного круга, а также электроискровой резки. Из хрупких материалов образцы отбирают с использованием алмазного инструмента.

При механической обработке должны быть приняты меры, предохраняющие образцы от разогрева, если это связано с изменением структуры.

Изготовление микрошлифа сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- 1) выравнивание поверхности среза или излома грубой шлифовкой;
- 2) тонкая шлифовка;
- 3) полировка;
- 4) выявление микроструктуры (если необходимо).

### **Грубая шлифовка**

Грубая шлифовка преследует цель выровнять всю поверхность образца и проводится на абразивных кругах; мягкие или очень хрупкие металлы и сплавы шлифуют напильником или грубой наждачной бумагой. При шлифовке на абразивных кругах следует применять во избежание нагрева интенсивное охлаждение. Шлифовку заканчивают после полного выравнивания всей поверхности среза (шлифа).

Тонкая шлифовка проводится после грубой шлифовки на образцах, очищенных от частиц металла и абразивов. Она производится с целью максимального уменьшения неровностей на обрабатываемой поверхности. Тонкая шлифовка проводится на шлифовальной бумаге различной зернистости на специальных станках или вручную.

В качестве абразива, нанесенного на шлифовальную бумагу, используют корунд, карборунд и другие твердые вещества вплоть до алмаза. Размер абразивного порошка на различных сортах шлифовальной бумаги может изменяться от 150 до 3,5–5 мкм. Перед тонкой шлифовкой образец очищают от частиц металла и абразива.

Шлифовку проводят на 4–5 номерах шлифовальной бумаги, которые выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

При шлифовке вручную шлифовальную бумагу помещают на стекло для создания ровной и твердой подкладки, и образец перемещают по бумаге, слегка его прижимая; образец совершает при этом возвратно-поступательное движение. Шлифуют до тех пор, пока на поверхности не исчезнут следы предыдущей обработки. Затем переходят к шлифовке на более тонкой шлифовальной бумаге, причем образец предварительно очищают от налипшей наждачной пыли. Шлифовку на каждом новом сорте бумаги производят в направлении, перпендикулярном следам (рискам) от предыдущей обработки. Обычно тонкую шлифовку производят на 4–5 сортах шлифовальной бумаги. После завершения обработки образец промывают струей воды.

Для получения качественной поверхности микрошлифа при шлифовании последовательно переходят от одного номера наждачной бумаги к другому с непрерывно уменьшающимися размерами абразивных частиц и при этом при каждой смене бумаги поворачивают шлиф на 90°. При более тонких размерах абразивных частиц снижается глубина рисок на поверхности и уменьшается толщина деформированного поверхностного слоя, получаемого в результате шлифования. Обычно принимают, что толщина этого слоя в 10–50 раз превышает размер абразивных частиц. При этом, чем меньше твердость образца, тем более значительной оказывается деформация поверхностного слоя. В подобных случаях надо уменьшать усилие прижима образца к поверхности шкурки. Кроме того, для шлифования мягких металлов шкурку предварительно смачивают керосином или натирают парафином, чтобы избежать вдавливания в поверхность образца абразивных частиц.

После шлифования поверхности образца следует полирование, которое должно устранить риски, оставшиеся от воздействия абразивных частиц.

Однако в некоторых случаях перед полированием проводят еще одну операцию – притирку на шлифовальном круге, на поверхность которого наносят абразивные частицы путем их запрессовки, они либо непрерывно подаются с током воды, либо наносятся в виде паст. На рис. 2.1 показана различная степень готовности микрошлифа.

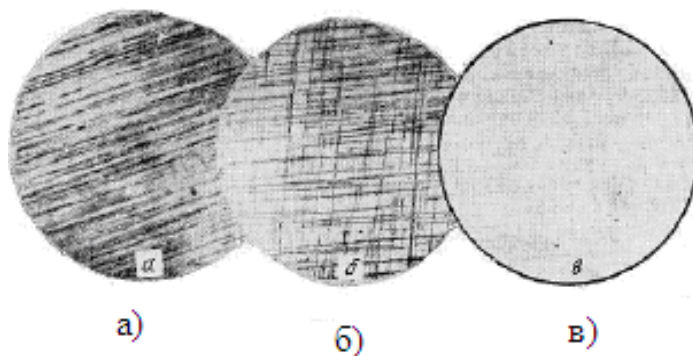


Рис. 2.1. Различная степень готовности микрошлифа:

*а* – подготовлен к более тонкой шлифовке; *б* – требуется продолжение шлифовки на данном абразиве; *в* – состояние поверхности микрошлифа после полировки

### **Полирование плоскости образца**

Полированием удаляют оставшиеся после тонкой шлифовки мелкие дефекты поверхности, риски и т. п. Полировка необходима для окончательного выравнивания поверхности микрошлифа.

Применяют механический, химико-механический и электрохимический способы полировки.

Механическая полировка проводится на специальном полировальном станке, диск которого обтянут фетром, сукном или бархатом. Диск станка смачивают полировальной жидкостью, состоящей из воды, в которой во взвешенном состоянии находятся частицы полировального порошка: окиси алюминия или окиси хрома. Абразив (в виде взвеси или пасты) наносят на круг и полируют образец до тех пор, пока его поверхность не станет зеркально гладкой.

Сейчас очень часто для полирования используют алмазные пасты, содержащие алмазные микропорошки марки АСМ или АМ, связующие и поверхностноактивные вещества, которые наносят на лист бумаги, закрепленный на вращающемся круге полировального станка.

В случае химико-механического полирования используют полировочные абразивные частицы совместно с химическими веществами, способствующими ускорению полирования.

Электролитическую полировку ведут в разнообразных электролитах, причем образец присоединяют к положительному электроду. Линии тока концентрируются на выступах неровностей, что приводит к ускоренному растворению выступов; в результате поверхность шлифа становится зеркальной. На полированной поверхности должны отсутствовать риски и другие неровности.

Электролитическую полировку применяют для изготовления шлифов из мягких материалов, когда абразивная обработка не дает высокого качества поверхности, а также вызывает поверхностную деформацию и, следовательно, изменение микроструктуры. Для некоторых материалов проводят химическую полировку, при которой неровности, созданные шлифовкой, растворяются в соответствующем реактиве.

Электрохимическое полирование проводят в ваннах, наполненных электролитом, причем образец является анодом. Шлифованную поверхность образца устанавливают против катода. Под действием тока выступы шлифованной поверхности растворяются, а впадины сглаживаются, в итоге поверхность образца становится зеркальной.

Полировку заканчивают после того, как микрошлиф приобретает зеркальную поверхность при полном отсутствии на нем рисок.

После полировки микрошлиф промывают водой, высушивают теплым воздухом или фильтровальной бумагой и рассматривают под микроскопом при небольшом увеличении (100-кратном). При исследовании микроструктуры материалов для наблюдения микрошлифов применяют специальные микроскопы, в которых луч от источника света, отражаясь от шлифа, проходит через объектив и окуляр, создавая соответствующее

увеличение. Однако оптический микроскоп не является аппаратом, который может обнаружить кристаллик любого размера.

Чтобы выявить структуру, следует создать рельеф или окрасить в разные цвета структурные составляющие, что достигается обычно химическим травлением. При травлении кислота в первую очередь воздействует на границы фаз и зерен как места, которые имеют наиболее дефектное строение и на травленном шлифе станут углублениями. Свет, падая на них, будет рассеиваться, и в поле зрения микроскопа они будут казаться темными, а тело зерна – светлым. Очень сложно выбрать травитель и условия травления для выявления структуры переходных зон в композиционных материалах и соединениях разнородных материалов вследствие их различной травимости.

При исследовании поверхности металла под микроскопом непосредственно после полировки можно обнаружить на общем светлом поле отдельные темные и серые точки и линии, которые представляют собой как неметаллические включения (окислы, сульфиды, нитриды, силикаты, графит, шлак), так и не устраненные полировкой дефекты поверхности образца (микротрещины, раковины и пр.).

Выявление полной картины микроструктуры (формы и размера зерен, глубины упрочнённого слоя, наличия фаз, структурных составляющих и пр.), возможно после травления полированного микрошлифа. Перед травлением поверхность образца обезжиривают спиртом.

Применяются методы химического или электрохимического травления, слабого окисления, термического травления и т. д. Выбор метода выявления структуры, режима травления и состава травителей определяется природой сплава и целью исследования.

При химическом или электрохимическом травлении происходит более быстрое растворение металла вблизи границ зерен по сравнению с сердцевиной зерна. Это обусловлено тем, что атомы приграничной зоны имеют повышенную энергию, благодаря чему облегчен их отрыв от поверхности металла в результате взаимодействия с реактивом. Помимо этого, реактив по-разному взаимодействует с кристаллитами разных фаз в сплаве и даже с зёрнами одной фазы, имеющими неодинаковую ориентировку по отношению к поверхности шлифа. Последнее связано с тем, что в таких зёрнах атомы поверхностного слоя удерживаются разным числом соседей, из-за чего отрыв атомов с поверхности происходит с неодинаковой скоростью.

Термическое травление производят путем нагрева полированного микрошлифа в неокисляющей атмосфере. При высокой температуре осуществляется уход атомов из участков с повышенной энергией путем испарения или диффузии, благодаря чему на границах зерен образуются канавки.

При окислении полированной поверхности образца (путем нагрева на воздухе либо травления реактивами) на зернах разных фаз или кристаллитах одной фазы, имеющих разную ориентировку, образуются окисные пленки разной толщины. Цвет тонкой окисной пленки зависит от ее толщины, а также от природы окисла. Благодаря различной окраске можно отличить отдельные зерна в структуре; их можно также различить при наблюдении в поляризованном свете, поскольку окисные пленки разной природы и разной кристаллографической ориентировки имеют неодинаковые оптические свойства.

В некоторых случаях микроструктуру можно исследовать, не прибегая к дополнительной обработке полированной поверхности, например при изучении неметаллических включений или при исследовании в поляризованном свете оптически анизотропных металлов (металлы с гексагональной или тетрагональной кристаллической решеткой).

### **Рабочее задание**

1. Изучите технологию изготовления микрошлифа.
2. Произведите шлифовку и полировку выданного образца. Изучите микроструктуру полированного микрошлифа.
3. Произведите травление микрошлифа с целью обнаружения микроструктуры.

### **Порядок и методика выполнения работы**

1. На сварном образце «железо + углеродистая сталь» изготовьте микрошлиф посредством механической шлифовки и полировки.
2. На сварном образце из нержавеющей или жаропрочной стали изготовьте микрошлиф путем механической шлифовки (на 2–3 номерах наждачной бумаги) и электролитической полировкой.
3. Выявите микроструктуру сварных образцов химическим и электролитическим травлением.

Работу выполните за одно занятие, на котором изготовьте микрошлиф, выявите на нем микроструктуру и зарисуйте ее.

Тонкую шлифовку образцов производите на станке. Образцы железа, углеродистой стали и чугунов отполируйте механически, образцы нержавеющей стали – электролитически (реактив – концентрированная азотная кислота, плотность тока  $1\text{--}5\text{ А/см}^2$ ).

Травление образцов железа, углеродистой стали и чугуна проведите 4 %-ным водным или спиртовым раствором азотной кислоты в течение 10–20 с. После травления шлиф промойте струей воды и быстро высушите фильтровальной бумагой.

При травлении 4 %-ным раствором азотной кислоты обе фазовые составляющие углеродистых сталей – феррит и цементит – не окрашиваются, реактив лишь выявляет границы между зернами и межфазные границы. Травление щелочным раствором пикрата натрия позволяет отличить цементит от феррита: на цементите образуется окрашенная оксидная пленка, а феррит остается светлым (состав реактива: 20–25 г едкого натра, 2 г пикриновой кислоты, 100 см<sup>3</sup> воды; реактив нагревают до 80 °С и на 15–25 мин погружают в него полированный шлиф). Цементит можно отличить от феррита, «окрасив» его другим способом. Шлиф, протравленный 4 %-ным раствором азотной кислоты, помещают в муфельную печь на 10–15 мин при 400–450°С, а затем охлаждают на воздухе. В результате взаимодействия с кислородом воздуха (в начале при нагреве, а затем при охлаждении) поверхность шлифа окисляется и приобретает синий цвет с коричневым отливом. При наблюдении в микроскоп феррит имеет голубую окраску, а цементит – розоватую.

Микроструктура образцов нержавеющей стали выявляется путем электрохимического травления (реактив – концентрированная азотная кислота, плотность тока 0,1 А/см<sup>2</sup>). Поскольку для полировки и травления используется один и тот же реактив, эти операции можно совместить, последовательно перейдя от режима полировки к режиму травления.

4. Оформите отчет по работе.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение микрошлифу.
2. Расскажите о цели шлифования и о способе его производства.
3. Перечислите исследования, которые можно провести под микроскопом на нетравленном шлифе.
4. Расскажите, на чем основано травление микрошлифа. Опишите применяемые методы травления.
5. Перечислите, для каких металлов и сплавов рекомендуют электролитическое травление.
6. Охарактеризуйте порядок приготовления микрошлифов.
7. Определите назначение косого шлифа и способы его приготовления.
8. Поясните, какие шлифовальные и полировальные материалы применяют для приготовления шлифов.
9. Назовите цель и способ проведения полировки образца. Расскажите, как ее произвести для углеродистой стали, для мягких материалов; нержавеющей стали.
10. Опишите существующие методы выявления структуры на шлифе.



## Лабораторная работа № 3

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ И ЕЕ НЕКОТОРЫХ СПЛАВОВ

#### Цель работы

Изучить основные свойства и области применения меди и сплавов на их основе (бронз и латуней); освоить методики определения мезоструктуры цветных металлов и сплавов; научиться расшифровывать марки цветных металлов и сплавов.

#### Оборудование и материалы

Металлографический микроскопы и микроскринер, микрошлифы образцов.

#### Теоретические положения

Цветные сплавы являются более дорогими и дефицитными, чем черные. Однако благодаря их особым физическим, технологическим и эксплуатационным свойствам они нашли достаточно широкое применение. В настоящей работе рассматриваются медь и ее сплавы.

#### Медь. Ее структура, свойства и маркировка

Медь – достаточно тяжелый металл ( $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$ ) красно-розового цвета с кристаллической кубической гранцентрированной решеткой (ГЦК) с периодом 0,36153 нм, имеющий температуру плавления 1083 °С. Чистая медь имеет ряд ценных технических свойств. Она отличается высокой тепло- и электропроводностью, хорошей коррозионной стойкостью в обычных атмосферных условиях, в пресной и морской воде и других агрессивных средах, но имеет плохую устойчивость в сернистых газах и аммиаке, растворяется в кислотах-растворителях. По электропроводности медь занимает второе место после серебра, что обуславливает ее преимущественное применение в электротехнике в качестве материала для проводников электрического тока. По теплопроводности медь также уступает только серебру и широко используется в различного рода теплообменниках.

Механические свойства меди зависят от ее чистоты и состояния. Медь обладает небольшой прочностью и высокой пластичностью: предел прочности отожженной меди составляет 200 МПа, предел текучести – 80 МПа, поперечное сужение – 80–95 %, относительное удлинение – 35 %.

Марки технической меди – М00, М0, М0б, М1б, М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р (б – бескислородная, р – раскисленная). Содержание примесей – от 0,01 до 0,5 %. Наиболее вредными примесями, вызывающими горячеломкость (красноломкость) меди и ее сплавов, являются свинец (допустимое содержание 0,04 %) и особенно висмут (допустимое содержание 0,001 %), который порождает также и хладноломкость.

Марки меди обозначаются прописной буквой М, справа от которой ставится номер: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М4 (99,0 % Cu). Чем чище медь, тем меньше ее номер. Все примеси снижают электропроводность меди. Для проводников тока применяется чистая медь марок М0, М1, а в электронике и электровакуумной технике – бескислородная медь М0б (99,97 % Cu) и медь вакуумной очистки М00.

На рис. 3.1 показана мезоструктура отожженной меди. Зерна меди имеют форму неправильных многогранников с двойниками скольжения, характерными для высокопластичных металлов с решеткой ГЦК.

В качестве конструкционного материала медь не получила применения из-за низкой прочности. Используют медь благодаря ее токо- и теплопроводящим свойствам в электротехнике (проводники, шины, коллекторы) как материал для теплообменников, водоохлаждаемых изложниц, кристаллизаторов, поддонов.

Структура деформированной и отожженной технической чистой меди – полиэдрические зерна с двойниковыми образованиями.

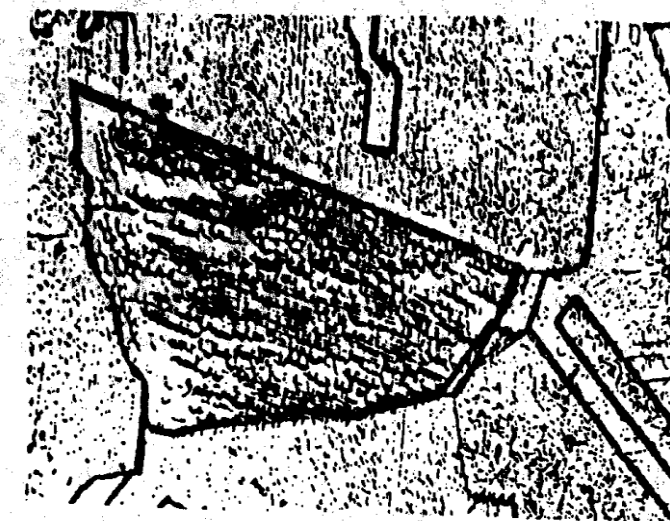


Рис. 3.1. Мезоструктура отожженной меди:  
зерна меди с двойниками скольжения

## Медные сплавы и их маркировка

Различают следующие группы сплавов на основе меди: латуни (сплавы, где основным легирующим элементом является цинк), бронзы (сплавы с различными другими элементами) и медно-никелевые сплавы, которые в данной работе не рассматриваются.

Сплавы на основе меди (латуни и бронзы) имеют более высокие прочностные свойства и широко применяются в машиностроении. Медные сплавы отличаются высокими механическими и технологическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии.

Маркируют сплавы в соответствии с их химическим составом. Легирующие элементы обозначают русскими буквами: О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, Ж – железо, Ф – фосфор, Б – бериллий, А – алюминий, Н – никель, С – свинец, Х – хром, К – кремний и т. д.

Цифры обозначают количество соответствующих элементов в процентах. Если сплав деформируемый, то после букв Л (латунь) или Бр (бронза) перечисляют элементы, а затем соответственно их количество (ЛАН 59-3-2, БрАЖ9-4, Л62), причем в латунях первая цифра отражает содержание меди, количество цинка определяется по остатку. У бронз буквы указывают на наличие легирующих элементов, а цифры – их содержание в сплаве (в процентах), по остатку определяется количество меди. В литейных сплавах буквы, обозначающие добавки, и цифры содержания чередуются (ЛЦ40С, БрА11Ж6Н6).

Примерный состав и свойства некоторых медных сплавов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

### Примерный химический состав и механические свойства некоторых латуней и бронз

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, %	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Л96	4 Zn, 96 Cu		
Л59	41 Zn, 59 Cu		
БрА5	5 Al, 95 Cu		
БрА10	10 Al, 90 Cu		
БрАЖМц10-3-1,5	10 Al, 3 Fe, 1,5 Mn, 85,5 Cu		
БрБ2 (после закалки и старения)	2 Be, 98 Cu	1150–1250	4–6
БрОФ6,5-0,15	6,5 Sn, 0,15 P, 93,35 Cu		
БрС30	30 Pb, 70 Cu		

## Латуни

Латуни – сплавы меди с цинком. Латуни называют простыми, или двойными, если в них входят только медь и цинк, и сложными, или легированными (многокомпонентными), если в них введены другие элементы. В технике применяют латуни с содержанием цинка до 45 %.

Структура латуней описывается диаграммой состояния Cu–Zn. При комнатных температурах до 39 % цинка растворяется в меди, образуя  $\alpha$ -фазу – твердый раствор замещения цинка в меди. При большем содержании цинка наряду с  $\alpha$ -фазой появляется  $\beta'$ -фаза – упорядоченный твердый раствор на основе электронного соединения CuZn с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК). Эта фаза является твердой и хрупкой составляющей.

С увеличением содержания цинка прочность латуней повышается, особенно у двухфазных латуней, пластичность же возрастает до концентрации цинка 30–32 %, а затем резко уменьшается. В связи с этим однофазные латуни пластичны, отличаются высокой технологичностью, легко деформируются как в горячем, так и в холодном состояниях; двухфазные латуни обычно подвергают только горячей обработке давлением, так как малопластичны в холодном состоянии. Они менее технологичны (из-за наличия в структуре твердой  $\beta'$ -фазы).

Микроструктура деформированной и отожженной однофазной латуни представляет полиэдрические зерна  $\alpha$ -фазы твердого раствора с двойниковыми образованиями; из-за явления оптической анизотропии зерна могут быть неодинаково окрашены. Структура двухфазных латуней в литом состоянии состоит из светлых кристаллов  $\alpha$ -фазы и темных  $\beta'$ -фазы (рис. 3.2).

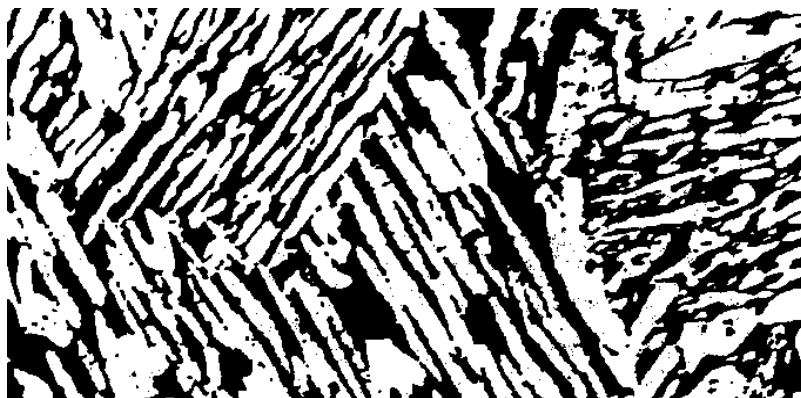


Рис. 3.2. Мезоструктура латуни Л59 в литом состоянии: дендриты  $\alpha$ - и  $\beta'$ -фаз

Кроме двухкомпонентных латуней (сплавов меди и цинка) применяют специальные латуни, которые содержат дополнительно один или несколько элементов. Легирующие элементы сообщают латуням более высокие свойства. Алюминий повышает сопротивление коррозии из-за образования на поверхности плотной защитной окисной пленки  $Al_2O_3$ , существенно повышает прочность, особенно в сочетании с никелем, марганцем, железом, кремнием; никель улучшает технологические свойства и коррозионную стойкость, олово тормозит коррозию в морской воде, свинец улучшает обрабатываемость резанием, железо измельчает зерно и наряду с небольшим количеством марганца увеличивает пластичность. Легирующие элементы (кроме свинца) увеличивают прочность и твердость латуни, *Si* повышает сопротивление коррозии.

В современной технике применяют как деформируемые, так и литейные латуни, из которых получают плотные, лишенные ликвации отливки с высокими механическими свойствами, однако при литье существуют определенные трудности из-за возникновения крупных усадочных раковин. Латуни применяются для изготовления деталей масло- и воздухоохладителей, трубок конденсаторов, уплотнительных сегментов турбин, работающих при температурах ниже 300 °С, а также для изготовления корпусов кранов, тройников, шпилек, штуцеров, болтов и других деталей. Несмотря на худшую по сравнению с медью электропроводность, латуни марок Л68 и Л62, вследствие их меньшей стоимости, идут на изготовление некоторых токоведущих деталей.

Основной вид термической обработки латуней – отжиг для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением, для получения в готовых полуфабрикатах нужных свойств, а также для устранения склонности к сезонному растрескиванию, которому подвержены латуни. Латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 – единственный известный дисперсионно твердеющий сплав, эффективно упрочняющийся в результате закалки и старения или при помощи низкотемпературной механической обработки (НТМО). Прочность латуней можно повысить нагартовкой, но при этом снижается пластичность сплава.

Из простых однофазных латуней изготавливают проволоку, ленты, листы, трубы, фурнитуру, что требует больших степеней деформации при производстве даже без нагревания. В частности, латунь Л96 применяют для изготовления радиаторных и конденсаторных трубок. Из простых двухфазных латуней (Л159) заготовки производят только способом горячей

деформации (листы, прутки, трубы, штамповки). Специальные латуни применяют для изготовления широкого ряда ответственных деталей с высокими свойствами, в том числе антифрикционными, в морском, химическом машиностроении, для теплотехнической аппаратура, крепежных изделий и арматуры, зубчатых колес, втулок и т. д.

## **Бронзы**

Бронзами называют сплавы меди с другими металлами, кроме цинка. Цинк может входить в состав бронз (как добавка), но не является основным компонентом.

Бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием, имеют хорошие литейные и высокие антифрикционные свойства. Бронзы превосходят латуни в прочности и сопротивлении коррозии, особенно в морской воде.

Исходя из химического состава, бронзы делятся на оловянные и безоловянные.

В настоящее время применяемые в промышленности бронзы весьма многообразны, в данной работе будут рассмотрены только некоторые группы.

### **Оловянные бронзы**

Это традиционные сплавы, которые из-за высокой стоимости и дефицитности олова часто заменяют так называемыми безоловянными бронзами. Наибольшее практическое значение имеют бронзы, содержащие не более 20 % олова. Диаграмма состояния «медь – олово» достаточно сложна, указывает на существование в зависимости от состава и температуры весьма разнообразных фаз и структурных составляющих. Однако структура сплавов, полученных в реальных производственных условиях, очень отличается от равновесной. До 5–6 % олова в сплавах существует однофазный раствор замещения олова в меди ( $\alpha$ -фаза). При большем содержании олова (6–10 %) в структуре появляется эвтектид ( $\alpha + \delta$ ), где  $\delta$ -фаза – электронное соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  со сложной кубической решеткой (рис. 3.3). Он имеет высокую твердость и хрупкость, его появление в сплаве вызывает резкое снижение пластичности и вязкости, повышает твердость и износостойкость. С увеличением содержания олова свыше 10 %, вследствие присутствия в структуре значительного количества хрупкого соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , пластичность оловянных бронз резко снижается.

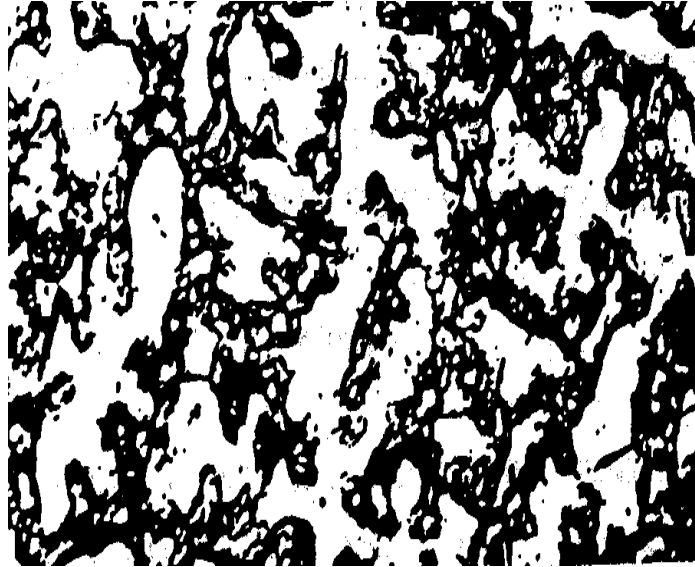


Рис. 3.3. Мезоструктура бронзы БрОФ10-1 в литом состоянии: дендриты  $\alpha$ -фазы (белого цвета) и эвтектоид  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  (темный) между ними

В микроструктуре двухфазных бронз эвтектоид выглядит в виде темных образований по границам светлых зерен твердого раствора. Широкий интервал кристаллизации обуславливает у оловянных бронз большую склонность к дендритной ликвации, низкую жидкотекучесть, рассеянную усадочную пористость и поэтому невысокую герметичность отливок. Для улучшения свойств, в том числе технологических, а также для уменьшения стоимости бронзы легируют. Цинк растворяется в меди, улучшает литейные свойства бронз, удешевляет их. Свинец повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием. Фосфор, являясь раскислителем бронз, улучшает их жидкотекучесть, твердость, упругие и антифрикционные свойства, при этом ухудшает технологическую пластичность. Он образует фосфид меди  $\text{Cu}_3\text{P}$ . Никель способствует измельчению структуры, повышению механических свойств, коррозионной стойкости, плотности отливок и уменьшению ликвации. Оловянные бронзы превосходят медь и латуни по коррозионной стойкости, особенно в морской воде.

Основными видами термической обработки являются гомогенизация и промежуточный отжиг, направленные на облегчение обработки давлением.

Однофазные бронзы относятся к деформируемым. Из них изготавливают прутки, ленту, проволоку, пружины, мембраны. Примером может служить бронза БрОФ4-0,25. Деформируемые бронзы (БрОФ6,5-0,15) применяют для изготовления упругих элементов (мембран, пружин), сеток в аппаратостроении.

Двухфазные бронзы не прокатываются и не куется из-за наличия хрупкой  $\delta$ -фазы и применяются только в литом виде. Высокие литейные свойства бронз определяются их малой усадкой (менее 1 %, тогда как усадка латуни и чугуна 1,5 %, сталей – более 2 %). Бронзы с повышенным содержанием олова (литейные), особенно с добавками фосфора, используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников кранов, шестерен, червячных винтов и других деталей, работающих на трение. Одной из наиболее широко применяемых литейных бронз является бронза БрОФ10-1. Она отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошими антифрикционными свойствами. Эта бронза используется для деталей, работающих в условиях сильного износа при статических и ударных нагрузках: фрикционные и зубчатые колеса, венцы червячных колес, вкладыши тяжело нагруженных подшипников и др.

### **Безоловянные бронзы**

К безоловянным бронзам относят сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами.

Алюминиевые и кремнистые бронзы дешевле оловянных и вместе с тем превосходят их по ряду качеств. Алюминиевые бронзы БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4 имеют более высокие прочностные свойства. Кремнистые бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3, благодаря высоким механическим свойствам, упругости и хорошей коррозионной стойкости, применяют для изготовления пружин, упругих деталей, работающих при температурах до 250 °С в пресной и морской воде.

### **Алюминиевые бронзы**

Алюминиевые бронзы получили наибольшее распространение как более дешевые заменители оловянных; имеют более высокие прочностные свойства, чем латуни и оловянные бронзы.

Структура алюминиевых бронз соответствует диаграмме состояния системы «медь – алюминий». При комнатной температуре в меди может раствориться примерно 9 % алюминия, однако в реальных сплавах из-за ликвации предельная концентрация  $\alpha$ -фазы твердого раствора замещения алюминия в меди снижается до 8 % и даже менее. При большем содержании алюминия в сплавах появляется эвтектид ( $\alpha + \gamma_2$ ), который получается в результате распада высокотемпературной фазы  $\beta$ . В результате этого прочность сплавов повышается, а пластичность начинает падать.



Оптимальные механические свойства имеют сплавы, содержащие 5–8 % алюминия. Узкий интервал кристаллизации определяет лучшую жидкотекучесть, меньшую склонность к ликвации, большую плотность отливок, но значительную усадку при кристаллизации и ряд других недостатков по сравнению с оловянными бронзами. Для улучшения свойств сплавы легируют. Железо повышает прочностные свойства бронз, как и марганец, который одновременно увеличивает и пластичность, раскрывая способность к холодной обработке давлением и позволяя проводить ее для сплавов с содержанием алюминия более 7 %. Никель повышает механические свойства, коррозионную стойкость и жаропрочность бронз, делает возможным проведение упрочняющей термической обработки по режиму закалки с последующим старением. Одни алюминиевые бронзы применяют только как деформируемые (БрА5, БрАЖМц10-3-1,5), другие – только как литейные (БрАЖН11-6-6), третьи – и как деформируемые, и как литейные сплавы (БрА9Мц2Л). Деформируемые полуфабрикаты применяют в состоянии поставки после дорекристаллизационного (для повышения упругих свойств) и рекристаллизационного отжига. Термически упрочняемой является бронза БрАЖН10-4-4 (закалка от 980 °С и старение при 400 °С), эта бронза сохраняет удовлетворительную прочность до температур 400–500 °С.

Наиболее пластичная и наименее прочная – бронза БрА5. Ее применяют для изготовления пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской воде, разменной монеты. Бронзу БрА10 используют для фасонных отливок, прессованных изделий. Бронзы с большим (от 9 %) содержанием алюминия и добавками железа, никеля, марганца (кроме твердого раствора) имеют в структуре включения эвтектоида (до 35 %) и железосодержащей фазы  $FeAl_3$ , потому обладают повышенными прочностью и антифрикционностью. Из них изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, зубчатые колеса, седла клапанов, подшипники и т. д.

### **Бериллиевые бронзы**

Бериллиевые бронзы (например, БрБ2) отличаются уникальным сочетанием свойств: высокими пределами упругости и прочности, сильной тепло- и электропроводностью, коррозионной стойкостью в сочетании с повышенным сопротивлением усталости, ползучести и изнашивания. Ценным свойством является отсутствие искры при ударе. Эти сплавы могут работать в интервале температур от –200 до +250 °С.

Бериллий обладает уменьшающейся растворимостью в меди при понижении температуры (от 2,7 до 0,2 % при комнатной температуре). В структуре бронзы БрБ2 при комнатной температуре в отожженном состоянии присутствует твердый раствор замещения бериллия в меди  $\alpha$  и включения  $\gamma$ -фазы на основе интерметаллида CuBe. Эта бронза эффективно упрочняется термической обработкой. После закалки с температур 750–790 °С (соответствующих однофазной области) в воде структура бериллиевых бронз представлена пересыщенным твердым раствором, что позволяет легко деформировать ее без нагревания. Последующее старение при 320–340 °С в течение 2–5 ч вызывает распад пересыщенного раствора закалки и формирование дисперсных включений  $\gamma'$ -фазы, что приводит к повышению прочности. Еще большее упрочнение достигается в результате применения режима НТМО. Легирование бронз никелем (0,2–0,5 %) и титаном (0,1–0,25 %) позволяет снизить содержание дефицитного дорогого бериллия до 1,7–1,9 % без заметного снижения механических свойств (БрБНТ 1,7, БрБНТ 1,9). Примерные составы и свойства некоторых бронз в термически упрочненном состоянии приведены в табл. 3.1.

Из бериллиевых бронз применяют детали особо ответственного назначения: мембраны, упругие элементы точных приборов, детали, работающие на износ (кулачки, шестерни, червячные колеса), подшипники, функционирующие при повышенных скоростях, давлениях и температурах, инструмент, не дающий искры. Широкому применению бериллиевых бронз препятствуют высокая стоимость и токсичность бериллия.

### **Свинцовые бронзы**

Свинцовые бронзы имеют наилучшие антифрикционные свойства и самую высокую теплопроводность из всех сплавов на основе меди, поэтому их широко применяют для изготовления высоконагруженных подшипников скольжения, работающих при высоких скоростях (в авиационных двигателях, дизелях, мощных турбинах). Наибольшее применение нашли бронзы с содержанием свинца 25–30 %. Медь и свинец в твердом состоянии образуют эвтектику, структура сплава состоит из кристаллов меди и включений свинца, которые располагаются по границам зерен или заполняют междендритные пространства. Прочность и твердость свинцовых бронз невысока (см. табл. 3.1), поэтому их наплавляют на стальные трубы или ленты и уже из них изготавливают подшипники.

## **Рабочее задание**

1. Просмотрите под микроскопом все шлифы, проанализируйте их мезоструктуру, выявите их структурные составляющие сплавов.
2. По структуре определите состояние сплавов.

## **Порядок и методика выполнения работы**

Для проведения работы возьмите микроскоп и набор микрошлифов цветных металлов и сплавов.

1. Просмотрите под микроскопом все шлифы, зарисуйте наблюдаемую мезоструктуру и стрелками укажите на зарисовках структурные составляющие сплавов.

2. По мезоструктуре определите состояние сплавов: литое (модифицированное или немодифицированное), деформированное или отожженное. Ознакомьтесь по справочным данным с термической обработкой, свойствами и применением этих сплавов.

3. Изучите маркировку цветных металлов и сплавов, приведите примеры марок из ГОСТа наиболее распространенных в технике цветных металлов и сплавов.

5 Оформите отчет, в котором схематично изобразите и опишите микроструктуру каждого из изученных сплавов, приведите данные по их химическому составу, режимам упрочняющей термообработки, свойствам и применению.

## **Контрольные вопросы**

1. Приведите принципы классификации цветных металлов.
2. Назовите группы медных сплавов.
3. Дайте определение латуни и бронзы. Приведите примеры их маркировок и расскажите, где они применяются.
4. Поясните, какие легирующие элементы вводят в латуни и с какой целью.
5. Охарактеризуйте микроструктуру латуней и бронз.
6. Определите достоинства и недостатки оловянных бронз.
7. Укажите, какие бронзы заменяют оловянные.
8. Расскажите об упрочняющей термической обработке бериллиевой бронзы.
9. Объясните, какие сплавы меди используются в качестве проводниковых материалов в электроэнергетике.

## Лабораторная работа № 4

# ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЯ И ЕГО НЕКОТОРЫХ СПЛАВОВ

### Цель работы

Изучить основные свойства и области применения алюминия и сплавов на их основе, а также сплавов на основе олова и свинца; освоить методики определения мезоструктуры цветных металлов и сплавов; научиться расшифровывать марки цветных металлов и сплавов.

### Оборудование и материалы

Металлографический микроскопы и микроскринер, микрошлифы образцов.

### Теоретические положения

Цветные сплавы являются более дорогими и дефицитными, чем черные. Однако благодаря их особым физическим, технологическим и эксплуатационным свойствам они нашли достаточно широкое применение. В настоящей работе рассматриваются легкие сплавы на основе алюминия, магния и титана, а также подшипниковые сплавы.

### Алюминий. Его структура, свойства и маркировка

Алюминий – металл серебристо-белого цвета, с гранцентрированной кристаллической решеткой с периодом 0,40412 при комнатной температуре, имеющий температуру плавления 658 °С. Характерными свойствами алюминия являются малый удельный вес  $\gamma' = 2,72 \text{ г/см}^3$  (он почти в 3 раза легче стали, у которой  $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$ ), высокая тепло- и электропроводность, (алюминий уступает только серебру, меди и золоту, имея около 60 % от электропроводности меди); хорошо полируется. Высокая электропроводность алюминия обуславливает широкое применение его для проводников электрического тока.

Алюминий обладает высокой стойкостью против атмосферной коррозии (она примерно в 20 раз больше, чем у стали), что объясняется образованием на его поверхности окисной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , защищающей его от взаимодействия с окружающей средой. В щелочных средах быстро растворяется. Алюминий характеризуется малой прочностью и высокой

пластичностью: предел прочности прокатанного и отожженного алюминия 60 МПа, предел текучести – 20 МПа, относительное удлинение – 40 %. Алюминий отличается высокой технологичностью, хорошо деформируется прокаткой.

Маркируют алюминий буквой А, за которой следует число, соответствующее содержанию алюминия сверх 99 %. Например, в алюминии высокой чистоты А995 содержится 99,995 % А1, в алюминии технической чистоты А5 – 99,5 % (количество примесей возрастает соответственно от 0,001 до 1 %). Наиболее вредной примесью является железо, образующее соединение  $FeAl_3$ , которое выделяется в виде игл и резко снижает пластичность и коррозионную стойкость алюминия. При наличии кремния могут образовываться в зависимости от состава два тройных соединения  $\alpha(Fe-Al-Si)$  и  $\beta(Fe-Al-Si)$ , которые имеют высокую хрупкость и снижают пластичность.

Алюминий применяется для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется легкость, свариваемость, пластичность, коррозионная стойкость (рамы, двери, трубопроводы, фольга, цистерны, посуда). Он используется для производства теплообменников, в электротехнике – для конденсаторов, проводов, кабелей, шин, для производства рефлекторов и т. д.

### **Алюминиевые сплавы**

К преимуществам большинства промышленных алюминиевых сплавов можно отнести низкую плотность (до  $2,85 \text{ г/см}^3$ ), высокую удельную прочность, хорошую коррозионную стойкость, тепло- и электропроводность. В качестве основных легирующих элементов в алюминиевых сплавах применяют медь, магний, кремний, марганец, цинк, реже литий, никель, титан, бериллий, цирконий, железо и др. Большинство легирующих элементов образуют с алюминием ограниченные твердые растворы замещения с переменной растворимостью, а также промежуточные фазы с алюминием и между собой – двойные, тройные и многокомпонентные интерметаллиды.

Алюминиевые сплавы в зависимости от технологии изготовления из них деталей делятся на две группы: деформируемые и литейные. Существует более подробное деление сплавов в соответствии с их свойствами (нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности и коррозионной стойкости, антифрикционные и т. д.).

## Алюминиевые деформируемые сплавы

Деформируемые алюминиевые сплавы в свою очередь подразделяются на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой.

К деформируемым, термически не упрочняемым сплавам, относятся сплавы алюминия с марганцем и магнием. Содержание марганца в этих сплавах не превышает 1,6 %, а содержание магния находится в пределах от 2 до 7 %.

Маркируются сплавы этой группы буквенными обозначениями АМп и АМg, где индекс Мп означает марганец, а Мg – магний. Цифры, следующие за буквами, показывают содержание второго компонента в процентах. Например сплав алюминия с магнием АМg6 содержит 6 % магния.

Структура рассматриваемых сплавов представляет собой твердый раствор марганца (или магния) в алюминии. Поскольку содержание этих элементов в сплавах меньше предела их растворимости в твердом растворе при комнатной температуре, то оно остается неизменным при нагреве и охлаждении сплавов. Поэтому такие сплавы не упрочняются термической обработкой, а упрочняются наклепом при обработке давлением.

Среди сплавов, упрочняемых термической обработкой, наиболее распространенными являются дюралюмины – сплавы системы Al–Cu–Mg, содержащие 4–5 % меди и 0,5–1,5 % магния.

В марках этих сплавов буквой Д обозначено название сплава – дюралюмин, за ней следует цифра или число, показывающие порядковый номер сплава в ГОСТе (например Д1, Д16).

Структура дюралюмина в отожженном состоянии состоит из  $\alpha$ -фазы твердого раствора меди и магния в алюминии и включений химических соединений  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (рис. 4.1).

Максимальную прочность дюралюмины приобретают после термической обработки, заключающейся в закалке и старении. Так, для сплава Д16 предел прочности в отожженном состоянии равен 200 МПа; после закалки он составляет 250 МПа, а после закалки и старения значительно возрастает, достигая 400 МПа.

Естественное старение заключается в выдержке (вылеживании) закаленного материала при комнатной температуре в течение нескольких суток; при искусственном старении сплав нагревают до температуры 100–150 °С, а время выдержки сокращается до 10–20 ч.

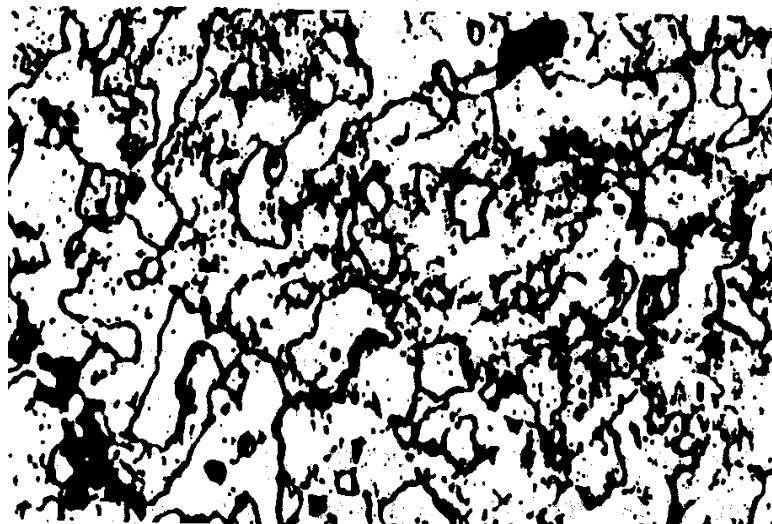


Рис. 4.1. Структура отожженного дуралюмина Д1:  
белые зерна  $\alpha$ -твердого раствора и включения интерметаллидов  $\text{CuAl}_2$   
(темные точечные внутри зерен и твердого раствора)

Широкое применение дуралюмины нашли в авиастроении, где из них изготавливают обшивки и шпангоуты самолетов, а также при изготовлении строительных конструкций, кузовов грузовых автомобилей и т. д.

### Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы должны отвечать ряду технологических требований: обладать хорошей жидкотекучестью, т. е. способностью хорошо заполнять литейную форму; не иметь склонности к ликвации, т. е. иметь однородный химический состав по сечению всего слитка и отдельных кристаллов; обладать малой усадкой; иметь низкую склонность к образованию трещин при кристаллизации.

Эти сплавы применяются для фасонного литья. Наиболее широко распространены сплавы силумины на основе системы  $\text{Al-Si}$  (простые и сложные), для которых характерны малые интервалы кристаллизации и очень хорошие литейные свойства. В качестве литейных применяют также сплавы на основе систем  $\text{Al-Cu}$ ,  $\text{Al-Mg}$  и другие более сложные системы, которые по составу похожи на аналогичные деформируемые, но содержат несколько больше  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}$ , а также тугоплавкие добавки (титан, никель). Однако эти сплавы обладают худшими литейными свойствами, поэтому далее будут рассмотрены только силумины (см. табл. 4.1). Маркировка литейных сплавов производится в соответствии с их химическим составом.

Таблица 4.1

**Химический состав и механические свойства некоторых  
алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, %	Состояние	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
АМг3 [9]	3,2–3,8 Mg, 0,3–0,6 Mn, 0,5–0,8 Si	Отожженное			
Д16 [9]	3,8–4,8 Cu, 1,2–1,8 Mg, 0,3–0,9 Mn	Закаленное и состаренное			
В95 [9]	1,4–2,0 Cu, 1,8–2,8 Mg, 0,2–0,6 Mn, 5,0–7,0 Zn	Закаленное и состаренное			
АК12 [10]	10,0–13,0 Si	Литье в песчаную форму, модифицирование			
АК9ч [11]	8–10,5 Si, 0,15–0,3 Mg, 0,2–0,5 Mn	Закаленный и состаренный			
АК21М2,5Н2,5 [12]	21 Si, 2,6 Cu 2,5 Ni, 0,35 Mg, 0,3 Mn, 0,2 Ti, 0,3 Cr	Литье в кокиль, отжиг		—	—

Наиболее распространенными литейными алюминиевыми сплавами являются силумины – сплавы алюминия с кремнием, с его (Si) содержанием 8–13 %. Применяемые в промышленности силумины относятся к эвтектическим сплавам со структурой ( $\alpha + Si$ ) или доэвтектическим, структура которых состоит из первичных кристаллов  $\alpha$  и эвтектики ( $\alpha + Si$ ).

Силумины подразделяют на двойные (простые) и специальные, в которых помимо кремния содержатся в небольшом количестве и другие легирующие элементы (медь, магний, марганец, никель). Структура простых силуминов определяется диаграммой состояния Al–Si. Кремний имеет переменную растворимость в алюминии (от 1,6 до 0,1 % при комнатной температуре), при содержании кремния 14 % формируется эвтектика, состоящая из  $\alpha$ -фазы – твердого раствора кремния в алюминии и игольчатых кристаллов кремния –  $\beta$ -фазы. Она имеет грубое строение, что дает низкие значения прочности и пластичности сплавов (при содержании кремния 12 % предел прочности примерно 80 МПа, относительное удлинение 2 %). Улучшить свойства термической обработкой не удастся, поскольку простые силумины относят к числу термически не упрочняемых сплавов.



Для повышения свойств применяется модифицирование силуминов добавками натрия, лития, стронция. Часто вводят натрий в виде смеси солей  $2/3 \text{ NaF} + 1/3 \text{ NaCl}$  в количестве примерно 2 %, чтобы в расплаве оказалось необходимых 0,01 % Na (иногда его количество увеличивают до 0,08 %). Это приводит к резкому измельчению кристаллов эвтектического кремния, эвтектика становится мелкой, следствием чего является увеличение прочности и одновременно пластичности более чем в два раза. При этом понижается температура кристаллизации эвтектики более чем на 10 °С, и эвтектическая точка сдвигается в область меньших концентраций (11,6 % кремния). Поэтому эвтектический до модифицирования силумин приобретает после этого процесса структуру доэвтектического сплава со светлыми кристаллами первичного твердого раствора на темном фоне дисперсной эвтектики. Применяют модифицирование для сплавов с содержанием кремния более 6 %.

Маркируют силумины в соответствии со средним химическим составом (см. табл. 4.1). Из дополнительных легирующих элементов в силуминах наибольшее значение имеют магний и медь, введение которых делает сплавы термически упрочняемыми. Магний образует фазу  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , а при введении одновременно меди и магния могут существовать упрочняющие фазы  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$  и др.

Эвтектический силумин АК12, не упрочняемый термообработкой, не образует усадочной пористости, его рекомендуют применять для герметичных деталей приборов и агрегатов невысокой нагруженности. Однако образование концентрированных усадочных раковин вызывает трудности при отливке крупных и сложных по конфигурации деталей.

Примером доэвтектического силумина является более прочный термоупрочняемый сплав АК9ч. Для него применяют закалку от 530 °С с выдержкой 2–6 ч и охлаждением в горячей воде и старение при 175 °С в течение 15 ч (этот режим термообработки характерен для большинства специальных силуминов). Используют его для наиболее ответственных нагруженных крупногабаритных деталей, например, картеров двигателей внутреннего сгорания.

Высоколегированный заэвтектический силумин АК21М2,5Н2,5 относят к группе поршневых сплавов (для изготовления поршней цилиндров двигателей внутреннего сгорания). В структуре этих сплавов присутствуют кристаллы первичного кремния на фоне эвтектики. Эти сплавы, предназначенные для работы при повышенных температурах 250–270 °С, отличаются высокой жаропрочностью, износостойкостью и низким коэффициентом термического расширения.

Механические свойства силуминов можно повысить путем измельчения кристаллов кремния, входящих в состав эвтектики. Это может быть достигнуто модифицированием, т. е. введением в расплав малых добавок (сотые доли процента) натрия или лития. Измельчение структуры эвтектики приводит к улучшению механических свойств. Так, предел прочности немодифицированного силумина составляет 140 МПа при относительном удлинении 3 %, а у модифицированного  $\sigma_B = 180$  МПа, а  $\delta = 10$  %.

Структура немодифицированного силумина показана на рис. 4.2, а модифицированного – на рис. 4.3.



Рис. 4.2. Структура немодифицированного силумина АЛ2: грубая эвтектика ( $\alpha + Si$ ) с крупными игольчатыми включениями кремния



Рис. 4.3. Структура модифицированного силумина АЛ2: зерна  $\alpha$ -твердого раствора (белые) и дисперсная эвтектика ( $\alpha + Si$ ) между ними

Маркируют силумины буквенным обозначением АЛ: А означает, что сплав алюминиевый, Л – литейный; далее следует цифра или число, показывающие порядковый номер сплава в ГОСТе (АЛ2, АЛ9, АЛ32 и т. д.). Силумины широко применяются для изготовления литых деталей сложной формы: кронштейнов, блоков цилиндров двигателей, корпусов компрессоров и др.

## Подшипниковые антифрикционные сплавы

Подшипниковыми сплавами называют такие, из которых изготавливают вкладыши подшипников скольжения. Для этой цели применяют чугуны, бронзы и легкоплавкие сплавы на основе свинца, олова и алюминия, так называемые баббиты.

К подшипниковым материалам предъявляют следующие требования: небольшой коэффициент трения, способность работать при достаточно высоких нагрузках и высокая износостойкость.

К легкоплавким подшипниковым сплавам относятся сплавы системы Pb–Sb, Sn–Sb, Pb–Sn–Sb. Лучшим антифрикционным сплавом является баббит марки Б83, содержащий 83 % олова, 11 % сурьмы, 6 % меди. Структура этого сплава состоит из мягкой основы  $\alpha$ -твердого раствора сурьмы и меди в олове и твердых включений химических соединений  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  и  $\text{SnSb}$ . В процессе работы твердые включения служат опорой для вращающегося вала, а мягкая основа, срабатываясь при трении, способствует образованию зазора, по которому поступает смазка. Это обеспечивает низкий коэффициент трения в подшипнике.

Мезоструктура баббита Б83 приведена на рис. 4.4. Темная основа представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор сурьмы и меди в олове. Светлые кристаллы квадратной формы являются соединением  $\text{SnSb}$ , а кристаллы игольчатой формы – соединением  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Баббит Б83 применяется в энергомашиностроении для заливки вкладышей и упорных колодок подшипников паровых и газовых турбин, компрессоров, вкладышей.

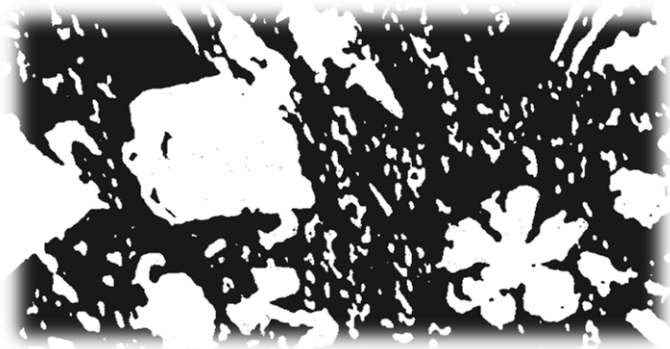


Рис. 4.4. Мезоструктура баббита Б83:  
основа – твердый раствор  $\alpha$  и кристаллы  $\text{SnSb}$  и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$

### Рабочее задание

1. Просмотрите под микроскопом все шлифы, проанализируйте их мезоструктуру, выявите их структурные составляющие сплавов.
2. По структуре определите состояние сплавов.

## **Порядок и методика выполнения работы**

1. Просмотрите под микроскопом все шлифы, зарисуйте наблюдаемую мезоструктуру и стрелками укажите на зарисовках структурные составляющие сплавов.

2. По мезоструктуре определите состояние сплавов: литое (модифицированное или немодифицированное), деформированное или отожженное. Ознакомьтесь по справочным данным с термической обработкой, свойствами и применением этих сплавов.

3. Изучите маркировку цветных металлов и сплавов, приведите примеры марок из ГОСТа наиболее распространенных в технике цветных металлов и сплавов.

4. Оформите отчет, в котором схематично изобразите и опишите микроструктуру каждого из изученных сплавов, приведите данные по их химическому составу, режимам упрочняющей термообработки, свойствам и применению.

## **Контрольные вопросы**

1. Приведите принципы классификации цветных металлов.

2. Перечислите сплавы алюминия.

3. Укажите, какие из применяемых алюминиевых сплавов являются литейными, а какие – деформированными.

5. Поясните, какие сплавы алюминия используются в качестве проводниковых материалов в электроэнергетике.

6. Расскажите, из чего состоит упрочняющая термообработка алюминиевых сплавов.

7. Определите, какие из литейных алюминиевых сплавов обладают лучшими литейными свойствами.

8. Объясните, с какой целью и чем модифицируют силумины.

9. Укажите, какие металлы используются для подшипников скольжения.

10. Дайте определение баббитам.

11. Перечислите свойства баббитов.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин, Р. О. Структура металлических и неметаллических материалов : учебное пособие / Р. О. Сироткин, О. С. Сироткин. – Казань : КГЭУ, 2016. – 94 с.
2. Практикум по полимерному материаловедению : практикум / Под редакцией П. Г. Бабаевского. – Москва : Химия, 1980. – 256 с.
3. Энциклопедия полимеров : в 3 т. т.3. – Москва : Советская энциклопедия, 1972. – 1032 с.
4. Ярославский, Н. Е. Полимерные материалы в энергетике / Н. Е. Ярославский. – Москва : Энергия, 1981. – 215 с.
5. Методическое указание к лабораторной работе по курсу «Материаловедение». – URL: <https://poisk-ru.ru/s27211t2.html> (дата обращения: 21.02.2022). – Текст : электронный.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Леонтьева. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с.
7. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учебное пособие / Под редакцией В. С. Чередниченко. – 3-е изд., стер. – Москва : Омега-Л, 2007. – 752 с.
8. Материаловедение. Технология металлов : учебник для высшей школы / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин [и др.] ; под общей редакцией Г. П. Фетисова. – Москва : Высшая школа, 2008. – 876 с.
9. Механические свойства алюминиевых сплавов. – URL: <https://ollimpia.ru/amg-rasshifrovka-marki-alyuminiya> (дата обращения: 21.02.2022). – Текст : электронный.
10. Механические свойства алюминиевого сплава АК12. – URL: <https://cu-prum.ru/alyuminij1/splav-ak12-al2.html> (дата обращения: 21.02.2022). – Текст: электронный.
11. Механические свойства алюминиевого сплава АК9ч. – URL: <https://stankotec.ru/raznoe/splav-ak9ch-splav-alyuminievuj-ak9ch-al4-litejnyj.html> (дата обращения: 21.02.2022). – Текст: электронный.
12. Механические свойства алюминиевого сплава АК21М2,5Н2,5. – URL: <https://markmet.ru/encyclopedia/ak21m25n25> (дата обращения: 21.02.2022). – Текст : электронный.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Общие указания по выполнению лабораторных работ .....	4
Техника безопасности .....	5
Общая характеристика уровней структурной организации материалов .....	6
Лабораторная работа № 1. Определение структуры полимерных теплоизоляционных материалов .....	10
Лабораторная работа № 2. Изготовление стальных микрошлифов .....	17
Лабораторная работа № 3. Изучение микроструктуры меди и ее некоторых сплавов .....	25
Лабораторная работа № 4. Изучение микроструктуры алюминия и его некоторых сплавов .....	36
Список рекомендуемой литературы .....	45

*Учебное издание*

**Павлова** Алиса Максимовна

**МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Практикум

Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ

Редактор *М. С. Беркутова*

Компьютерная верстка *Т. И. Лунченковой*

Подписано в печать 03.11.2022.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,02.

Заказ 436/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51