

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.П. Жереб
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния модификаторов на свойства
электротехнической меди

тема
22.04.02 «Металлургия»
код и наименование направления

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»
код и наименование магистерской программы

Руководитель _____
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

М.А. Сагалаков
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Продолжение титульного листа МД по теме: Исследование влияния модификаторов на свойства электротехнической меди

Консультанты по
разделам:

Литературный обзор

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Методическая часть

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Экспериментальная часть

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

институт

Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись инициалы, фамилия

«_____» _____ 2020 г.

Исследование влияния модификаторов на свойства

электротехнической меди

наименование ВКР (МД)

22.04.02 «Металлургия»

наименование темы, код и наименование специальности (специализации), направления,

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

магистерской программы

Научный руководитель/
руководитель _____

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Выпускник _____

подпись, дата

М.А. Сагалаков

инициалы, фамилия

Рецензент _____

подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

С.Б. Наумов

инициалы, фамилия

Консультанты:

Литературный обзор

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Методическая часть

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Экспериментальная часть

наименование раздела

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____

подпись, дата

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

институт

Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

_____ инициалы, фамилия
подпись

« _____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Сагалакову Максиму Александровичу

фамилия, имя, отчество

Группа: ЦМ18-27М Направление (специальность): 22.04.02 «Металлургия»

номер

код

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: Исследование влияния модификаторов на свойства электротехнической меди.

Утверждена приказом по университету № 2354/с от 17.02.2020

Руководитель ВКР: А.А. Ковалева, доцент, канд. техн. наук, СФУ

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Обзор литературы, образцы электротехнической меди марки М1 и М00.

Перечень разделов ВКР: Литературный обзор, методическая часть, экспериментальная часть.

Перечень графического материала: Микроструктуры (в количестве 48 шт.), таблицы (в количестве 28 шт.), электронограммы (в количестве 5 шт.), спектрограммы (в количестве 2 шт.).

Руководитель ВКР

подпись

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись, инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 2020 г.

Реферат

В выпускной квалификационной работе (магистерской диссертации) приведен обзор литературы по данной тематике, приведена методическая часть, описаны исследования, проведенные на образцах меди.

В приведенном обзоре литературы описаны структурные изменения, полученные авторами, при различных условиях литья медных сплавов из чистой меди, а также известные свойства меди и применение меди и медных сплавов.

В эксперименте подтверждается положительное влияние предварительной подготовки медного расплава к модифицированию. В работе показано изменение кристаллической структуры меди при введении в нее миш-металла и последующей кристаллизации металла в кокиле.

В работе описаны изменения величины микротвердости в зависимости от условий кристаллизации.

Работа состоит из 73 стр., 36 рисунков, 28 таблиц, 9 графиков, 17 источников литературы.

Ключевые слова: медь, модификатор, легирование, структуры, микротвердость.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Литературный обзор	10
1.1 Медь и ее свойства. Физические свойства	10
1.2 Механические свойства	16
1.3 Технологические свойства	17
1.4 Особенности литых заготовок из медных сплавов	22
1.5 Влияние примесей на структуру и свойства меди	24
1.6 Техническая медь	26
1.7 Модифицирование медных сплавов	29
1.8 Модифицирование медных сплавов	30
2 Методическая часть	34
2.1 Исходный материал	34
2.2 Методика приготовления микрошлифов	34
2.3 Полирование образцов	36
2.4 Травление образцов	36
2.5 Металлографический анализ	37
2.6 Измерение микротвердости	37
2.7 Микрорентгеноспектральный анализ	40
2.8 Методы определения величины зерна	43
3 Экспериментальная часть	49
3.1 Структура образцов меди	49
3.2 Анализ механических и физических свойств	59
3.3 Микротвердость образцов меди	62
3.4 Микрорентгеноспектральный анализ образцов меди	64
Заключение	71
Список литературы	72

Введение

Медь в основном используется в электротехнической промышленности, связи, строительстве и транспорте. Мировое потребление меди возросло в 2003г. на 6,4%, до 14,9 млн. т по сравнению с 14,1 млн. т в 1999 г. Максимальный прирост потребления металла в абсолютных показателях достигнут в Европе и азиатских странах. Наибольшими темпами потребление меди увеличилось в Европе - на 15,9%, далее следуют азиатские страны – 14,4%.

Россия является одним из основных производителей меди, при этом более 70% рафинированной меди поставляется отечественными предприятиями на экспорт. По этой причине медь, наряду с основными энергоносителями (нефтью и газом), алюминием, никелем и черными металлами, является одним из основных экспортных товаров Российской Федерации, занимая около 4 – 7 % в объеме поступающей экспортной выручки.

Основные месторождения медных руд в России расположены в Красноярском крае и на Урале. Кроме этого, значительные объемы руды российские предприятия получают из Казахстана и Монголии. Однако в отличие от северных месторождений залежи медных руд в этих регионах к настоящему времени существенно выработаны, что в совокупности с развитием этими государствами собственной производственной базы снижает привлекательность казахстанского и монгольского сырья для отечественных переработчиков.

Основные производства меди Российской Федерации, так же как и месторождения, сконцентрированы на Урале и в Заполярье. Более 70% общего производства приходится на предприятия вертикально-интегрированной ГК “Норильский Никель”. В состав этого предприятия входят “Норильская горнометаллургическая компания”, “Североникель” и “Печенганикель”. Кроме этого, в структуру компании входят ряд добывающих и перерабатывающих предприятий. Оставшуюся часть выпуска обеспечивают предприятия Уральского региона, такие, как АО “Уралэлектромедь” или АО “Кыштымский медеэлектролитный завод”.

Семь металлов принято считать доисторическими. Золото, серебро, медь, железо, олово, свинец и ртуть были известны людям с древнейших времен. Роль меди в становлении человеческой культуры особенна. Каменный век сменился медным, медный – бронзовым. Не везде этот процесс происходил одновременно. Коренное население Америки переходило от каменного века к медному в 16 веке, т.е. всего 400 лет назад. В Древнем Египте медный век наступил в 4 тысячелетии до нашей эры. Доказано, что знаменитая пирамида Хеопса выложена из камней, вытесанных инструментом из меди.

Подобно золоту и серебру медь способна образовывать самородки. Видимо, из них около 10000 лет назад были изготовлены первые металлические орудия труда. Распространению меди способствовали такие ее свойства, как способность к свободной ковке и относительная простота

выплавки из богатых руд.

Становление меди как инструментального материала в истории развития человечества описал древний поэт и философ Лукреций Кар :

*Прежде служили оружием руки могучие, когти,
Зубы, камень, обломки ветвей от деревьев и
пламя, После того была найдена медь...*

1 Литературный обзор

1.1 Медь и ее свойства. Физические свойства

Медь — минерал, относящиеся к классу самородных элементов. В этом минерале обнаруживаются Fe, Ag, Au, As и другие элементы в виде примеси или образующие с Cu твёрдые растворы. Простое вещество медь — это пластичный переходный металл золотисто-розового цвета (розового цвета при отсутствии оксидной плёнки). Является одним из первых металлов, широко освоенных человечеством из-за сравнительной доступности для получения из руды. Медь является самым известным металлом человеку с очень древних времен.

Медь является первым элементом группы IV периодической системе, атомный номер 29, атомная масса 63,546.

Этот элемент является изоморфным и кристаллизуется с получением гранцентрированной кубической решетки типа A1. Период решетки меди при 18°С равен 0,36074 нм (с повышением температуры период возрастает). Периоды решетки меди при различных температурах приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 — Периоды решетки меди при различных температурах

T, К	0	291	573	773	944	1044	1144
Период решетки	0,35957	0,36074	0,36260	0,36308	0,36526	36603	0,36683

Элементы, которые находятся в твердом растворе, изменяют период решетки меди. Чем больше различия в размерах атомов меди и растворенного элемента, тем выше эти изменения.

Большинство физических свойств зависит от чистоты и состояния меди. Основные физические свойства меди высокой чистоты приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2 — Физические свойства меди

Свойства	Состояние	
	твердое	жидкое
Температура плавления, °С	-	1084
Температура кипения, °С	-	2560
Плотность при 20 °С, кг/м ³	8890	-
Плотность при 1083 °С, кг/м ³	8320	7930
Теплота плавления, кДж/кг	-	208
Теплота испарения, кДж/кг	-	5440

Продолжение таблицы 2

Свойства	Состояние	
	твердое	жидкое
Удельная теплоемкость при постоянном давлении при 20 °С, кДж/(кг К)	385	-
Удельная теплоемкость при постоянном давлении при 1083 °С, кДж/(кг К)	-	545
Температурный коэффициент линейного расширения при 20...100 °С, К ⁻¹	16,8 10 ⁶	-
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, мкОм м	0,01724	-
Теплопроводность при 20 °С, Вт/(м К)	390	-
Удельная электрическая проводимость при 20 °С, МСм/м	58*	-
Температурный коэффициент электрического сопротивления при 0...100 °С, К ⁻¹	4,33 10 ³	-
Постоянная Холла R, м ³ /Кл	-0,52 10 ¹⁰	-
Магнитная восприимчивость	-0,086 10 ⁹	-
Модуль нормальной упругости (Модуль Юнга), ГПа	111...125	-
Модуль упругости при сдвиге (Модуль сдвига), ГПа	42...46	-
Коэффициент Пуассона	0,35	-

* Номинальное значение удельного электрического сопротивления при температуре 20 °С принято в качестве международного стандартного значения (International Annealed Copper Standard – IACS). Оно соответствует удельной электрической проводимости 58 МСм/м, которое принимают за 100 % по IACS.

Характеристики упругости. Упругие свойства вязкого материала характеризуется модулем Юнга, модулем сдвига и объемного сжатия, также и коэффициентом Пуассона. Все эти характеристики упругих свойств связаны между собой.

Плотность. По международному стандарту IACS [1] принята плотность меди, равная 8890 кг/м^3 , при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Плотность разных марок меди, при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, имеет небольшие различия. Плотность марок меди приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Плотность марок меди при $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Марка	Плотность, кг/м^3
Медь бескислородная М00б	8963 ± 3
Медь бескислородная М0б	8950
Медь, раскисленная фосфором М2р (0,04 % Р)	8930

Литая медь имеет плотность, равная 8920 кг/м^3 . Плотность отожженной меди, при холодной деформации, уменьшается, так как увеличивается концентрация вакансий, дислокаций и других дефектов тонкой структуры. Известно, что возврат и рекристаллизация при нагреве наклепанного металла повышают плотность меди до исходного значения [1].

При нагреве решетка меди становится шире, из этого следует, что плотность уменьшается. Плотность меди при различных температурах (на примере марки М1) приведены в таблице 4[1].

Таблица 4 - Плотность меди марки М1 при различных температурах

T, $^\circ\text{C}$	20	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Плотность, кг/м^3	8890	8680	8610	8550	8470	8400	7960	7860	7770	7700

При увеличении температуры меди марки М1, плотность уменьшается.

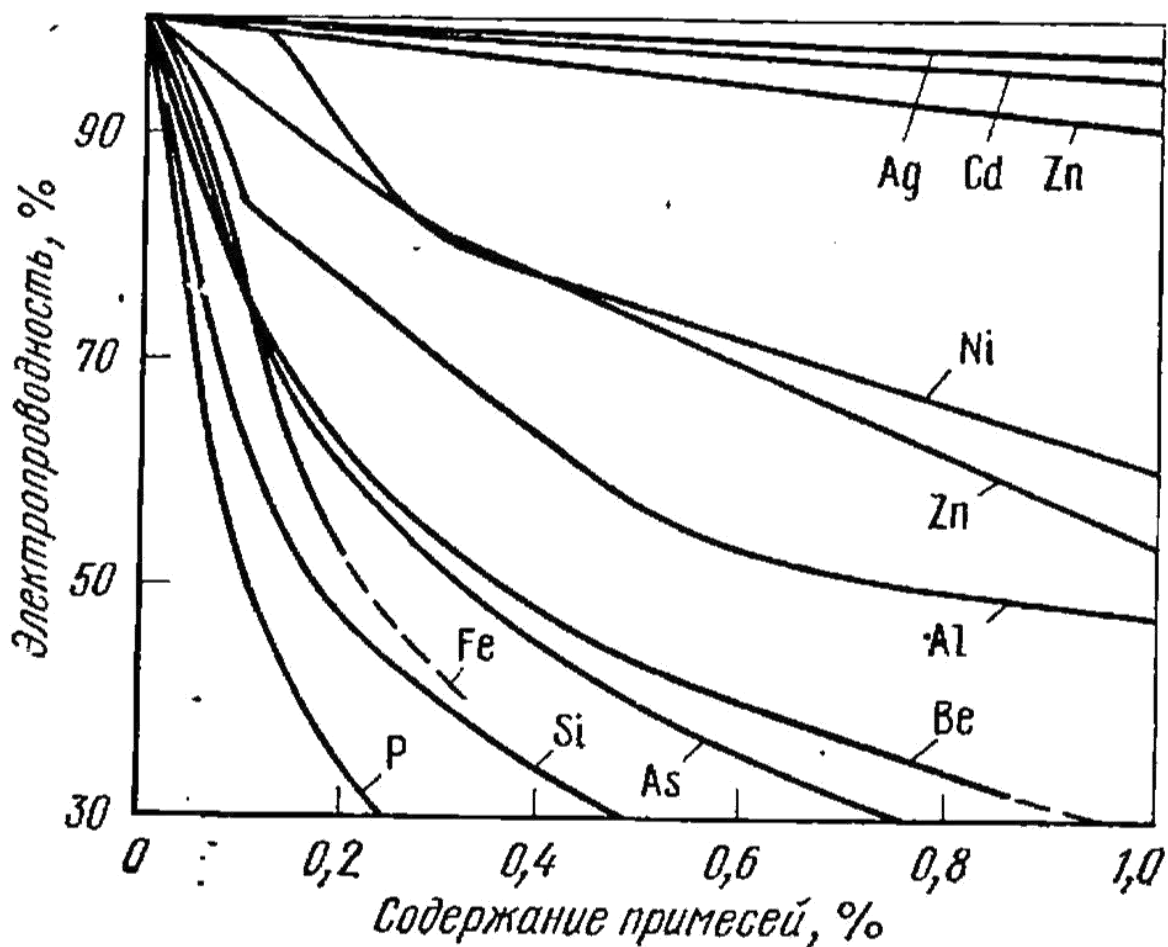


Рисунок 1 — Влияние легирующих элементов на электропроводность меди

Электрические и магнитные свойства. Широкое применение меди в технике можно объяснить тем, что материал электро- и теплопроводный. Эти свойства считаются самыми основными для меди. Электросопротивление меди в твердом состоянии зависит от чистоты металла, т.е. от концентрации имеющихся примесей в материале. Известно, что примеси и легирующие элементы уменьшают электропроводность меди (рисунок 1), но повышают удельное электросопротивление (рисунок 2).

По данным приведенным на рисунке 1 можно сказать что, незначительно снижают электропроводность меди малые добавки только некоторых элементов, например серебра, кадмия, магния, хрома, циркония и др. Эти же добавки, образуя с медью твердые растворы, повышают ее прочность и твердость. Серебро, кадмий и магний дают с медью твердые растворы со сравнительно высокой предельной концентрацией (при температуре эвтектики предельная растворимость серебра в меди — 8,8%, кадмия — 2,7%, магния — 2,8%) [1].

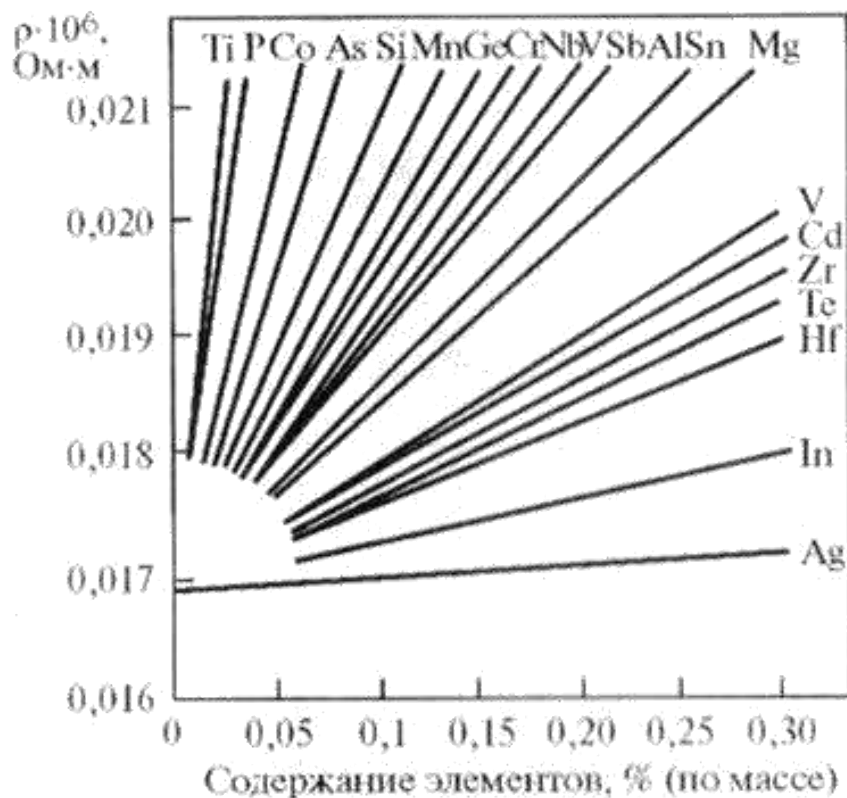


Рисунок 2 — Влияние примесей и малых концентраций легирующих элементов на удельное сопротивление меди высокой чистоты

Из данных рисунка 2 дают видно, что содержание примесей и легирующих элементов увеличивают удельное сопротивление меди. Серебро уменьшает удельное сопротивление меди.

Медь немагнитная, но при введении примеси железа и провести термообработку (отжиг, отжиг и холодная прокатка), то такой сплав обусловлен магнитными свойствами.

Тепловые свойства. Медь, при повышении температуры, увеличивается удельная теплоемкость. Также может быть определена для твердого состояния по эмпирической зависимости:

$$= 0,3466 + 8,96 \cdot 10^{-5} \cdot t, \text{ Дж}/(\text{°} \cdot \text{г})$$

Когда медь в жидком состоянии, находящаяся в интервале температур перегрева и при литье слитков, удельная теплоемкость практически не зависит от температуры и принимается равной 545 кДж/(кг К).

Температурный коэффициент линейного расширения, при повышении температуры, несколько увеличивается и его середине значения в разных интервалах температур приведены в таблице 5 [1].

Таблица 5 — Температурный коэффициент линейного расширения при разных интервалах температур

Интервал температур	Температурный коэффициент линейного расширения, K^{-1}
20...100	$16,8 \cdot 10^6$
20...300	$17,7 \cdot 10^6$
20...500	$18,6 \cdot 10^6$

Исходя из данных таблицы 5 можно сказать, что при увеличении температуры, коэффициент линейного расширения повышается.

Теплопроводность меди. Примеси и вводимые легирующие элементы в расплав меди, существенно снижают теплопроводность. Теплопроводность меди при температуре 20 °С приведена в таблице 6 [1].

Таблица 6 — Теплопроводность меди при температуре 20 °С

Марка	Наименование	Теплопроводность, Вт/(м К)
M00б	Бескислородная	395
M0б	Бескислородная	390
M1	Катодная переплавленная	385
M2р	Раскисленная фосфором	335

Теплопроводность жидкой меди, так же как и удельное электросопротивление, с повышением температуры выше точки плавления заметно увеличивается. (таблица 7) [1].

Таблица 7 — Теплопроводность и удельное электросопротивление жидкой меди при различных температурах

T, °С	1084	1100	1200	1400	1600
Теплопроводность, Вт/(К м)	165,6	166,1	170,1	176,3	180,4
Удельное электросопротивление, мкОм м	0,200	0,202	0,212	0,233	0,253

Увеличение температуры, теплопроводность и электросопротивление увеличиваются.

1.2 Механические свойства

Механические свойства меди меняются в зависимости от состояния (литое, деформированное, отожженное), от способа получения полуфабрикатов, температуры испытания и других факторов.

Различные марки меди при статических испытаниях на растяжение при температуре 20 °С практически не различимы друг от друга. Механические свойства кислородосодержащей меди марки М1 при статических испытаниях на растяжение при 20 °С приведены в таблице 8, а в таблице 9 — свойства бескислородной меди марки М1б.

Таблица 8 — Механические свойства кислородосодержащей меди марки М1 [1]

Свойства	Состояние	
	Деформированное	Отожженное
Временное сопротивление, МПа	340... 450	220...245
Предел текучести, МПа	280... 420	60...75
Предел упругости, МПа	180... 280	≈ 25
Относительное удлинение, %	4...10	45...55
Относительное сужение, %	40... 60	65...80
НВ	90...110	35...55
HRВ	40... 60	35...55

Таблица 9 — Механические свойства бескислородной меди марки М1б [1]

Свойства	Состояние	
	Деформированное	Отожженное
Временное сопротивление, МПа	340... 450	220...250
Предел текучести, МПа	280... 400	60...75
Относительное удлинение, %	4... 6	40...50
Относительное сужение, %	35... 45	70...80
НВ	90...110	45
Предел прочности на срез, МПа	210	150
Предел выносливости, МПа (N=10 ⁸ циклов, K _t [*] =1)	100... 120	70...80
КСУ, Мдж/м ²	1,0	1,70

* Коэффициент концентрации напряжения

Исходя из таблиц 8 и 9 можно сказать, что временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение практически не изменились при содержании кислорода в меди, так и без содержания кислорода.

Медь нашла применение в промышленности. Из технической меди делают полуфабрикаты и поставляют в мягком (отожженном), полунагартованном (обжатие 10...30 %) и твердом (обжатие более 35 %) состоянии. Полуфабрикаты и их механические свойства приведены в таблице 10 [1].

Таблица 10 — Механические свойства полуфабрикатов из сплава меди

Марка меди	Вид полуфабрикатов	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Число скучиваний в одну сторону	Число перегибов	
М1	Катанка (ø 7,2 мм) ^{*1}	229	41,5	67,6	25,8	10	
М06	Катанка (ø 7,2 мм) ^{*2}	220	42,1	91,1	47,4	15	
	Прутки (ø 5...40 мм) ^{*2}	мягкие	200	38	-	-	-
		твердые	270	5	-	-	-
		Прутки прессованные	200	30	-	-	-
	Прутки катаные (ø 14...20 мм) ^{*2}	250	8	-	-	-	
	(ø 35...100 мм) ^{*2}						
М1	Проволока (ø 1,8 мм) ^{*2}	427	1,4	59,4	49,7	12	
М06	Проволока (ø 1,8 мм) ^{*3}	461	1,3	88,9	210	17	

*1 Из вайербарсов горизонтального литья.

*2 Из вайербарсов непрерывного литья.

*3 Из слитков горизонтального литья.

В таблице 10 приведены механические свойства катанки, прутков и проволоки различного способа производства.

Механические свойства проволоки, получаемой волочением, резко отличается от проволоки, получаемой методом вытягивания из расплава — литого микропровода. Литой микропровод в зоне активного охлаждения закаливается от температуры 1300...1200 °С до комнатной с большими скоростями.

1.3 Технологические свойства

Важнейшие технологические свойства меди и качественная оценка технологических процессов изготовления изделий из меди марки М1 различной степени очистки приведены в таблице 11.

Таблица 11 — Технологические свойства меди [1]

Свойства	Медь М1 кислородосодержащая, электролитическая (99,9 % Cu)	Медь М1р, раскисленная фосфором, с высоким содержанием фосфора (99,9 % Cu)	Медь М1б, бескислородная (99,95 % Cu)
Жидкотекучесть, мм	350	350	350
Линейная усадка, %	2,0	2,1	2,1
Температура литья, °С	1150	1150	1150
Температура горячей обработки давлением, °С	700...950 (850...900) ^{*2}	750...875	735...875 (850...900) ^{*2}
Максимальное суммарное обжа- тие при холодной деформации (прокатка, волочение), %	До 90	До 95	До 95
Температура отжига-рекристал- лизации, °С	375...650	375...650	375...650
Обрабатываемость резанием (по отношению к латуни ЛС 63-3), %	20	20	20
Гибкость в холодном состоянии отожженного материала	5 ^{*3}	5	5
Мягкая пайка	4 ^{*3}	4	4
Твердая пайка	3 ^{*3}	5	5
Газовая сварка плавлением	2 ^{*3}	5	5
Газовая сварка в среде инертного газа	5	5	5
Механическое полирование	4	4	4
Электролитическое полирование	5	5	5
Способность к гальваническим покрытиям	5	5	5
Пригодность к плакированию другими металлами и сплавами	3	3	5
Пригодность к горячему цинко- ванию	5	5	5

^{*1} Кислородосодержащая медь огневого рафинирования по технологическим свойствам аналогична кислородосодержащей электролитической; медь, раскисленная фосфором с низким остаточным его содержанием, и медь, раскисленная бором, аналогична бескислородной меди.

^{*2} Температура прессования.

^{*3} Показатели: 5 — отличный; 4 — хороший; 3 — удовлетворительный; 2 — неудовлетворительный.

Медь очень пластична и поэтому хорошо деформируется всеми способами обработки давлением. Бескислородная медь и медь, раскисленная фосфором с малым остатком раскислителя, по деформируемости в горячем и холодном состоянии превосходит кислородосодержащую медь (М1, М2, М3), особенно огневого рафинирования. Меди, в которых находится кислород (заготовки и слитки), нагревают до 875...900 °С, продолжительность нагрева зависит от толщины изделия и составляет 15...20 мин на каждые 25 мм

толщины. 700 °С — это минимальная температура окончания горячей прокатки и ниже этой температуры кислородосодержащую медь обрабатывать не советуют, так как происходит растрескивание заготовок.

Кислород является самой вредной примесью в меди и ее сплавов. Ведь такая примесь понижает технологическую пластичность меди, уменьшает коррозионную стойкость и затрудняет процессы пайки и сварки.

Кислород попадает в металл в процессе плавки, при технологических нагревах перед горячей обработкой давлением, в процессе отжига, при сварке и пайки.

Окислительный процесс состоит из двух стадий:

I – В результате непосредственного взаимодействия меди с окислительной средой на поверхности образуется пленка оксидная, которая защищает металл от контакта с кислородом;

II – Кислород взаимодействует с пленкой оксидов, через которую проникает в глубь металла и тем самым вызывает внутреннее окисление.

Скорость диффузии кислорода, которая характеризуется глубиной проникновения его в металл, зависит от температуры технологического нагрева (рисунок 3) [1].

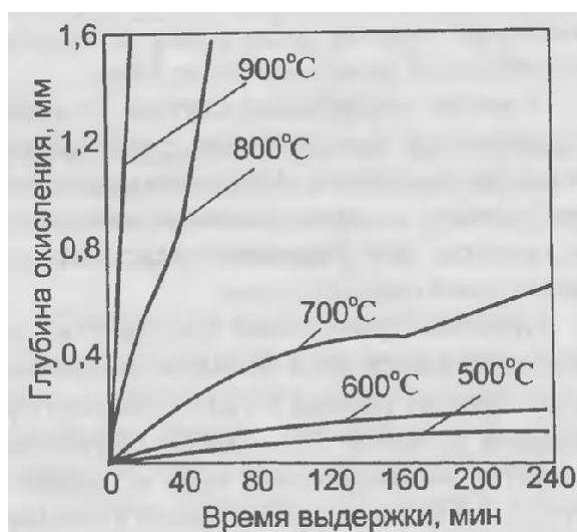


Рисунок 3 — Зависимость глубины окисления бескислородной меди от продолжительности отжига при различной температуре

При относительно низких температурах 500 °С и 600 °С глубина проникновения невысока. А при более высоких температурах 700...800 °С начальное окисление со временем переходит в более быстрое окисление. От температуре 900 °С и выше длительность переходного периода так мала, что окисление с самого начала идет с постоянной и большой скоростью, как показано на рисунке 3.

Термическая обработка. Изделия и полуфабрикаты из меди подвергаются двум видам термической обработки: отжигу для уменьшения остаточных напряжений и рекристаллизационному отжигу. 200...240 °С —

температура начала рекристаллизации бескислородной меди высокой чистоты, а электролитической деформированной меди в зависимости от содержания кислорода — 180...230 °С [1]. Что бы избежать водородной болезни изделия и полуфабрикаты из меди, содержащей кислород, их отжигают в слабоокислительной или нейтральной атмосфере, а из бескислородной меди и меди, раскисленной фосфором, - в нейтральной или слабовосстановительной, чтобы понизить потери металла из-за окисления.

Температура рекристаллизационного отжига и времени выдержки зависят от вида и размеров деформированного полуфабриката и назначения отжига: промежуточный между операциями деформации или окончательный [1].

Режимы окончательного отжига устанавливают, исходя из физических и механических свойств требуемые для изделия.

Оптимальные режимы отжига для различных деформированных полуфабрикатов технической меди приведены в таблице 12 [1].

Таблица 12 — Режимы отжига деформированных полуфабрикатов из технической меди

Полуфабрикат	Толщина, мм	Вид отжига	T, °С
Лист, полоса, лента	5,0	Промежуточный	600...650
	1,0...5,0	Промежуточный	580...650
	0,5...1,0	Промежуточный	520...620
	0,5...1,0	Окончательны	480...550
Заготовка трубная диаметром более 80 мм	5,1	Промежуточный	590...610
	2,0...5,0	Промежуточный	550...580
Трубы	Все размеры	Окончательны	590...610
Прутки		Окончательны	590...610
Профили		Окончательны	600...650
Все виды полуфабрикатов	Все размеры	Окончательны (для уменьшения остаточных напряжений)	100...230

Механические свойства, определяют качество отожженного металла. Размер зерна так же оказывает влияние на механические свойства. Размер зерна довольно однороден в полностью рекристаллизационной структуре. Если неправильно установлен режим рекристаллизационного отжига, то в структуре металла могут присутствовать две группы зерен разного размера. Их называют двойная структура [1].

Когда увеличивается зерно, ухудшается поверхность штампованных изделий. При величине зерна более 40 мкм на поверхности изделия появляется шероховатость. Если применить оптимальные режимы рекристаллизационного отжига, то можно добиться частично или полностью рекристаллизационную структуру без шероховатой поверхности.

Коррозионные свойства меди.

Медь обладает высокой коррозионной стойкостью в любых средах. Этот элемент стоит в электрохимическом ряду ближе к благородным металлам и обычно не вытесняет водород даже из кислых растворов. По природе медь не является химически активным элементом, следовательно скорость ее коррозии обычно невелика, если даже разрушению препятствует пленка нерастворимых продуктов коррозии.

Влияние кислорода на механические свойства меди.

Материалами будущего для изделий электротехнического назначения, у которых высокая электропроводность и повышенная прочность при повышенных температурах, являются медные композиционные сплавы, которые упрочнены дисперсными частицами карбидов [2].

Медь легко окисляется кислородом воздуха в условиях открытой плавки. Чистая катодная медь после переплавки в обычной среде всегда содержит кислород (до 0,05 %). Когда медь кристаллизуется на поверхности образуется закись, которая выделяется в виде эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$) и располагается как сетка по границам зерен и при этом понижает пластичность металла. Но что бы этого не произошло медь раскисляют фосфором, алюминием или кремнием, но и это становится минусом, так как снижается электропроводность.

В статье В.Г. Бабкина, А.И. Трунова и А.И. Черепанова написаны результаты эксперимента: «В процессе переплавки катодной меди в открытой индукционной тигельной печи при синтезе карбидов хрома в медных расплавах происходит увеличение содержание кислорода в металле. Методом термического анализа определили возможные фазовые переходы окисленной катодной меди в условиях вакуума ($133 \cdot 10^{-3}$ Па).»

Этот эксперимент показал, что катодная медь с участием кислородосодержащей газовой фазы подтвердил ее способность растворять кислород с образованием раствора в жидком металле[2].

Структура определяет прочность дисперсно-упрочненного материала. Литая структура, по сравнению с чистой медью, небольшие добавки синтезированных частиц карбидов хрома в расплаве играют роль модификатора, которые измельчают зерно меди. Микроструктура литой меди с добавками упрочняющих фаз представлена на рисунке 4.

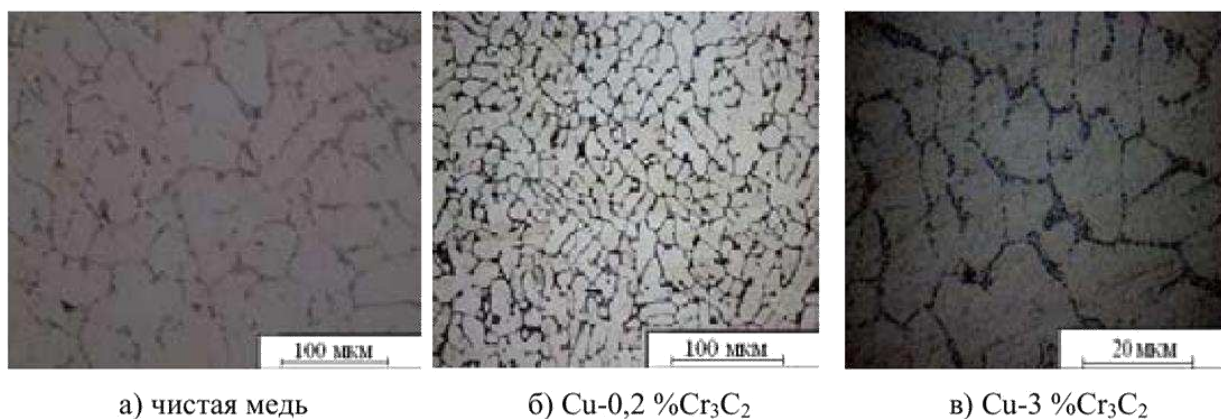


Рисунок 4 — Микроструктура литой меди с добавками упрочняющих фаз

Микроструктура изделия более с мелкой структурой, имеют высокие механические свойства. В эксперименте В.Г. Бабкина, образец с содержанием 3 % упрочняющей фазы (Cr_3C_2), имеется достаточно равномерное распределение частиц карбида хрома по объему матрицы. Размер частицы упрочняющей фазы <1 мкм.

Исходя из данной статьи можно сказать, что литая структура образцов с различным содержанием упрочняющей фазы позволяет установить модифицирующее влияние при их небольшом количестве (до 0,2 мас. %) на измельчение зерна меди.

1.4 Особенности производства литых заготовок из медных сплавов

В промышленности применяется несколько низколегированных медных сплавов, в состав которых входят легкоиспаряющиеся и легкоокисляющиеся элементы: кадмий, хром, цирконий, алюминий, бериллий и др.

В металлургии бронзы из хрома находят применение для изготовления кристаллизаторов установок непрерывной разливки сплавов, барабанов-кристаллизаторов при производстве аморфной ленты из стали и кобальтовых сплавов [7]. В электротехнике двойная бронза из хрома применяется для изготовления коллекторных пластин для высоконагруженных двигателей и контактных колес, проводников электрического тока и т. д. В машиностроении такие бронзы применяются для изготовления шестерен, тормозных колодок самолетов и автомобилей, элементов двигателей внутреннего сгорания. Весьма актуально применение бронз из хрома в качестве материала кокилей при литье легких сплавов, штампов и пресс-форм в производстве пластмасс, керамики и др.

Легирование меди хромом и цирконием можно использовать разными способами: лигатурами медь – хром и медь – цирконий и чистыми металлами.

Выплавку сплава медь – хром рекомендуется вести в вакуумных печах во избежание самонасыщения ее кислородом и уменьшения потерь хрома. Тем не менее при выплавке лигатуры расплав необходимо перегреть до температуры 1600 °С и выдерживать его в печи долгое время до полного растворения хрома. Это приводит к взаимодействию хрома с графитом тигля и графито-шамотной прибыльной надставкой, вымыванию из тигля частиц графита и увлечению их в расплав [7]. В результате в полуфабрикатах из сплавов Cu–Cr визуально замечаются включения темного цвета. Установлено [7], что макровключения изображают собой графит с примесями Fe, S, Si, Al, O.

Так как содержание хрома в лигатуре невелико (не превышает 6...7 %), то доля лигатуры в составе шихты значительна и иногда достигает 22...25 %. Более того, гетерогенность лигатуры по составу затрудняет шихтовку сплава. Получение гомогенных меднохромовых лигатур с более высоким содержанием хрома практически затруднительным ввиду наличия в системе Cu–Cr расслоения в жидком состоянии. В публикации [8] представлена технология получения полуфабриката из сплава Cu–Cr с содержанием хрома 18...22 % и равномерным распределением его по сечению слитка, предусматривающая мгновенный нагрев и расплавление шихты, перегрев расплава до температуры 1873...1973 К, введение Cr и разливку при температуре 1723...1773 К в водоохлаждаемую изложницу. Опыт эксперимента показал, что усвоение хрома происходит практически полностью.

Верности ради следует отметить, что температурно-временной режим плавки с использованием лигатуры медь – хром несколько ниже, чем с использованием чистого хрома. Однако эта разница невелика и не искупает недостатков применения лигатуры.

Достоинства легирования чистыми металлами заключаются в следующем. Во-первых, ввиду неоднократного уменьшения массы вводимой навески чистых металлов их удобнее присаживать в металл. Во-вторых, в результате устранения стадии выплавки и подготовки лигатуры заметно сокращаются сквозные потери легирующих элементов и резко облегчается технологическая схема производства.

Что касается циркония, который легко растворяется в медном расплаве и имеет низкую упругость паров, применение лигатуры может подтверждаться только опасностью окисления. При легировании же чистыми металлами

взамен лигатур заметно увеличивается стабильность состава выплавляемых сплавов.

К изделиям из низколегированных медных сплавов предъявляются высокие запросы по качеству поверхности, твердости, теплопроводности и электропроводности. Эксперименты [9, 10] показали, что скорость растворения хрома обуславливается от содержания примесей в сплаве, которые находятся в хrome или лигатуре медь – хром и в меди (кислород, алюминий, кремний, фосфор), состава покровного флюса и исходного размера кусков хрома.

Кинетику растворения металлического хрома в жидкой меди исследовали путем отбора из расплава проб через определенные промежутки времени. В эксперименте модифицировали размер кусков хрома и температуру расплава при легировании. Температура расплава и размер кусков хрома оказывают существенное влияние на скорость растворения хрома [7]. Отмечено, что при размере кусков металлического хрома 10...20 мм степень его растворения через 30 мин после ввода составляет 70...80 %. Причем, увеличение температуры расплава меди с 1300 до 1350 °С приводит к увеличению скорости растворения хрома и наоборот. Этот эксперимент позволил назначить термовременной режим плавки хромовой бронзы. Результаты эксперимента находятся в соответствии с ранее выполненными экспериментами [7,9,10].

Как отмечалось ранее, сильное влияние на скорость растворения хрома в меди оказывают примеси, содержащиеся в хrome или лигатуре. Определено, что для увеличения степени усвоения хрома медью лигатура должна содержать высокоактивные раскислители (Ti, Al). Возможно, что решающее значение имеет количество раскислителя. Если количество вводимого элемента с высоким сродством к кислороду меньше, чем необходимо для связывания растворенного в жидкой меди кислорода, то оно делает только раскисляющее действие. Если его количество выше необходимого для связывания кислорода, то элемент будет выражать не только раскисляющее действие, но и легирующее и модифицирующее, оказывая влияние на фазовый состав сплава и на дисперсность выделяющихся фаз.

1.5 Влияние примесей на структуру и свойства меди

Как уже говорилось выше, структура и свойства меди во многом зависят от присутствующих в ней примесей.

По виду взаимодействия с медью примеси разделяют на три группы [11]:

I – относятся металлы, растворяющиеся в твердой меди (Al, Fe, Ni, Zn, Ag, Au, Pt, Cd, Sb);

II – представлена элементами, практически нерастворимыми в меди в твердом состоянии и образующими с ней легкоплавкие эвтектики (Bi, Pb);

III – полуметаллические и металлические элементы, образующие в ней химические соединения (P, Se, S, O₂, Te, As и др.).

Элементы, входящие в первую группу не сильно влияют на свойства меди в тех количествах, которые характерны для металла технической чистоты. В больших количествах некоторые из этих элементов хорошо сказываются на свойствах меди и поэтому применяются для легирования.

Нерастворимые примеси в меди, обычно негативно влияют на ее механические и технологические свойства. Большую вредность на медь оказывает висмут. В системе Cu-Bi (рисунок 5) появляется легкоплавкая эвтектика, состав которой почти совпадает с висмутом (99,8 % Bi).

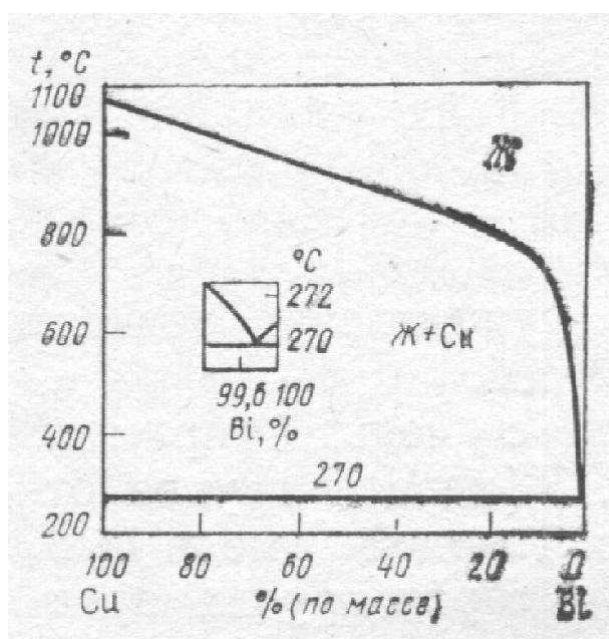


Рисунок 5 — Диаграмма состояния Cu-Bi

Эвтектика кристаллизуется при такой же температуре, что и висмут (270 °C). Растворимость висмута в меди очень мала и не превышает 0,001 %. Следовательно, что эвтектические выделения почти чистого висмута по границам зерен появляются при очень малых его количествах. Висмут — очень хрупкий металл, его прослойки по границам зерен приводят к хладноломкости меди и ее сплавов.

Сурьма, аналог висмута, из-за заметной ее растворимости в меди

оказывает значительно меньше вредного влияния. Однако у сурьмы есть и недостатки. Она уменьшает электропроводность и теплопроводность меди.

Свинец с медью даст монотектическое превращение при 953 °С и эвтектическое при 326 °С (рисунок 6).

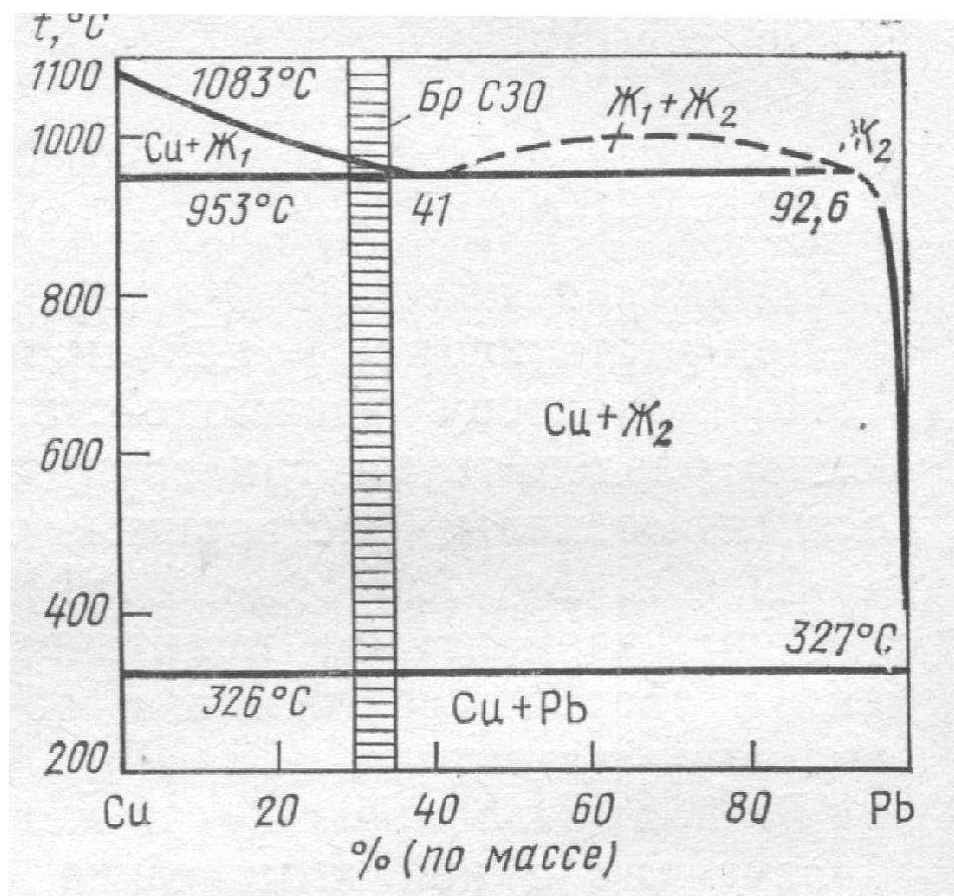


Рисунок 6 — Диаграмма состояния Cu-Pb

Эвтектика в системе Cu-Pb по составу практически совпадает с чистым свинцом (99,96 % Pb). Растворимость свинца в меди очень мала, поэтому эвтектические выделения свинца по границам зерен появляются при очень небольших его содержаниях.

Свинец не приводит к хладноломкости меди, так как он пластичен, но из-за низкой точки плавления эвтектики вызывает горячеломкость. Свинец облегчает обработку медных сплавов резанием, так как делает стружку более ломкой. В медных сплавах допускается большое количества содержания свинца, если хорошая обрабатываемость давлением при высоких температурах не является решающим фактором.

1.6 Техническая медь

Исходя от чистоты медь подразделяется на несколько сортов. Марки технической меди и содержание в ней неблагоприятных примесей приведены в таблице 13.

Таблица 13 — Химический состав технической меди

Марка меди [*]	Содержание компонентов, % (по массе), не более					
	Cu не менее	Bi	Sb	Pb	S	O
M00	99,99	0,0005	0,001	0,001	0,002	-
M0	99,95	0,001	0,002	0,004	0,004	0,02
M0б	99,97	0,001	0,002	0,004	0,004	-
M1	99,90	0,001	0,002	0,005	0,005	0,05
M1p	99,90	0,001	0,002	0,005	0,005	0,01
M2	99,70	0,002	0,005	0,010	0,010	0,07
M2p	99,70	0,002	0,005	0,010	0,010	0,01
M3	99,50	0,003	0,050	0,050	0,010	0,08
M3p	99,50	0,003	0,050	0,030	0,010	0,01

^{*} б — бескислородная медь; p — раскисленная медь.

Очень высокой чистотой отличается медь МВ, переплавленная в вакууме (менее 0,01 % примесей), и медь МЭ, полученная электроннолучевой плавкой бескислородной меди (менее 0,005 % примесей).

Механические свойства меди разных марок при комнатной температуре совпадают, но наблюдается тенденция к повышению прочности и уменьшению пластичности с повышением содержания в ней примесей.

С увеличением температуры прочностные свойства меди падают (рисунок 7).

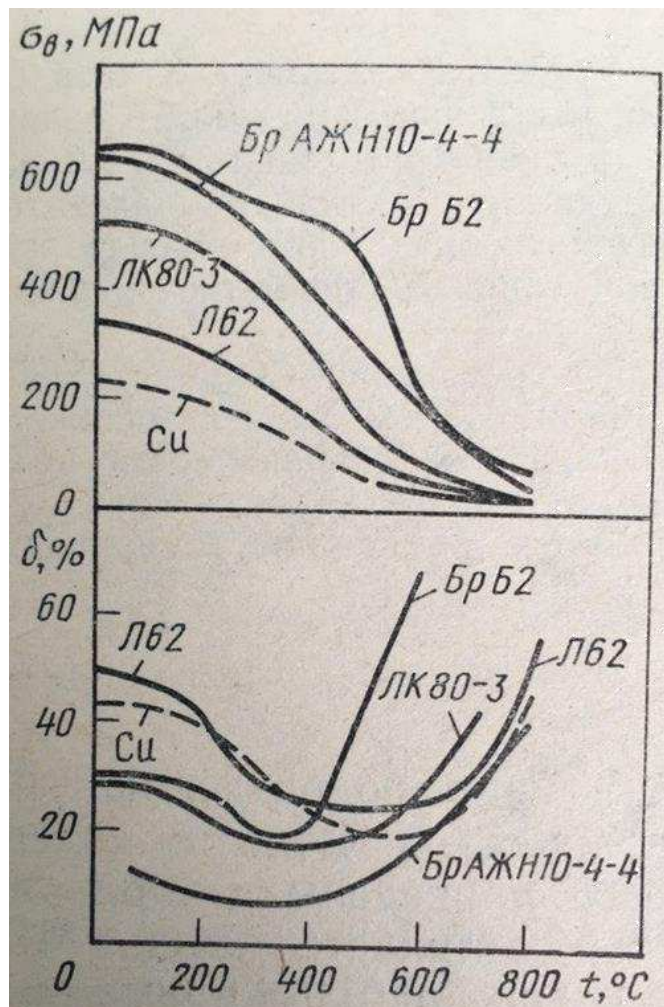


Рисунок 7 — Влияние температуры испытаний на механические свойства меди и ее сплавов

Относительное удлинение и поперечное сужение остаются постоянными до 200 °С, при повышении температуры резко уменьшаются и лишь при нагреве выше 600 °С снова начинают возрастать. Такой провал пластичности объясняется примесями; для меди высокой чистоты (вакуум-плавленной МВ и электроннолучевой плавки МЭ) при испытании в вакууме провала пластичности не наблюдается [11].

После холодной пластической деформации медь наклепывается и при высокой степени деформации ее временное сопротивление разрыву достигает 400- 450 МПа при синхронном падении относительного удлинения до 2-4 % (рисунок 8).

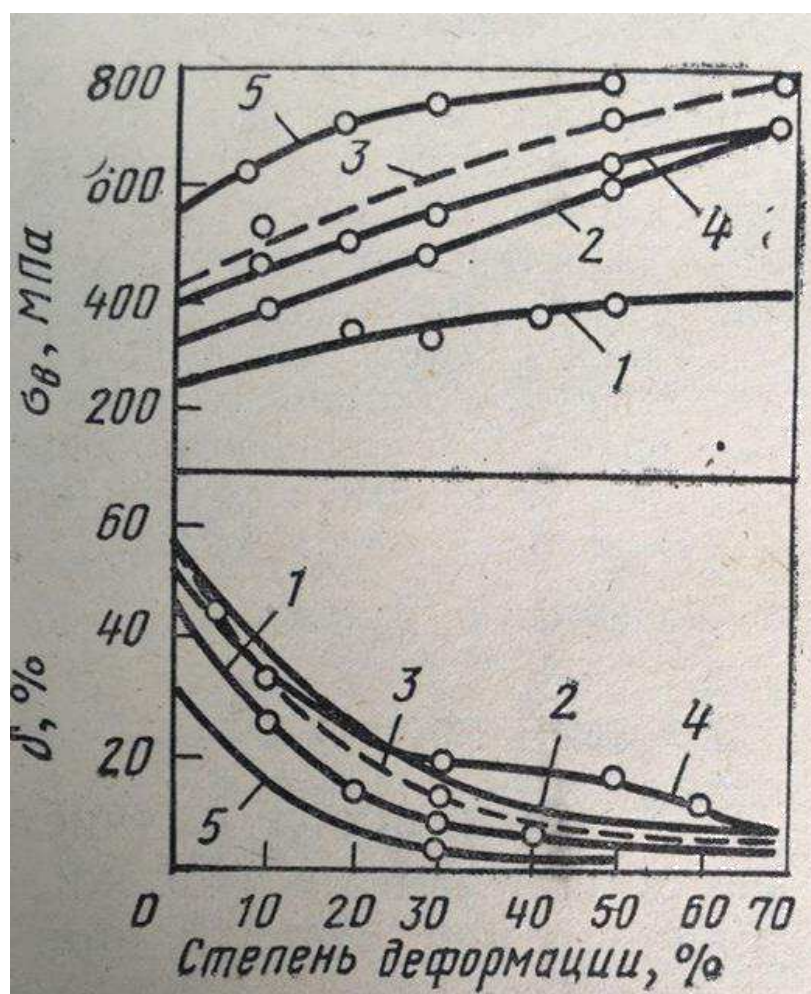


Рисунок 8 — Влияние степени деформации на механические свойства меди и латуней

Холодная пластическая деформация увеличивает электрическое сопротивление меди максимум на 3-5 %.

По приведенному обзору литературы видно, что неисследованными являются структурные изменения при различных условиях литья медных сплавов и чистой меди. Это является нашей данной работой.

1.7 Модифицирование медных сплавов

Улучшение механических свойств достигается измельчением первичного зерна отливок. Для этого перед литьем в расплав вводят тугоплавкие элементы (в количестве 0,02...0,1 %) - Ti, V, Zr, B, W, Mo, образующие с компонентами сплавов тугоплавкие интерметаллиды, являющиеся дополнительными центрами кристаллизации.

Однако следует отметить, что модифицирующее действие присадок тугоплавких элементов во многом определяется наличием в сплаве железа. В

сплавах, не содержащих железа, модифицирующее действие титана и вольфрама не проявляется.

Наиболее эффективное измельчающее действие на величину зерна оловянных бронз (BrO10Ц2, BrOЮ, Br08Ц4 и Br05Ц5С5) оказывает цирконий (0,01...0,3 %) и бор (0,03...0,06 %). Совместные присадки 0,10...0,30 % Ti и 0,03 % В или 0,20 % Fe и 0,03 % В способствуют измельчению зерна в большей степени, чем отдельное их введение.

Модифицирование двойных алюминиевых бронз этими же модификаторами не дает положительных результатов. При наличии в этих бронзах железа и марганца перечисленные добавки оказывают эффективное модифицирующее действие.

Модификаторы вводят в расплав в виде лигатур: алюминий - ванадий (до 50 %), медь - бор (3...5 %), алюминий - титан, медь - титан и другие в количестве 0,1...0,02% от массы расплава при 180... 1200 °С. Модифицирующее действие присадок титана, бора, циркония сохраняются только до температуры 1200 °С.

1.8 Механизм модифицирования меди

Важнейшая тенденция развития техники и технологии обработки цветных металлов – широкий переход от дискретных к непрерывным и совершенным процессам. На данный момент непрерывным и совершенным процессами в мире производят 96 % медной проволочной заготовки и лишь 4 % методом прокатки вайербарсов на сортовом стане. Практически половина всего объема производства рафинированной меди перерабатывается в проволочную заготовку или катанку диаметром примерно 8 мм для последующего производства проволоки, кабеля и других проводников тока.

Класс катанки, при непрерывном производстве методами совершенного литья, существенно зависит от качества непрерывно-литой заготовки. Чтобы повысить качество непрерывно-литой заготовки нужно устранять характерные дефекты, присущие ей. Например, газовая пористость, поверхностные трещины, неслитины. Помимо этого, в структуре непрерывно-литой заготовки наблюдается ярко выраженная транскристаллизация, которая является причиной возникновения трещин, т.к. для крупнозернистой столбчатой структуры характерны слабые межзеренные связи, чем для мелкозернистой равноосной структуры. [7] Характерные дефекты литой заготовки устраняются измельчением структуры металла. Измельчения структуры металла можно добиться при помощи применения электромагнитного перемешивания, воздействия вибрации на кристаллизующийся расплав, применения микрохолодильников, но действующий способ управления структурой – это введение в расплав малого количества добавок модификатора.

Степень модифицирующего воздействия того или иного элемента можно оценить по знаку разности эффективных ионизационных потенциалов матрицы и модификатора $U_{me} - U_{mod}$ [8]. Если эта разность больше нуля, то данный элемент является модификатором. Если меньше нуля, элемент считается демодификатором. Вторым фактором считается фактор растворимости примеси в данной матрице. Модификатор, который сильно измельчает зерно, должен образовывать химические связи с кластерами, не входить в их состав, т.е. модификатор должен образовывать фрактальные кластеры – это кластеры металла, химически связанные с кластером модификатора, где кластер модификатора располагается между кластерами металла. Соответственно элемент, обладающий свойствами модификатора, должен обладать низкой растворимостью в твердом металле и ограниченную в жидком.

Вышесказанные факторы можно выделить в полуэмпирическую формулу для расчета коэффициента модифицирующей активности модификатора:

$$\mu = (U_{me} - U_{mod})/C_s,$$

где μ - коэффициент модифицирующей активности; U_{me} – эффективный ионизационный потенциал матрицы; U_{mod} – эффективный ионизационный потенциал модификатора; C_s – растворимость модификатора в твердом металле, ат. %.

Параметр μ имеет только относительное значение и служит для сравнения коэффициентов модифицирования различных элементов. Значение коэффициента μ для различных модификаторов и демодификаторов второго рода применительно к чистой меди приведены в таблице 14 [6].

Таблица 14 – Коэффициенты модифицирующей активности элементов применительно к чистой меди

Элемент	C_s , ат.%	U_{mod}	μ
Демодификаторы			
Fe	0,3	3	-0,3
Co	9	3,11	-0,022
Ni	100	3,2	-0,002
Ir	1	3.26	-0,350
Pt	14	3,34	-0,030
Pd	8	3,45	-0,068
Mn	25	3,66	-0,030
Ru	0,0001	3,45	-5400

Продолжение таблицы 14

Zn	39	3,17	-0,007
Cr	0,2	3,47	-2,8
Al	20	3,14	-0,012
Mo	0,0001	3,29	-3800
Ge	10,7	3,27	-0,034
Si	7	3,84	-0,133
C	0,0001	4,86	-19500
Nb	0,0001	3,42	-5100
Sn	0,0001	3,31	-4000
V	8	3,71	-0,1
Ta	0,0001	3,44	-5300
W	7	3,81	-0,129
P	0,6	4,3	-2,317
O	1,54	5,5	-1,682
S	1,5	4,76	-1,233
Модификаторы			
La	0,001	2,15	760
Ce	0,001	2,25	660
Pr	0,001	2,24	670
Nd	0,001	2,35	560
Ti	0,001	2,85	60
Zr	0,001	2,87	40
Mg	3	2,42	0,163
Ca	20	1,86	0,053
B	0,5	1,44	2,94
Y	0,001	2,3	610

К модификаторам, согласно таблицы 14 относятся в порядке убывания их модифицирующей способности: La, Pr, Ce, Y, Nd, Ti, Zr. Т.к. в каждом сплаве содержится какое-то свое количество контролируемых и неконтролируемых демодификаторов, очень трудно с помощью какого-то одного модификатора подавить демодифицирующий эффект всего набора известных и неизвестных примесей. Такое явление вызвано тем, что разные элементы имеют разное химическое сродство друг к другу, по-разному взаимодействуют или оказываются пассивными друг к другу. Поэтому для модифицирования меди целесообразно применить комплексный модификатор, в состав которого входят элементы, обладающие большой модифицирующей способностью. В данном случае таким модификатором может быть мишметалл (Ce – 60%, La – 22%, Nd – 15%, Pr – 3%).

2 Методическая часть

2.1 Исходный материал

Для проведения исследования мы использовали образцы меди марки М1, полученные по методике разливки проб в металлический кокиль без охлаждения и с охлаждением водой, а также путем добавления в расплав небольшого количества модификаторов (мишметаллы).

А также на образцах меди марки М1 и М00. Нагрев металла производился до температуры 1120 °С. Расплав меди модифицировался в ковше ёмкостью 5 кг, затем выливался в подогретый до 250 °С стальной кокиль с внутренним диаметром 50 мм. Модификатор предварительно запрессовывался в медную трубку, которая вводилась в расплав. Было отлито пять образцов для каждой марки меди, в которых вводимое содержание модификатора изменялось от 0,0025 до 0,0125 мас. %.

Для оценки эффективности модифицирования заливался контрольный образец без модификатора для каждой партии.

Первая партия образцов: 2.1; 5.1; 6.1; 3.05; 4.05; 8.05.

Первая цифра — номер плавки, а цифры после точки содержание легирующей добавки (1 мас. % и 0,5 мас. %).

Вторая партия образцов:

Образец 1 — чистая медь, отлитая в неохлаждаемый кокиль, температура 1320 °С;

Образец 2 — чистая медь с модификатором 0,1 %, отлитая в неохлаждаемый кокиль; 1320 °С;

Образец 3 — чистая медь с модификатором 0,1 %, отлитая в охлаждаемый кокиль; 1320 °С;

Образец 4 — чистая медь с модификатором 0,03 %, отлитая в неохлаждаемый кокиль; 1320 °С.

2.2 Методика приготовления микрошлифов

Микрошлифом называют образец металла, поверхность которого приготовлена для металлографического анализа. В зависимости от цели исследования, формы исследуемой детали выбирают место вырезки образца. На вырезанном образце выравнивают поверхность, которая будет исследоваться для анализа. Если материал мягкий, то поверхность получают опиливанием напильником, а если материал твердый, то затачивают на абразивном круге.

Шлифование начинают на бумаге с крупным абразивным зерном, а потом переходят на бумагу с более мелким зерном. При шлифовании вручную образец приготовленной плоскостью прижимают рукой к абразивной бумаге и перемещают его по бумаге в направлении, перпендикулярном к рискам,

полученных от опиливания напильником. Шлифуют сплав до полного исчезновения рисок, затем поверхность образца промывают, поворачивают на 90 градусов и шлифуют на шлифовальной бумаге уже с более мелким абразивным зерном до полного исчезновения рисок, полученных от предыдущего шлифования. При замене шлифовальной бумаги одного размера зернистости другим образец промывают и поворачивают на 90 градусов, чтобы риски при последующей обработке получались перпендикулярно к рискам от предыдущей обработки.

Механическое шлифование выполняется на специальных автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520 (рисунок 9), Germany и расходных материалах фирмы Lam Plan, France по методикам, предоставленным ООО «Митэла».



Рисунок 9 — Шлифовально-полировальный станок Saphir 520

Методика механического шлифования аналогична методике ручного шлифования. Нельзя переходить с крупнозернистой бумаги сразу на мелкозернистую. В этом случае грубые риски полностью не устроятся. При шлифовании не стоит сильно нажимать на образец, так как это может привести к заметному нагреву шлифуемой поверхности и внедрение абразивных зерен в металл, в результате чего на микрошлифе будут видны черные точки.

При шлифовании на абразивный круг должна постоянно поступать вода, охлаждающая образец и смывающая абразивные частицы.

2.3 Полирование образцов

После завершения шлифования на шлифовальной бумаге самой мелкой зернистости, полированием удаляют риски, и обрабатываемая поверхность образца становится зеркальной. Механическое полирование проводят на тех же станках, что и шлифование поверхности образцов. На вращающийся круг крепят войлок. Смачивают водой, к вращающемуся кругу, покрытой фетром или сукном прижимают шлифованной поверхностью образец и в процессе шлифования поворачивают. Полируют до полного исчезновения рисок и получения зеркальной поверхности. Для получения качественного полирования образец не рекомендуется сильно прижимать к сукну, так как при этом, хотя и ускоряется удаление рисок, но происходит деформирование поверхностного слоя и искажение структуры, выкрашивание хрупких включений. Сильный нажим на образец приводит к быстрому выдавливанию полировальной жидкости и к возможности пригоранию поверхности. После полирования образец промывают водой, а полированную поверхность дополнительно протирают ватой, а потом просушивают прикладыванием фильтровальной бумаги или легким протиранием сухой ватой.

2.4 Травление образцов

После полирования микроструктура не видна, но бывают исключения. Исключением составляют неметаллические включения (сульфиды, оксиды, графит в сером чугуна) вследствие их окрашенности в различные цвета резко выделяются на светлом фоне полированного микрошлифа.

Для появления микроструктуры шлиф подвергают кратковременному действию реактива - травлению. Травителями для микрошлифов служат слабые растворы щелочей, кислот и солей в воде или спирте.

Реактив для выявления границ зерен медных и бронзовых сплавов имеет следующий состав:

FeCl_3 – 5 г, HCl – 15 мл, H_2O – 100 мл.

При травлении наиболее полно проявляются границы зерен. Поверхность шлифа опускали в травитель на 15-20 секунд для выявления границ зерен медных сплавов.

После травления образцы промывали под струей проточной воды, просушивали на фильтровальной бумагой, а потом протирали ваткой.

Травление осуществляли при комнатной температуре, под вытяжным шаффом.

2.5 Металлографический анализ

Металлографический анализ образцов проводили при помощи оптического микроскопа производства компании Carl Zeiss модель Observer.D1m (рисунок 10) увеличения X100, X200, X500, X1000 крат.



Рисунок 10 — Оптический микроскоп Carl Zeiss Observer.D1m



Рисунок 11 — Микроскоп Carl Zeiss Stemi 2000

Фрактографический анализ образцов проводили с помощью микроскопа производства компании Carl Zeiss модель Stemi 2000 при различных увеличениях (рисунок 11).

2.6 Измерение микротвердости

Методом измерения микротвердости оценивали твердость медных образцов, на приготовленных металлографических шлифах. Метод микротвердости стандартизован (ГОСТ 9450-76) [6].

После исследования микроструктуры на образцах измеряли микротвердость на цифровом микротвердомере марки DM8, при нагрузке 200 кгс (рисунок 12).



Рисунок 12 – Цифровой микротвердомер DM8

Измерения проводили по 8 точкам на каждом образце, от центра к краю.

Схема микротвердомера показана на рисунке 13.

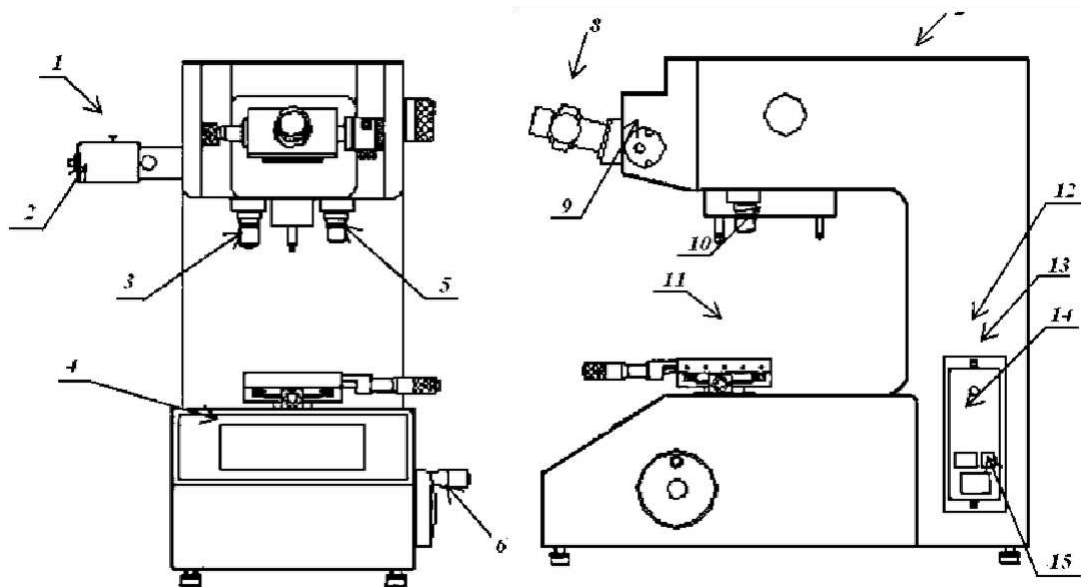


Рисунок 13 – Схема микротвердомера DM8

1 – регулировочный болт; 2 – корпус лампы; 3 – линза А ($\times 40$); 4 – панель управления; 5 – линза D ($\times 10$); 6 – рукоятка перемещения столика; 7 – верхняя крышка; 8 – электронный измерительный микроскоп; 9 - рукоятка выбора нагрузки; 10 – револьверное устройство; 11 - измерительный столик; 12 – боковая панель; 13 – лампа включения; 14 – источник питания; 15 – вход

Порядок работы на приборе:

- Включите прибор, на панели управления появится главное меню
- Выберите метод измерения (HV).
- Поверните револьверное устройство таким образом, чтобы линза А заняла переднюю позицию.
- Разместите блок на измерительном столике и вращайте рукоятку перемещения столика до достаточного приближения образца к линзе (0,5 мм). Поверхность образца должна быть строго перпендикулярна оси вдавливания индентора.
- Посмотрите в микроскоп и отрегулируйте интенсивность освещения при помощи «Up key» и «Down key».
- Путём вращения подстройте окуляр под свои глаза.
- Сфокусируйтесь на блоке. Никогда не поднимайте столик, глядя в окуляр, так как существует вероятность повреждения линзы. После фокусировки можете повернуть рукоятку вверх и вниз для небольшой регулировки. Если фокусировка неправильно произведена, повторите пункт 4.
- После правильной фокусировки поместите измеряемый образец в центр видимого поля.
- Установите нагрузку с помощью рукоятки выбора нагрузки.
- Нажмите «Start key», кнопка загорается и подаётся нагрузка.

Если кнопка «Start key» нажата в позиции линзы, то револьверное устройство автоматически устанавливает индентор и подается нагрузка.

Во время измерения исключите различного рода вибрации.

Никогда не поворачивайте револьверное устройство во время работы.

Это может привести к неисправности микротестера.

- Когда «START» перестаёт мерцать, револьверное устройство автоматически устанавливает линзу.
- Через электронный микроскоп Вы можете видеть отпечаток. Снова сфокусируйтесь. Фокусируйтесь на 4 границах, не на центре отпечатка.
- При помощи кнопки сведите измерительные линии вместе так, чтобы они не перекрывали друг друга.
- Нажмите на дисплее ZERO. Диагональ $D1$ становится «0,0».
- Немного разделите линии, так, чтобы был виден отпечаток.
- Поверните левую ручку микроскопа и передвигайте левую измерительную линию до тех пор, пока она не достигнет края отпечатка.
- Тоже сделайте с правой границей.
- Нажмите «READ». На дисплее отобразится длина диагонали $D1$. Поверните микроскоп на 90° и измерьте длину по вертикали. То же самое сделайте по вертикали
- Нажмите «READ». На дисплее отобразится длина диагонали $D2$.
- Полученное значение микротвёрдости HV отобразится на дисплее.

Меры предосторожности

Использование грязного индентора может привести к получению нечётких отпечатков либо к невозможности проведения измерений. Необходимо убрать грязь чистой тряпочкой или аппликатором. С образца также необходимо удалить грязь и пыль.

2.7 Микрорентгеноспектральный анализ

Микроанализ и анализ химического состава фаз проводился на сканирующем электронном микроскопе EVO50 с применением энергодисперсионного анализатора INCA ENERGY. Электронный микроскоп - это мощный инструмент при выполнении анализа материалов во всех областях материаловедения. Растровый электронный микроскоп в режиме микроанализа позволяет получить данные о химическом (поэлементном) составе вещества в микрообъемах, т.е. осуществить микрорентгеноспектральный анализ (рисунок 14).

Электронно-зондовый микрорентгеноспектральный анализ в растровом микроскопе, это анализ на микроскопическом уровне, который дает объективную возможность иметь информацию о поэлементном составе фаз и структурных составляющих малых размеров, соответствующих областям 1-5 мкм.

Микрорентгеноспектральный анализ позволяет получать по спектру характеристического рентгеновского излучения данные об элементном составе вещества. Микроскоп включает два типа спектрометров: волновой, в котором микроанализ вещества определяется по длинам волн характеристического рентгеновского излучения и энергодисперсионный, в котором микроанализ осуществляется по значениям энергий характеристического рентгеновского спектра.



Рисунок 14 - Растровый электронный микроскоп EVO 50

Работа растрового микроскопа в режиме микроанализа

В дисперсионном спектрометре INCA оценивается энергетический спектр элементов входящих в состав проверяемого образца, что и является основанием для их количественного и качественного микроанализа. К проблемам энергодисперсионного микроанализа в сравнении с волновым дисперсионным микроанализом следует отнести высокие пределы обнаружения элементов, недостаточные для надежного анализа элементов примесей. При количественном анализе легких элементов (O, N, F) их содержание должно быть больше 2-3%, а тяжелых (Ag, Au, Ti) – более 0,5%. Энергодисперсионный микроанализ также ограничен, связанные с тем, что полупроводниковые детекторы не позволяют разрешать многие близкие спектральные линии, например: S K / Mo L, Si K / Rb L, Sr L / W M, Al K / Br L.

Для микрорентгеноспектрального анализа применяется изображение, полученное в растровом микроскопе детекторами BSD и SE. При работе микроскопа в режиме микроанализа для связи между спектрометром (анализатором) и микроскопом родсоединяется программа Start SEM → RemCon32.

В системе анализатора имеются три базовых навигатора:

Анализатор – качественный и количественный анализ химического состава;

Point & ID – автоматизация управления электронным зондом, выбор систем точек или областей, и анализ состава с привязкой к изображению;

Картирование – качественный анализ пространственного распределения элементов.

Платформа INCA Energy базирована на основе Навигатора, который позволяет прокладывать последовательные действия микроанализа наиболее ускоренным и логичным путем. Каждый шаг Навигатора предоставляет отдельный экран, содержащий все необходимые инструменты анализа.

Чаще всего для микроанализа в системе INCA Energy используется базовый навигатор Point & ID. В этом режиме вкладка Навигатора «Участок анализа» позволяет на изображении объекта обозначить области анализа. Для получения рентгеновского спектра на анализируемом изображении применяются функции – точка, линия, площадь, матрица. Расположение рентгеновского спектра по энергии элементов, входящих в состав вещества, осуществляется при активизации вкладки Навигатора «Набор спектра».

Во вкладке Навигатора «Количественный анализ» производится химический поэлементный анализ выделенных микрообъемов материала с использованием энергетического рентгеновского характеристического спектра.

Вкладка Навигатора «Отчет» дает возможность показать результаты количественного микрорентгеноспектрального анализа в весовых или атомных процентах в виде отчета, структуру которого при необходимости можно менять.

Вкладка «Smart Map» («Карта элементов») дает возможность накапливать спектры по каждому присутствующему элементу в сплаве и показывать их распределение по сечению выбранной области анализа. Программа дает возможность присвоить каждому элементу определенный цвет. Вкладке «Карты элементов» дает возможность получать несколько цветовых микрокартин с областями (фазами) структуры, соответствующие одному элементу. Во вкладке Phase Map (Фазовая карта) можно накапливать

спектры элементов по сечению фаз, и представлять в цветовой гамме фазы обогащенные тем или иным элементом. Фазовые карты дают возможность обрабатывать результаты в виде гистограмм и оценивать, например, доли различных фаз.

2.8 Методы определения величины зерна

Зерна металлов - это отдельные кристаллы поликристаллического конгломерата, разделенные между собой смежными поверхностями, называемыми границами зерен. Зерна могут быть равноосными и неравноосными. При наличии двойников зернами считают кристаллы вместе с двойниками.

Величина зерна - средняя величина случайных сечений зерен в плоскости металлографического шлифа - определяется методами:

- визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал, приведенных в обязательном приложении 2, с определением номера зерна;

- подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна;

- подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра в случае равноосных зерен, количества зерен в 1 мм^3 в случае неравноосных зерен;

- измерения длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера;

- ультразвуковым.

Указанные методы применяют для оценки величины зерна, имеющего форму, близкую к равноосной.

Метод подсчета пересечений границ зерен применяется для оценки величины зерна удлиненной формы.

В случае определения величины зерна в разнотернистой структуре средние размеры (диаметр, площадь зерна) не являются характеристиками оценки структуры.

Метод определения величины зерна сравнением с эталонными шкалами

Величину зерна методом сравнения определяют при увеличении $100\times$.

Допускается применение увеличения 90-105.

После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных мест и сравнивают с эталонами. Сравнение можно проводить, наблюдая изображение в окуляре микроскопа, на матовом стекле или фотоснимке.

Шкалы 1-3 представлены десятью эталонами в виде схематизированной сетки, ограничивающей размеры зерен. Эталоны приведены в виде круга диаметром 79,8 мм, что соответствует площади 5000 мм² или натуральной площади на шлифе 0,5 мм².

Эталон составлен так, что при увеличении 100^x номера зерен G соответствуют числовым показателям величины зерна по уравнению $m = 8 \times 2^G$, где m - количество зерен на 1 мм² площади шлифа.

Средние численные значения площади зерна, числа зерен в 1 мм³, диаметра и условного диаметра, а также числа зерен на площади в 1 мм², соответствующие эталонам шкалы G (-3) - 14, приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Средние численные значения площади зерна, числа зерен в 1 мм³, диаметра и условного диаметра, а также числа зерен на площади в 1 мм².

Номер зерна G	Средняя площадь сечения зерна, а, мм ²	Число зерен на площади 1 мм ² m			Среднее число зерен в 1 мм ³ N _v	Средний диаметр зерна d _m , мм	Средний условный диаметр зерна d _l , мм ²
		минимальное	среднее	максимальное			
-3	1	0,75	1	1,5	1	1,0	0,875
-2	0,5	1,5	2	3	2,8	0,707	0,650
-1	0,25	3	4	6	8	0,5	0,444
0	0,125	6	8	12	22,6	0,353	0,313
1	0,0625	12	16	24	64	0,250	0,222
2	0,0312	24	32	48	181	0,177	0,157
3	0,0156	48	64	96	512	0,125	0,111
4	0,00781	96	128	192	1448	0,088	0,0783
5	0,00390	192	256	384	4096	0,062	0,0553
6	0,00195	384	512	768	11585	0,044	0,0391
7	0,00098	768	1024	1536	32768	0,031	0,0267
8	0,00049	1536	2048	3072	92682	0,022	0,0196
9	0,000244	3072	4096	6144	262144	0,015	0,0138
10	0,000122	6144	8192	12288	741485	0,011	0,0099
11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
13	0,000015	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032
14	0,000008	98304	131072	96608	47449064	0,0027	0,0027

Если размер зерна в образце выходит за пределы эталонов шкал с номерами 1-10, пользуются другими увеличениями. Для перевода номера эталона при увеличении 100^x пользуются табл. 16.

Таблица 16 – Перевод номера эталона при увеличении 100^x

Увеличение	Номера зерен при 100^x																	
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25^x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-
50^x	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
200^x	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-
400^x	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800^x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8

Метод подсчета зерен

Метод заключается в определении количества зерен на единице поверхности шлифа (1 мм^2) и расчете средней площади зерна и среднего диаметра зерен.

Подсчет зерен проводят на матовом стекле камеры микроскопа или на микрофотографиях, в которых поле зрения ограничивают одной из плоских фигур: окружностью диаметром 79,8 мм или квадратом со стороной 70,7 мм, или прямоугольником с размерами сторон 65x77, 60x83, 55x91 или 50x100 мм, что соответствует $0,5 \text{ мм}^2$ поверхности шлифа при увеличении 100^x .

Подсчитывают число зерен, попавших внутрь выбранной фигуры (n_1), и число зерен, пересеченных ее границами (n_2).

Общее количество зерен (n_{100}) на площади $0,5 \text{ мм}^2$ шлифа при увеличении 100^x подсчитывают по формуле:

$$n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2} \quad \text{- для круга;}$$

$$n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2} - 1 \quad \text{- для прямоугольника или квадрата.}$$

Количество зерен m , приходящихся на 1 мм^2 площади шлифа, определяют по формуле $m = 2n_{100}$.

При использовании другого увеличения, отличающегося от 100^x , число зерен m , приходящихся на 1 мм^2 поверхности шлифа, определяют по формуле:

$$m = 2 \left(\frac{g}{100} \right)^2 \cdot n_g,$$

где n_g - общее количество зерен, находящихся внутри фигуры, ограничивающей поле зрения на шлифе или фотографии при увеличении g .

Увеличение подбирают из расчета, чтобы на поверхности было не менее 50 зерен.

Подсчет зерен проводят не менее чем в трех характерных местах шлифа и по полученным результатам рассчитывают среднее арифметическое значение.

Среднюю площадь сечения зерна (α) в мм² определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{m}.$$

Средний диаметр зерна (d_m) в мм определяют по формуле:

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Сравнением полученных значений m , α и d_m со значениями соответствующих параметров в табл.14 определяют номер величины зерна G .

Допускаемые расхождения результатов трех определений при подсчете количества зерен не должны превышать 50%.

Определение величины зерна методом подсчета зерен (цветные металлы) [17]

Для определения величины зерна поверхность шлифа просматривают и выбирают не менее трех типичных мест, а при определении статистических характеристик (S_{\min} , S_{\max} , σ_s) - не менее 15 типичных мест и производят соответствующее число измерений.

Для определения величины зерна применяют контрольную площадь подсчета.

Определение величины зерна производят при таком увеличении, чтобы внутри контрольной площади находилось целиком 30-100 зерен.

На изображение измеряемого места, наблюдаемого на матовом стекле микроскопа, на микрофотографии или непосредственно в окуляре микроскопа (если окуляр снабжен изображением контуров контрольной площади подсчета) наносят контуры контрольной площади подсчета.

В качестве контрольной площади подсчета используют следующие фигуры при 100-кратном (линейном) увеличении, ограничивающие на шлифе площадь 0,5 мм²:

круг диаметром 79,8±0,4 мм;

квадрат или прямоугольники размерами 70,7x70,7; 65x77; 60x83,3; 55x91; 50x100 мм с предельными отклонениями ±0,4 мм.

Указанные размеры берут по внутренним контурам фигур.

При увеличениях, отличных от 100-кратного, допускается применять площади подсчета других размеров в виде круга или прямоугольников с соотношением сторон от 1:2 до 2:1.

Величину зерна определяют подсчетом числа зерен n_1 , целиком находящихся внутри контрольной площади подсчета, и n_2 , пересекаемых внутренним контуром контрольной площади подсчета, исключая зерна, находящиеся на углах контрольной площади подсчета в виде квадрата или прямоугольника.

Разница при подсчете количества зерен на одном шлифе не должна составлять более 50%.

За результат испытания принимают одну или несколько величин:

- а) среднее число зерен m , приходящееся на 1 мм^2 площади шлифа;
- б) среднюю площадь сечения зерна a , мм^2 ;
- в) минимальную и максимальную площадь сечения зерна a_{\min} и a_{\max} соответственно, мм^2 ;
- г) среднеквадратическое отклонение единичных измерений площади сечения зерна σ_a , мм.

Расчет производят по формулам:

- а) при контрольной площади подсчета в виде круга

$$m = \frac{1}{S_k} (n_1 + Zn_2),$$

$$Z = 0,5 - \frac{a_m}{D}.$$

где

При контрольной площади подсчета в виде круга диаметром 79,8 мм величина коэффициента α в зависимости от числа зерен приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Величина коэффициента α в зависимости от числа зерен

Число зерен внутри контрольной площади подсчета	α
30	0,455
40	0,460
50	0,465
100	0,475

- б) при контрольной площади подсчета в виде квадрата или прямоугольника

$$m = \frac{1}{S_x} (n_1 + 0,5n_2 + 1) ;$$

в) при контрольной площади подсчета любых фигур:

$$a = \frac{1}{m} .$$

При соблюдении условий и 100-кратном увеличении:

$$\frac{1}{S_x} = 2 .$$

При соблюдении условий, но при увеличении, отличном от 100-кратного

$$\frac{1}{S_x} = f = 2 \left(\frac{g}{100} \right)^2 .$$

Величина коэффициента f для наиболее применительных увеличений приведена в таблице 18.

Таблица 18 – Величина коэффициента f для наиболее применительных увеличений

Увеличение (линейное)	f
10	0,02
25	0,125
50	0,500
75	1,125
100	2,00
150	4,50
200	8,00
250	12,5
300	18,0
500	50,0
750	112,5
1000	200,0

В качестве справочной величины, характеризующей размер зерна при определении его методом подсчета зерен, может быть вычислен средний диаметр зерна d по формуле.

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}} .$$

Список использованной литературы

1. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров ; под общ. Ред. Е.Д. Макаренко. – Москва : Машиностроение, 2004. – 336 с.
2. Бабкин, В. Г. Влияние кислорода на механические свойства меди и медематричных композитов, упрочненных синтезированным в расплаве карбидами хрома / В. Г. Бабкин // *Металлы*. – 2016. – № 3. – С. 25–30.
3. Бабкин, В. Г. Литые металломатричные композиционные материалы электротехнического назначения / В. Г. Бабкин // *Сибирский федеральный университет*. - Красноярск, 2014 – Т. 5, № 7. – С. 416–423.
4. Бабкин, В. Г. Покровно-рафинирующие флюсы для выплавки медематричных композиционных сплавов / В. Г. Бабкин // *Сибирский федеральный университет*. - Красноярск, 2016 – Т. 7, № 9. – С. 836–844.
5. Бабкин В.Г., Ковалева А.А., Напряшкин А.В., Сагалаков М.А., Влияние высокотемпературной обработки расплава и его модифицирования на структуру и свойства сплавов на основе меди [Электронный ресурс] /В.Г. Бабкин, А.А. Ковалева // *Перспективны* — 2018 Международная студенческая конференция. – 2018. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/991>
6. *ГОСТ 9450-76* Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Стандарт устанавливает метод измерения микротвердости изделий и образцов из металлов, сплавов. – Введ. 01.01.1977. – Москва : Издательство стандартов, 1977. – 30 с.
7. Мысик, Р. К. Особенности производства литых заготовок из медных сплавов / Р. К. Мысик, С. В. Брусницын, А. В. Сулицин, М. О. Ивкин, А. В. Карпинский // *ЮУрГУ*. - Челябинск, 2016 – Т. 7, № 9. – С. 26–34.
8. Гофеншефер, Л. И. Получение сплава меди, содержащего до 25 % хрома, методом открытой индукционной плавки / Л. И. Гофеншефер // *Цветные металлы*. – Москва, 1981 – № 9. – С. 90–91.
9. Nagata K., Nishikawa S. Aging and Reversion Phenomena of Cu–Cr Alloys // *Reports of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo*. – 1975. –Vol. 24, no. 4. – P. 115–168.
10. Головешко, В.П. Плавка и литье цветных металлов и сплавов / В.П. Головешко, В.И. Соколов // *Науч. тр. Гипроцветметобработка*. – Москва.: Металлургия, 1969. – № 32. – С. 105–112.
11. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин ; под общ. Ред. М.С. Архангельская. – Москва : Металлургия, 1981. – 416 с.
12. Волков, Г.М. Металловедение: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.М. Волков, В.М. Зуев ; под общ. ред. Л.А. Левченкова. – Москва : Академия, 2008. – 400 с.
13. *СТО 4.2–07–2014 Система менеджмента качества. Общие*

требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Введ. 09.01.2014. – Красноярск : Стандарт организации, 2014. – 62 с.

14. Сулицин А.В. Теоретические и технологические основы производства литых заготовок из электротехнической меди: дис. ... докт. техн. Наук / Сулицин Андрей Владимирович. – Екатеринбург, 2017. – 311 с.

15. Бабкин В.Г. Влияние кислорода на механические свойства меди и медематричных композитов, упрочненных синтезированными в расплаве карбидами хрома / В.Г. Бабкин, А.И. Трунова, А.И. Черепанов // Металлы. – 2016. – № 3. – С. 25-30.

16. Бабкин В.Г. Влияние термической обработки и модифицирования расплава на структуру и свойства электротехнической меди / В.Г. Бабкин, А.И. Трунова, А.А. Ковалева // Цветные металлы и минералы. – 2018. – № 10. – С. 894-897.

17. ГОСТ 9450-76 Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования. – Введ. 01.07.1976. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 20 с

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись инициалы, фамилия

« 09 » июля 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование влияния модификаторов на свойства
электротехнической меди

тема

22.04.02 «Металлургия»

код и наименование направления

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

А.А. Ковалева
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

А.А. Ковалева

инициалы, фамилия

Выпускник

М.А. Сагалаков
подпись, дата

М.А. Сагалаков

инициалы, фамилия

Рецензент

С.Б. Наумов
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

С.Б. Наумов

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Продолжение титульного листа МД по теме: Исследование влияния модификаторов на свойства электротехнической меди

Консультанты по
разделам:

Литературный обзор
наименование раздела


подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Методическая часть
наименование раздела


подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Экспериментальная часть
наименование раздела


подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения
институт
Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.П. Жереб
подпись инициалы, фамилия
«09» июля 2020 г.

Исследование влияния модификаторов на свойства
электротехнической меди
наименование ВКР (МД)

22.04.02 «Металлургия»

наименование темы, код и наименование специальности (специализации), направления,

22.04.02.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»
магистерской программы

Научный руководитель/
руководитель ASJ
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Выпускник СВ
подпись, дата

М.А. Сагалаков
инициалы, фамилия

Рецензент Наумов
подпись, дата

Доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

С.Б. Наумов
инициалы, фамилия

Консультанты:
Литературный обзор
наименование раздела

ASJ
подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Методическая часть
наименование раздела

ASJ
подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Экспериментальная часть
наименование раздела

ASJ
подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

ASJ
подпись, дата

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

институт

Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.П. Жереб

подпись

инициалы, фамилия

« 17 » февраля 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Сагалакову Максиму Александровичу
фамилия, имя, отчество

Группа: ЦМ18-27М Направление (специальность): 22.04.02 «Металлургия»
номер код наименование

Тема выпускной квалификационной работы: Исследование влияния модификаторов на свойства электротехнической меди.

Утверждена приказом по университету № 2354/с от 17.02.2020

Руководитель ВКР: А.А. Ковалева, доцент, канд. техн. наук, СФУ
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Обзор литературы, образцы электротехнической меди марки М1 и М00.

Перечень разделов ВКР: Литературный обзор, методическая часть, экспериментальная часть.


Перечень графического материала: Микроструктуры (в количестве 48 шт.), таблицы (в количестве 29 шт.), электронограммы (в количестве 5 шт.), спектрограммы (в количестве 2 шт.).

Руководитель ВКР


подпись

А.А. Ковалева
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению


подпись, инициалы и фамилия студента

М.А. Сагалаков

« 17 » февраль 2020 г.

Реферат

В выпускной квалификационной работе (магистерской диссертации) приведен обзор литературы по данной тематике, приведена методическая часть, описаны исследования, проведенные на образцах меди.

В приведенном обзоре литературы описаны структурные изменения, полученные авторами, при различных условиях литья медных сплавов из чистой меди, а также известные свойства меди и применение меди и медных сплавов.

В эксперименте подтверждается положительное влияние предварительной подготовки медного расплава к модифицированию. В работе показано изменение кристаллической структуры меди при введении в нее миш-металла и последующей кристаллизации металла в кокиле.

В работе описаны изменения величины микротвердости в зависимости от условий кристаллизации.

Работа состоит из 73 стр., 37 рисунков, 29 таблиц, 9 графиков, 18 источников литературы.

Ключевые слова: медь, модификатор, легирование, структуры, микротвердость.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Литературный обзор.....	10
1.1 Медь и ее свойства. Физические свойства	10
1.2 Механические свойства.....	16
1.3 Технологические свойства	17
1.4 Особенности литых заготовок из медных сплавов.....	22
1.5 Влияние примесей на структуру и свойства меди	24
1.6 Техническая медь	27
1.7 Модифицирование медных сплавов	29
1.8 Модифицирование медных сплавов	30
2 Методическая часть.....	34
2.1 Исходный материал.....	34
2.2 Методика приготовления микрошлифов.....	34
2.3 Полирование образцов	36
2.4 Травление образцов.....	36
2.5 Металлографический анализ.....	37
2.6 Измерение микротвердости	38
2.7 Микрорентгеноспектральный анализ.....	40
2.8 Методы определения величины зерна.....	43
3 Экспериментальная часть	49
3.1 Структура образцов меди.....	49
3.2 Анализ механических и физических свойств	59
3.3 Микротвердость образцов меди.....	62
3.4 Микрорентгеноспектральный анализ образцов меди.....	64
Заключение	72
Список литературы.....	73