

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Темных
(подпись)

« ____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Улучшение структуры электротехнической меди за счет модифицирования

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный руководитель

(подпись, дата)

В.Г. Бабкин

Выпускник

(подпись, дата)

М.О. Огиенко

Рецензент

(подпись, дата)

И.А. Пихутин

Красноярск 2020

Продолжение титульного листа магистерской диссертации по теме:
Улучшение структуры электротехнической меди за счет модифициро-
вания

Консультанты по разделам:

1 Обзор литературных данных

2 Оборудование и методика проведения исследований

3 Результаты опытов и их обсуждения

_____ Трунова А.И
(подпись, дата)

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Темных
(подпись)

« ___ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Огиенко Маргарите Олеговне

Группа: МТ18-01М

Направление (специальность): 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Профиль: 22.04.01.04 Синтез и литье новых металлических материалов

Тема магистерской диссертации: Улучшение структуры электротехнической меди за счет модифицирования

Утвержденная приказом по университету: № 17235/с от 09.11.2018

Исходные данные для диссертации: научная, учебная, методическая литература; исследования на кафедре.

Перечень разделов магистерской диссертации:

1 Обзор литературных данных

2 Оборудование и методика проведения исследований

3 Результаты опытов и их обсуждение

Перечень графического материала: Презентационный материал

Научный руководитель

(подпись, дата)

В.Г. Бабкин

Задание приняла к исполнению

(подпись, дата)

М.О. Огиенко

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме: «Улучшение структуры электротехнической меди за счет модифицирования» содержит 53 страницы текстового документа, 29 рисунков, 4 таблицы, 24 использованных источников.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ МЕДЬ, СТОЛБЧАТАЯ СТРУКТУРА, ОКИСЛЕНИЕ МЕДИ, МИКРОГЕТЕРОГЕННОСТЬ, МОДИФИЦИРОВАНИЕ, ОКРУГЛАЯ ЗЕРЕННАЯ СТРУКТУРА, КАДМИЙ, МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ

Цель работы: Исследование влияния модификаторов и микролегирующих добавок на структуру меди и композиционных сплавов на ее основе.

Задачи исследования:

- На основе литературных источников и анализа механизма модифицирования выбрать модификатор для улучшения структуры меди и микролегирующую добавку для рафинирования границ зерен от кислорода и серы;
- Экспериментально исследовать совместное влияние модифицирующей и микролегирующей добавок, на формирование структуры и свойств меди, и композиционных сплавов на ее основе.

Результаты работы: На основе литературных источников проанализированы модификаторы, используемые для изменения структуры и свойств электротехнической меди, и выявлены их недостатки. Экспериментально определена температура перегрева расплава, необходимая для перевода расплава в гомогенное состояние, исследовано комплексное влияние модифицирование и микролегирования на формирование структуры литой заготовки.

Значимость работы: Полученные результаты введения новой комплексной добавки в электротехническую медь, позволяют получать литые заготовки с мелкозернистой структурой и улучшенными свойствами, что благоприятно скажется при их дальнейшей обработке и свойствах готового изделия.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Обзор литературных данных	8
1.1 Особенности формирования структуры меди при литье.....	8
1.2 Модифицирование меди и медных сплавов	10
1.2.1. Модификаторы I рода.....	13
1.2.2. Модификаторы II рода.....	19
1.2.3. Микролегирование активными добавками (РЗМ), улучшающих структуру сплава.....	23
1.3. Недостатки известных модификаторов и негативное влияние примесей	28
Выводы.....	30
2 Оборудование и методика проведения исследований.....	31
2.1 Оборудование для плавки и литья экспериментальных образцов из меди	31
2.2 Оборудование для металлографического анализа образцов, исследования твердости и механических свойств.....	34
2.2.1 Металлографический анализ.....	34
2.2.2 Методика определения микротвердости.....	35
2.2.3 Методика измерения твердости.....	37
2.2.4 Испытание на растяжение.....	39
3 Результаты опытов и их обсуждения.....	40
3.1 Влияние кислорода на структуру жидкой и твердой меди марки М1.....	40
3.2 Выбор модификатора.....	42
3.3 Влияние редкоземельных металлов на чистую медь марки М1	44
3.4 Влияние комплексной добавки на диспесно-упрочненную медь...	45
3.4.1. Без применения модификатора.....	45
3.4.2 Комплексное применение РЗМ и Кадмия.....	47
Выводы.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Медь является одним из электротехнических материалов, широко используемых в машиностроении, строительстве, медицине, домашнем обиходе и других отраслях. К качеству продукции постоянно возрастают требования потребителей, поэтому это влечет за собой необходимость проведения исследований, направленных на обеспечение требуемого уровня качества продукции. Требуется совершенствование уже имеющихся технологий, так как они не обеспечивают стабильного качества продукции.

Медь – металл, имеющий уникальное сочетание различных свойств: превосходная устойчивость к коррозии, высокая степень пластичности, привлекательные цвет и фактура, высокая теплопроводность и хорошая электропроводимость.

После очистки от примесей медь приобретает розоватый на изломе цвет, становится мягкой и ковкой. Удаление примесей значительно повышает тепло- и электропроводность, поэтому большая часть всей произведённой меди идёт на изготовление электротехнических изделий.

Чистая медь — ковкий и мягкий металл, достаточно тяжелый, отличный проводник тепла и электричества, легко подвергается обработке давлением. Именно эти качества позволяют применять изделия из меди в электротехнике. Более 70 % всей производимой меди идет на электротехнические изделия. Кабели, электротехнические шины, обмотки трансформаторов и другие электротехнические изделия изготавливаются из разных сортов меди.

1.1 Особенности формирования структуры меди при литье

При литье меди ввиду ее высокой теплопроводности в структуре слитков преимущественно наблюдаются вытянутые в направлении отвода тепла кристаллические зерна. Причем это характерно не только для крупных литых заготовок, но и для заготовок малого сечения. Для дальнейшей пластической обработки в структуре литых заготовок желательно иметь равноосные зерна с целью повышения их изотропности. Это позволит повысить технологичность литых заготовок при обработке давлением, а также уровень механических свойств готовой продукции.

Структура и свойства литых заготовок из меди для последующей пластической обработки во многом зависят от способа получения заготовок и технологических параметров литья. Поскольку литые заготовки из меди подвергаются обработке давлением, то одним из важных свойств литой меди является сопротивление деформации.

Макроструктура литых заготовок из меди, полученных различными способами литья, представлена на рисунке 1.1.

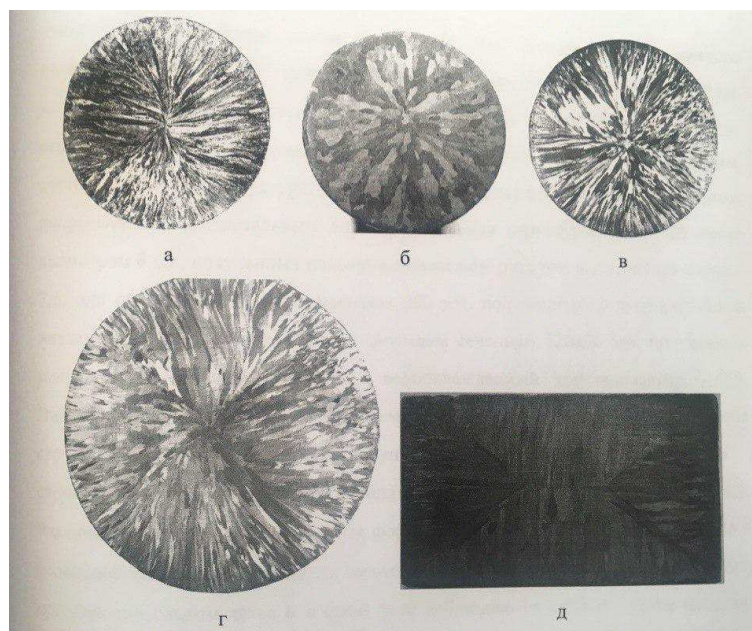


Рисунок 1.1 – Макроструктура поперечных темплетов литых заготовок из меди марки М00, полученных различными способами литья: *а* – слиток диаметром 40 мм (наполнительное литье); *б* – заготовка диаметром 17 мм (непрерывное горизонтальное литье);

ϵ – заготовка диаметром 8 мм (непрерывное литье методом вытягивания вверх); ζ – слиток диаметром 200 мм (полунепрерывное литье); δ – заготовка сечением 120x70 мм (непрерывное литье в ленточный водоохлаждаемый кристаллизатор)

Анализ макроструктуры литых заготовок из меди показал, что независимо от способа литья структура литых заготовок характеризуется столбчатым строением, а значит будет наблюдаться анизотропия свойств. При этом размер столбчатых зерен определяется масштабным фактором литой заготовки и технологией ее получения.

Для обеспечения однородности механических свойств литой заготовки и снижения температурно-силовых параметров пластической обработки предпочтительно наличие в структуре зерен с конфигурацией, близкой к равноосной за счет корректировки технологических параметров литья и применения внешних воздействий на кристаллизующийся расплав. Поэтому структура, характеризующаяся меньшим значением коэффициента формы зерна, наиболее благоприятна с точки зрения уровня свойств и пластической обработки литых заготовок [1].

1.2 Модифицирование меди и медных сплавов

Для устранения характерных дефектов литой заготовки необходимо измельчить структуру металла. Измельчения структуры металла можно добиться за счет применения электромагнитного перемешивания, воздействия вибрации на кристаллизующийся расплав, использования микрохолодильников, но наиболее действенный способ управления структурой – это введение в расплав малого количества добавок модификатора.

Степень модифицирующего влияния того или иного элемента можно оценивать по знаку разности эффективных ионизационных потенциалов матрицы и модификатора $U_{me} - U_{mod}$ [2]. Если эта разность больше нуля, то есть положительна, то данный элемент может быть модификатором. Если эта разность меньше нуля, то данный элемент является демодификатором. Вторым фактором, характеризующим способность элемента оказывать влияние на рост кристаллов, следует считать фактор растворимости примесей в данной матрице. Модификатор, наиболее сильно измельчающий зерно, должен образовывать химические связи с кластерами, но не входить в их состав, то есть 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 иметь низкую растворимость в твердом металле и ограниченную – в жидком.

Оба выделенных фактора можно выделить в полуэмпирическую формулу для расчета коэффициента модифицирующей активности модификаторов:

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. %.

Величина μ имеет только относительное значение и служит для сравнения коэффициентов модифицирования различных элементов. Значения коэффициента μ для различных модификаторов и демодификаторов второго рода применительно к чистой меди приведены в таблице 1.

Таблица 1 – 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
Zn	39	3,17	-0,007
Cr	0,2	3,47	-2,8
Al	20	3,14	-0,012
Mo	0,0001	2,29	-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 модификатором согласно таблице 1 относятся в порядке убывания их модифицирующей способности: La, Pr, Ce, Y, Nd, Ti, Zr. Поскольку в каждом сплаве содержится какое-то свое сочетание контролируемых и неконтролируемых демодификаторов, очень трудно, а часто и невозможно с помощью какого-то одного модификатора подавить демодифицирующий эффект всего набора известных и неизвестных примесей. Это вызвано тем, что разные элементы имеют разное химическое сродство друг к другу, по разному взаимодействуют или оказываются инертными друг к другу. Поэтому целесообразно для модифицирования меди применить комплексный модификатор, в состав которого входят элементы, имеющие наибольшую модифицирующую способность.

1.2.1. Модификаторы I рода

Модификаторы 1-го рода непосредственно образуют в металле центры кристаллизации в виде мелкодисперсной "взвеси" [3]. Они должны, либо сами обладать высокой температурой плавления и создавать твердые частицы, вызывающие гетерогенные образования зародышей [4, 5], либо образовывать с компонентами сплава тугоплавкие соединения, играющие такую же роль. Эффективными модификаторами 1 рода являются те, которые отвечают определенным требованиям, а именно:

- Должно образовываться химическое соединение между модификатором и одним из компонентов сплава, желательно с основным компонентом сплава.

- Кристаллизация частиц образуемых соединений (интерметаллидов) должна происходить раньше, чем основного металла или сплава.

- Модификаторы должны образовывать соединения при незначительных их концентрациях, в противном случае возможно значительное изменение химического и фазового состава сплава.

Рассмотрим действие модификатора 1 рода на примере титана.

Для изучения влияния титана на формирование структуры и уровень механических свойств меди марки М1 проводили лабораторные эксперименты по введению титана в расплав меди [13]. С этой целью навеску титана из расчета 0,002...0,024 % от массы расплава меди запрессовывали в медную трубку. Методика проведения эксперимента оставалась такой же, как и при вводе магния. Кроме того, отливался контрольный слиток без введения титана в расплав меди. При оценке влияния титана на структуру и свойства меди учитывали расчетное количество вводимого титана. Макроструктура слитков меди с различным количеством введенного титана представлена на рисунке 1.2.

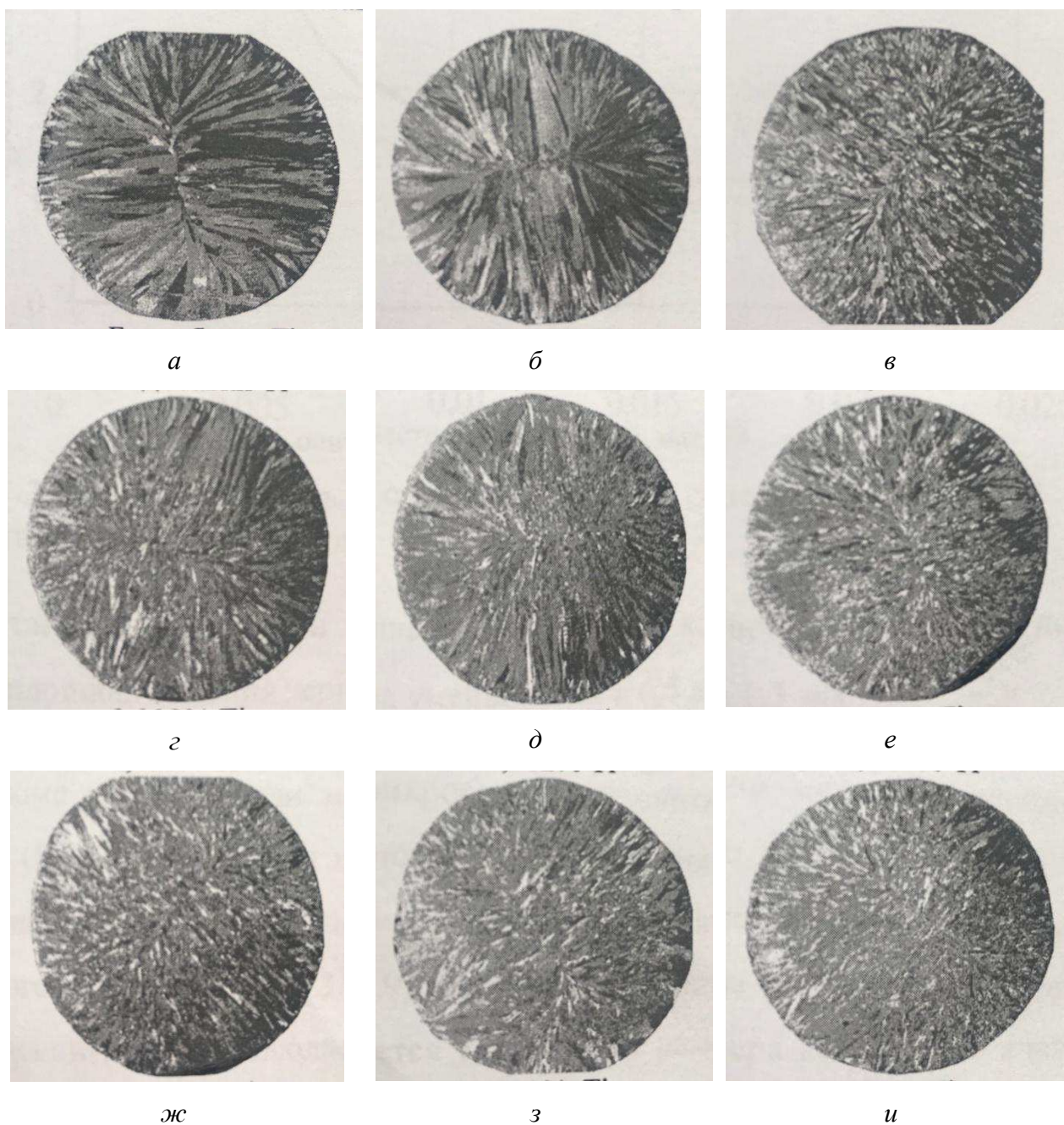


Рисунок 1.2 – Макроструктура слитков меди марки М1 с различным количеством введенного титана: а – без модификатора; б – 0,002 % Ti; в – 0,007 % Ti; г – 0,008 % Ti; д – 0,012 % Ti; е – 0,015 % Ti; ж – 0,018 % Ti; з – 0,023 % Ti; и – 0,024 % Ti

Металлографический анализ структуры слитков показал, что при увеличении количества вводимого титана наблюдается уменьшение средней площади сечения зерна (рис. 1.3).

Установлено, что при введении титана в количестве от 0,002 до 0,024 % средняя площадь сечения зерна уменьшается с 6,5 до 1,3 .

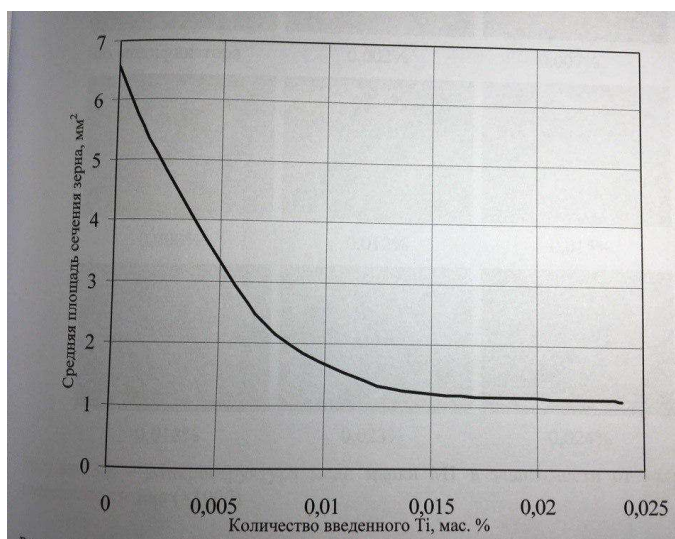
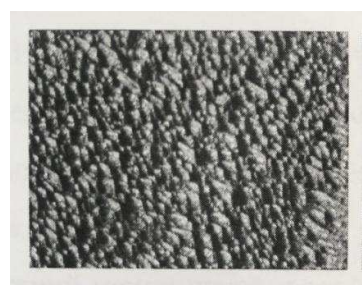


Рисунок 1.3– Зависимость средней площади сечения зерна литой меди от количества введенного титана.

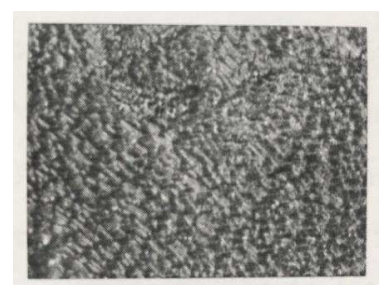
Кроме того, изучали микроструктуру слитков меди, модифицированной титаном (рис. 1.4).



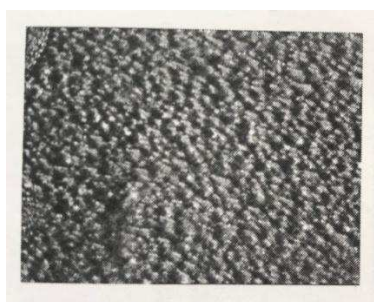
a



б



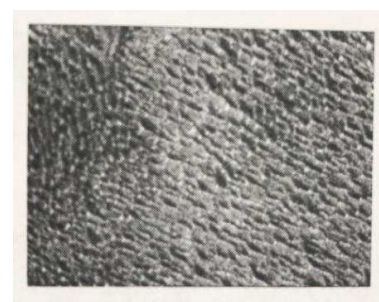
в



г



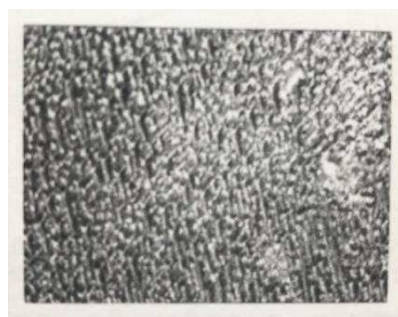
д



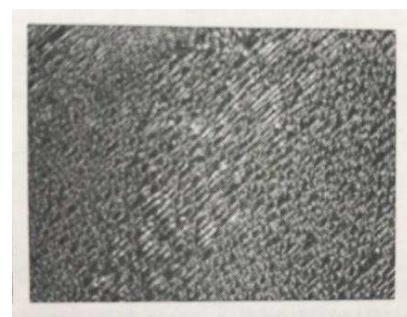
e



ж



з



и

Рисунок 1.4 – Микроструктура меди марки М1 в зависимости от количества введенного титана (x1000): а – без модификатора; б – 0,002 % Ti; в – 0,007 % Ti; г – 0,008 % Ti; д – 0,012 % Ti; е – 0,015 % Ti; ж – 0,018 % Ti; з – 0,023 % Ti; и – 0,024 % Ti

Была построена зависимость размера дендритной ячейки меди от количества введенного титана (рис.1.5). Результаты анализа свидетельствуют о том, что при введении титана наблюдается уменьшение размера дендритной ячейки меди. Так, в структуре образца меди без введения модификатора размер дендритной ячейки составляет 3 мкм, а при введении титана в расплав меди в количестве 0,024 % размер дендритной ячейки уменьшается до 2 мкм.

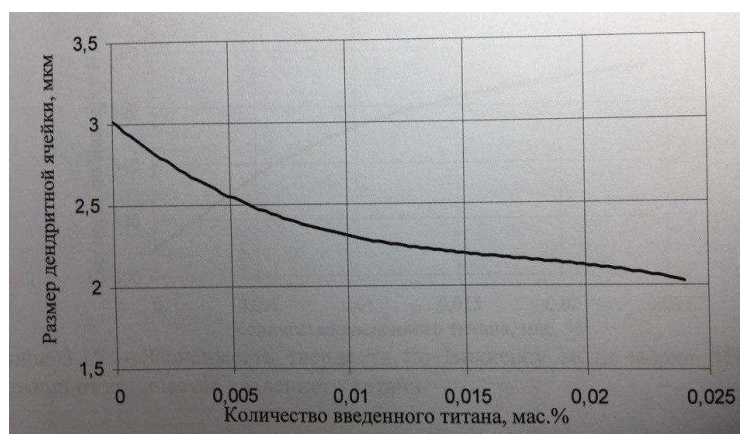


Рисунок 1.5 – Зависимость размера дендритной ячейки меди марки М1 от количества введенного титана

Наряду с металлографическим анализом макро- и микроструктуры образцов определялись механические свойства меди марки М1 с различным количеством введенного титана в литом состоянии: временное сопротивление разрушению при растяжении, относительное удлинение и твердость по Викерсу. Результаты испытаний механических свойств образцов приведены на рисунках 1.6,1.7.

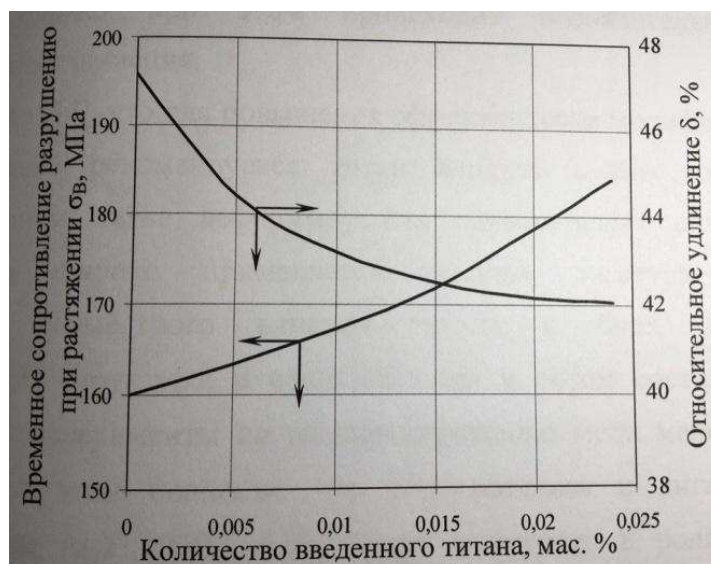


Рисунок 1.6 – Зависимость временного сопротивления разрушению при растяжении и относительного удлинения меди марки М1 в литом состоянии от количества введенного титана

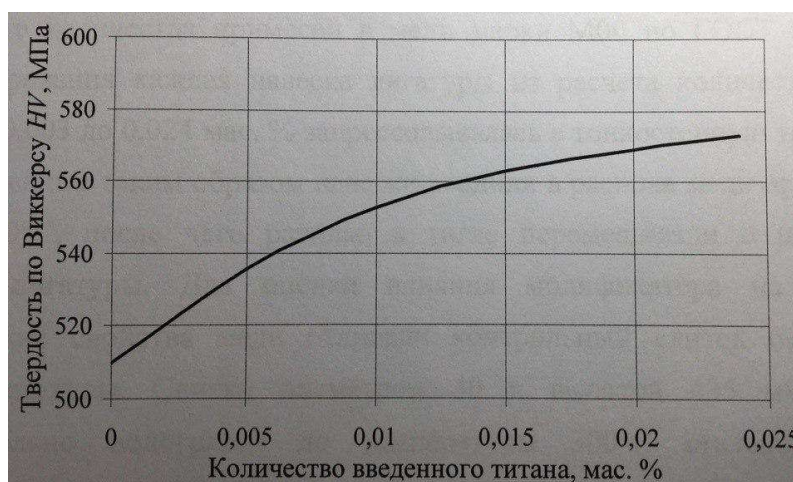


Рисунок 1.7 – Зависимость твердости по Виккерсу меди марки М1 в литом состоянии от количества введенного титана

Результаты анализа полученных данных показали, что с увеличением количества вводимого в медь титана наблюдается повышение временного сопротивления разрушению при растяжении и твердости по Виккерсу. При увеличении количества вводимого титана до 0,024 % временное сопротивление разрушению при растяжении повышается со 160 до 184 МПа, а твердость HV с 510 до 570 МПа. С увеличением количества вводимого титана относительное удлинение меди уменьшается с 47 до 42 %. Повышение значений и HV , по всей вероятности, объясняется микролегированием меди титаном и

измельчением ее структуры, однако при этом происходит незначительное уменьшение относительного удлинения.

1.2.2. Модификаторы II рода

Модификаторы 2-го рода – поверхностно-активные вещества [6, 7] – адсорбируются на зародышах, возникающих на центрах кристаллизации, и тормозят их рост. В результате этого появляется большое количество новых зародышей, рост которых становится возможным из-за уменьшения концентрации модификатора на их поверхности [8].

Модификаторы 2-го рода являются растворимыми [7, 9, 3]. Данный вид модификаторов получил наибольшее применение. К таким модификаторам относят примеси, неограниченно растворимые в жидкой фазе и мало растворимые в твердой фазе (0,001 – 0,1%). Данные примеси можно разделить на: не изменяющие поверхностные свойства кристаллизующейся фазы (а) [7] и меняющие поверхностное натяжение на границе расплав – кристалл (б) [7, 3].

Примеси типа а могут тормозить рост твердой фазы только за счет концентрационного барьера на границе кристалл – расплав [7, 9, 3]. При этом не происходит изменение поверхностного натяжения на границе расплав – кристалл [6, 10] и концентрирующиеся по этой причине на поверхности кристаллов (дендритов), добавки, называют поверхностно – активными [6, 9, 10].

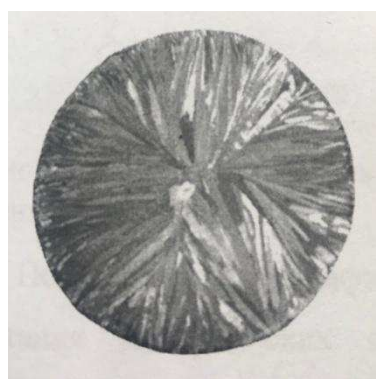
Поверхностно – активные вещества способны создавать сплошной адсорбционный слой [8-11], что значит при практическом отсутствии растворимости поверхностно – активного модификатора в твердой фазе [7, 8], вокруг нее формируется оболочка жидкой фазы, обогащенная элементами модификатора. При этом вязкость расплава оболочки существенно возрастает, что снижает скорость диффузии атомов к зародышу [7, 11, 3].

Действие добавок типа б основано на уменьшении величины поверхностного натяжения на границе расплав – кристалл [7]. Такие добавки называют поверхностно – активными к кристаллизующейся фазе [7, 3]. Они снижают интервал метастабильности, т.е. минимального переохлаждения, превышение которого обеспечивает возникновение центров кристаллизации [9, 8, 3].

Рассмотрим действие модификатора 2 рода на примере магния.

С целью исследования влияния магния на структуру и механические свойства меди авторы работы [13] проводили лабораторные эксперименты по введению магния в расплав меди марки М1. Магний вводили из расчета 0,002...0,01 % о массы расплава меди. Для ввода в расплав магний запрессовывался в тонкостенные медные трубки. Подготовленные таким образом навески магния вводили в тигель с расплавом меди при температуре 1160...1180 °С, после чего расплав в тигле перемешивали в течение 30...40 с для полного усвоения магния. Далее расплав меди заливали в предварительно подогретую до 300 °С изложницу из стали для получения слитка диаметром 40 мм и длиной 135 мм. Кроме того, отливали контрольный слиток без введения магния в расплав меди.

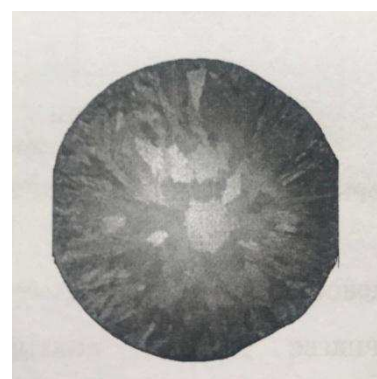
Полученные слитки разрезались на образцы для испытания механических свойств и металлографического анализа структуры. Макроструктура слитков меди в зависимости от количества введенного магния и результаты металлографического анализа структуры представлены на рисунках 1.8 , 1.9. Поскольку в структуре слитков меди присутствуют зерна различной формы, за параметр, характеризующий размер зерна, приняли среднюю площадь сечения зерна.



a



б



в

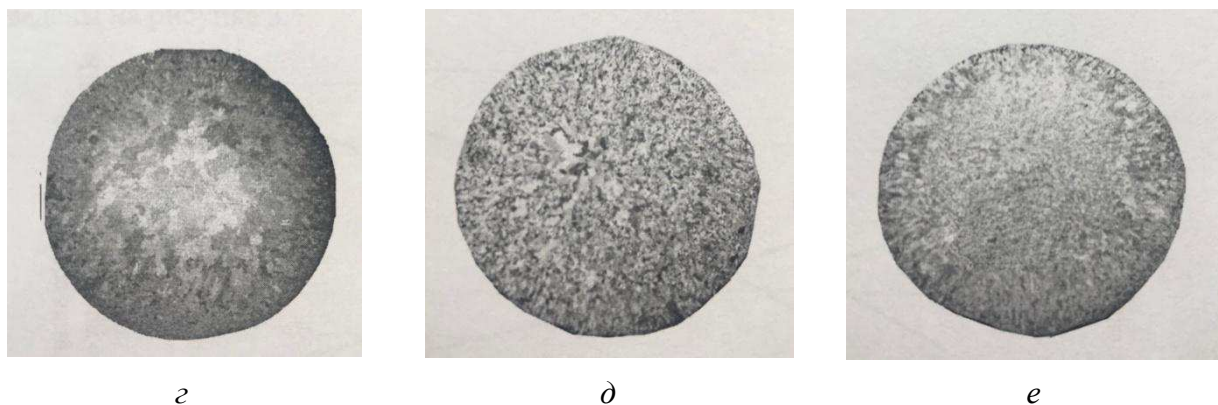


Рисунок 1.8 – Макроструктура слитков меди в зависимости от количества введенного магния: *a* – без модификатора; *b* – 0,002 % Mg; *c* – 0,004 % Mg; *d* – 0,006 % Mg; *e* – 0,008 % Mg; *e* – 0,01 % Mg

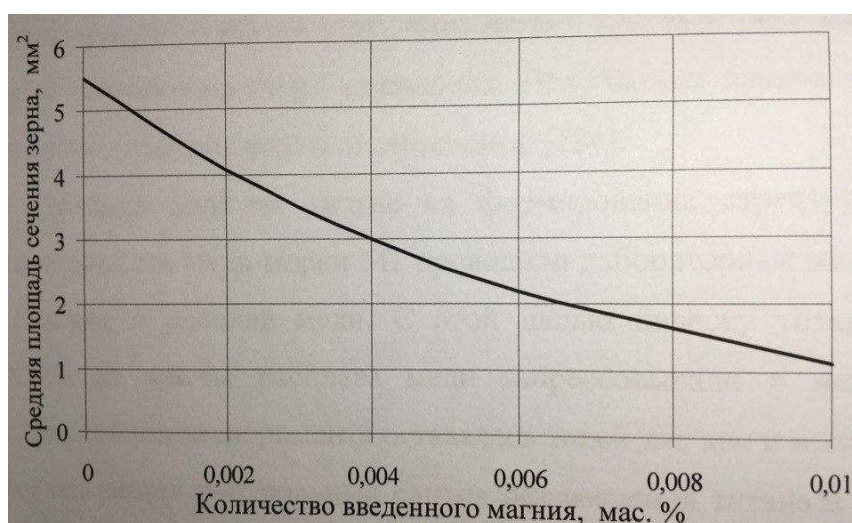


Рисунок 1.9 – зависимость средней площади сечения зерна от количества введенного магния

Анализ полученных данных показал, что с увеличением количества введенного магния происходит уменьшение средней площади сечения зерна с 5,5 до 1,1 . Кроме того, в структуре слитков меди уменьшается доля столбчатых зерен и формируется преимущественно мелкая равноосная структура. При введении в медь магния в количестве 0,008...0,01 мас. % формируется однородная мелкокристаллическая структура.

Помимо металлографического анализа структуры слитков проведены испытания механических свойств образцов слитков меди с различным количеством введенного магния. Результаты испытания механических свойств приведены на рисунке 1.10.

Результаты механических свойств показали, что с увеличением количества вводимого магния происходит повышение значений временного сопротивления разрушению при растяжении со 163 до 175 МПа и снижение относительного удлинения с 45 до 40 %. По всей вероятности, это связано с измельчением кристаллической структуры меди и растворением магния в меди с образованием твердого раствора замещения. Полученные данные согласуются с результатами приведенных ранее исследований [12].

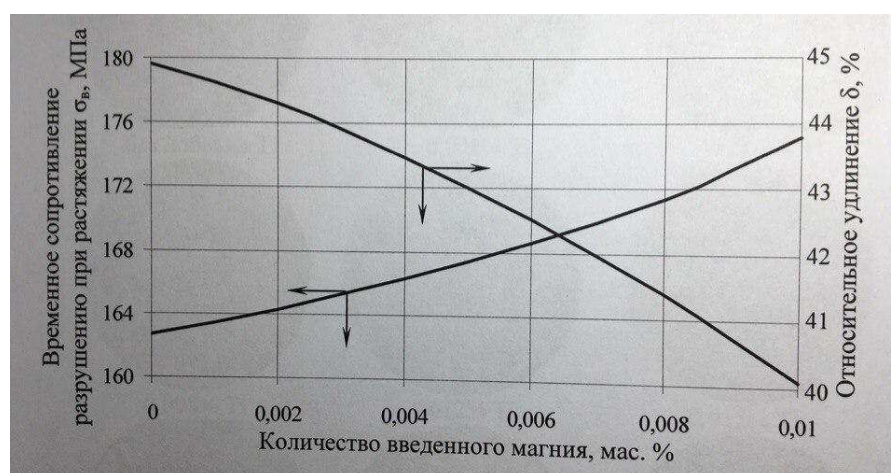
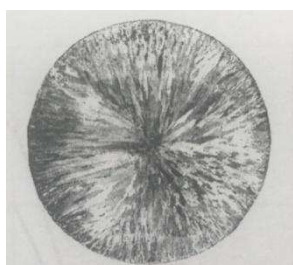


Рисунок 1.10 – Зависимость временного сопротивления разрушению при растяжении и относительного удлинения меди от количества введенного магния

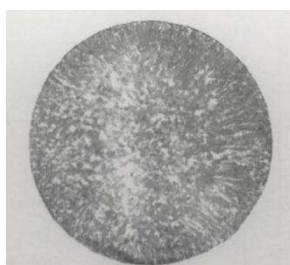
1.2.3. Микрелегирование активными добавками (РЗМ), улучшающих структуру сплава

Редкоземельные металлы отличаются сравнительно крупными размерами атомов, поэтому они не образуют больших областей растворимости с другими металлами в твердом состоянии. Между собой редкоземельные металлы неограниченно растворимы как в жидком, так и в твердом состоянии.

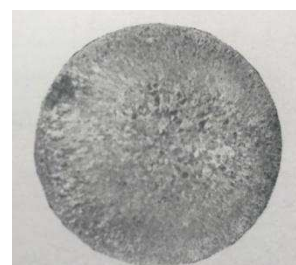
Для исследования влияния редкоземельных металлов на формирование структуры и свойств меди проводились эксперименты по модифицированию меди марки М00 и М1 миш-металлом [13]. Выплавка меди марки М1 осуществлялась в индукционной канальной печи ИЛК–1,6, а выплавка меди марки М00 – в шахтной газовой плавильной печи *ASAPCO*. Расплав меди перегревался до температуры 1120 °С, после чего в него вводился миш-металл, запрессованный в медную трубку, из расчета 0,0025...0,0125 % от массы расплава в разливочном тигле с последующим перемешиванием в течение 30...40 с. Расплав заливался в предварительно подогретую до температуры 250 °С стальную изложницу для получения слитков диаметром 50 мм и высотой 450 мм. Кроме того, для оценки модифицирующей способности мишметалла отливали контрольный слиток без введения модификатора в расплав. В ходе металлографического анализа структуры полученных слитков определяли среднюю площадь сечения зерна. Макроструктура слитков меди и зависимость средней площади сечения зерна от количества введенного миш-металла приведены на рисунках 1.11–1.13.



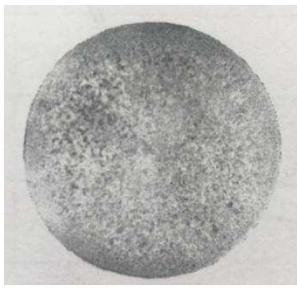
a



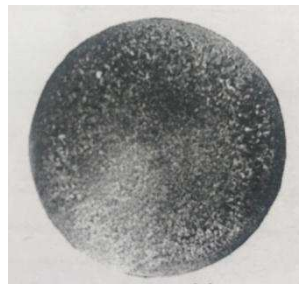
б



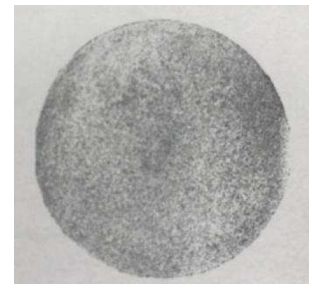
в



а



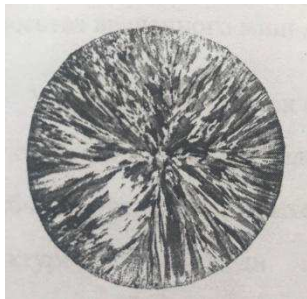
б



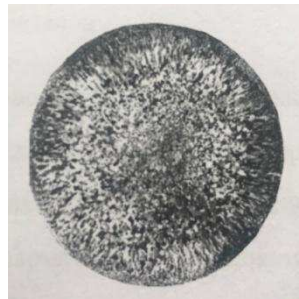
в

Рисунок 1.11 – Макроструктура слитков меди марки М00 в зависимости от количества введенного миш-металла (м.м.): а – без модификатора; б – 0,0025 % миш-металла;

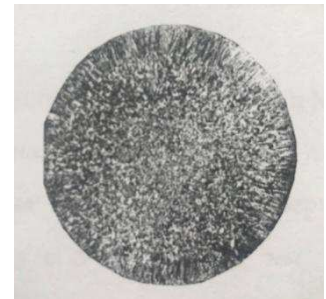
в – 0,005 % миш-металла; г – 0,0075 % миш-металла; д – 0,010 % миш-металла; е – 0,0125 % миш-металла



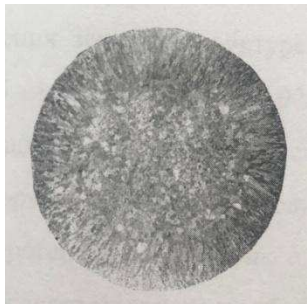
а



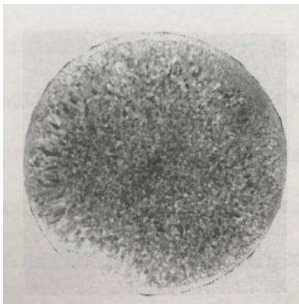
б



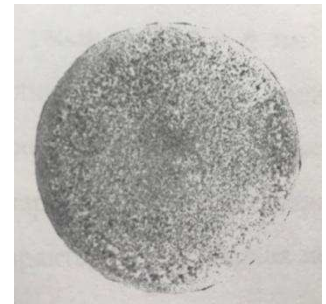
в



г



д



е

Рисунок 1.12 – Макроструктура слитков меди марки М1 в зависимости от количества введенного миш-металла: а – без модификатора; б – 0,0025 % миш-металла; в – 0,005 % миш-металла; г – 0,0075 % миш-металла; д – 0,010 % миш-металла; е – 0,0125 % миш-металла

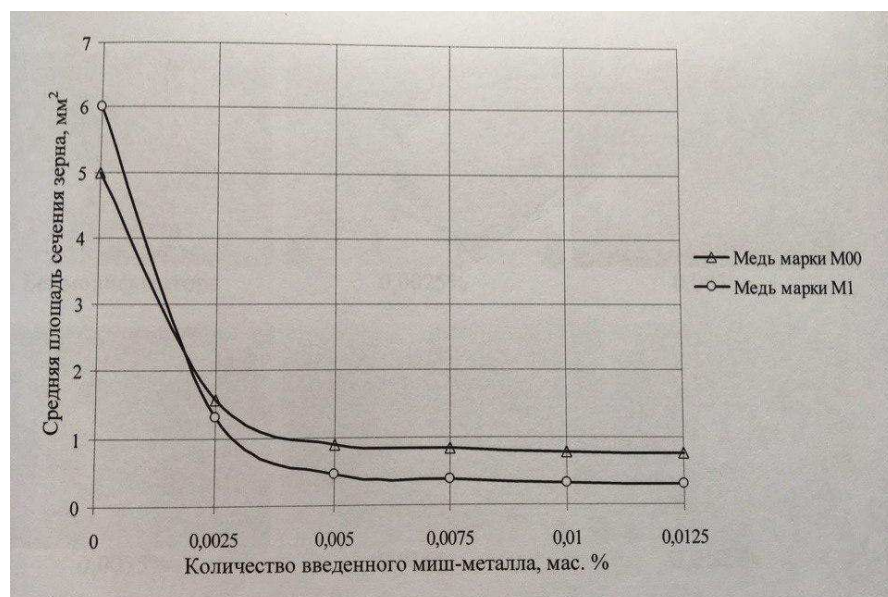


Рисунок 1.13 – Зависимость средней площади сечения зерна литой меди от количества введенного миш-металла

Установлено, что при вводе миш-металла в расплав меди марок М00 и М1 в структуре слитков преобладают равноосные зерна, а протяженность зоны столбчатых зерен незначительная. При этом средняя площадь сечения зерна в структуре слитков меди марки М00 уменьшается с 5 до 0,9 при добавлении 0,005 мас. % миш-металла и при дальнейшем увеличении количества вводимого модификатора она практически не изменяется. Средняя площадь сечения зерна в структуре слитков меди марки М1 уменьшается с 6 до 0,45 при введении 0,005 мас. % миш-металла. Отличие в значениях средней площади сечения зерна в структуре слитков меди марок М00 и М1 объясняется содержанием большего количества примесей в меди марки М1, способствующих гетерогенезации расплава и позволяющих изменить характер затвердевания меди с последовательного на объемный.

Кроме изучения структуры полученных слитков, в работе [13] изучалось влияние миш-металла на механические свойства меди: временное сопротивление разрушению при растяжении, относительное удлинение и твердость по Бринеллю (Рис. 1.14–1.16). Анализ результатов определения

механических свойств образцов меди марок М00 и М1 показал, что с увеличением количества вводимого миш-металла происходит рост временного сопротивления разрушению при растяжении, относительного удлинения и твердости по Бринеллю. Причем наиболее интенсивное увеличение значений механических свойств меди происходит при добавлении до 0,0075 мас. % миш-металла. Последующее увеличение количества вводимого миш-металла не приводит к значительному росту уровня механических свойств меди.

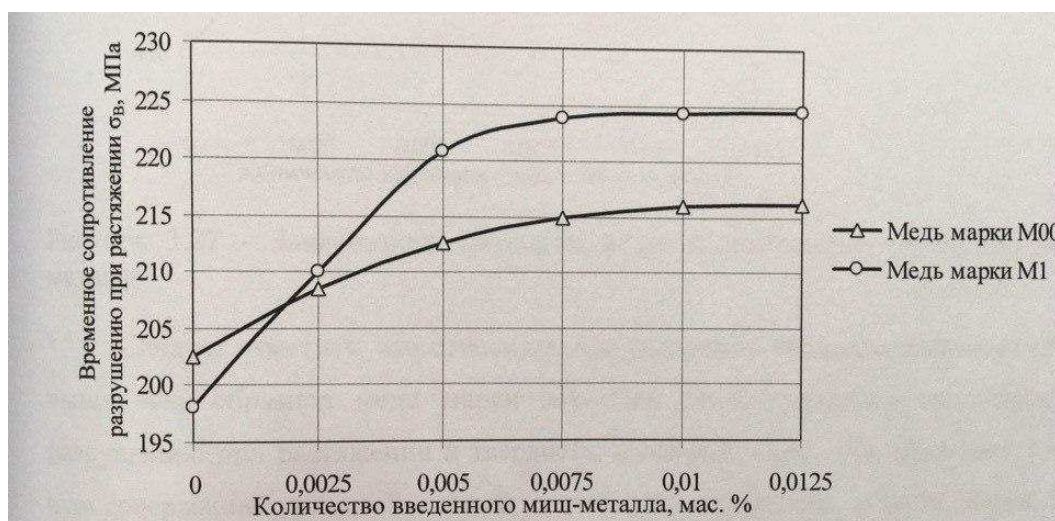


Рисунок 1.14 – Зависимость временного сопротивления разрушению при растяжении меди от количества введенного миш-металла

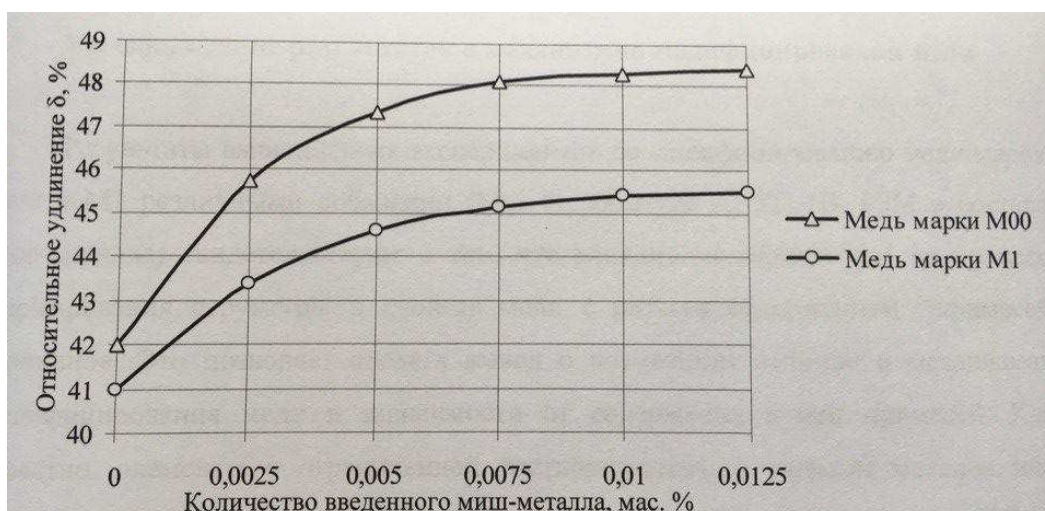


Рисунок 1.15 – Зависимость относительного удлинения меди от количества введенного миш-металла

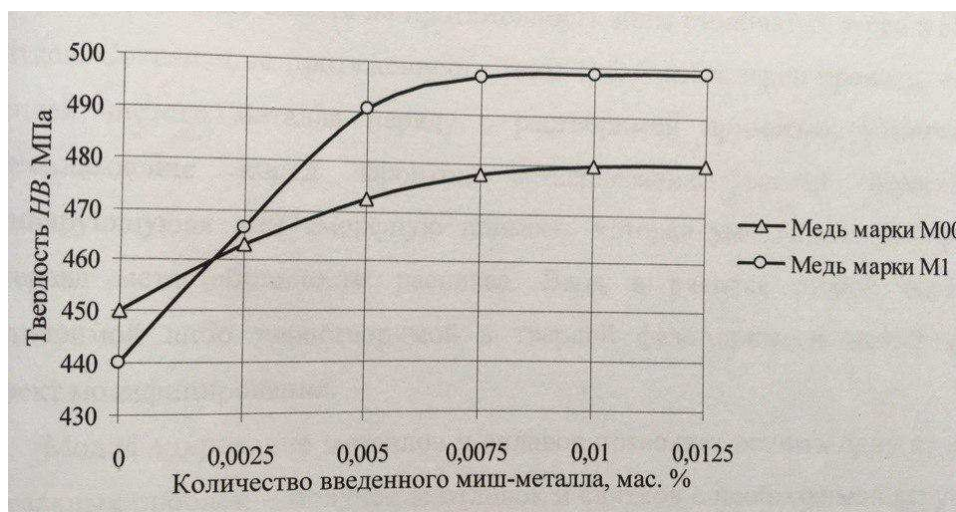


Рисунок 1.16 – Зависимость твердости меди от количества введенного мыш-металла

Следует отметить, что относительное удлинение образцов меди марки М00 выше, чем образцов меди марки М1. При этом временное сопротивление разрушению при растяжении и твердость, наоборот, ниже. Это объясняется тем, что содержание примесей в меди марки М00 ниже, чем в меди марки М1. Результаты испытания механических свойств полностью согласуются с результатами металлографического анализа структуры меди марок М00 и М1 в литом состоянии.

1.3. Недостатки известных модификаторов и негативное влияние примесей

Медь является уникальным электро- и теплопроводящим металлом и уступает по этим характеристикам только серебру. Поэтому подбирая модификаторы, нужно обратить внимание как они влияют на эти показатели.

Так, например, титан - плохой проводник электричества. Если электропроводность меди считать равной 100%, то электропроводность титана составит 3,1% [14]. Отсюда следует, что титан нельзя применять в тех случаях, когда проводимость является фактором первостепенной важности.

Также Электропроводность магния составляет 38,6% от электропроводности меди. [14]

Также большое негативное влияние оказывают примеси, такие как сера, кислород и водород. Растворимость кислорода в меди мала, весь содержащийся в меди кислород находится в виде обособленных твердых и хрупких частиц Cu_2O , образующийся оксид меди формирует эвтектику ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зернограничные выделения которой снижают пластичность и деформируемость металла. Частицы Cu_2O склонны к образованию скоплений, которые приводят к разрушению меди при обработке давлением как в горячем, так и в холодном состоянии.

Сера образует с медью хрупкое соединение Cu_2S , которое практически не растворяется в твердой меди. Наличие хрупкого соединения, которое выделяется по границам зерен в составе эвтектики $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{S}$ практически при любой концентрации серы, снижает пластичность меди и затрудняет горячую и холодную обработку давлением.

Водород является крайне вредным элементом, его повышенное содержание вызывает так называемую "водородную болезнь". Водород реагирует с оксидами, содержащимися в меди, с образованием водяного пара ($\text{Cu}_2\text{O}+\text{H}_2=\text{H}_2\text{O}+2\text{Cu}$). Под давлением паров воды внутри металла возникают микротрещины, а на поверхности – пузыри от вздутия металла. [15]

Таким образом, все примеси в той или иной степени ухудшают свойства меди. Даже те примеси, которые не ухудшают технологическую пластичность и прочность меди, заметно снижают показатели физических свойств. Большинство примесей ухудшают весь комплекс свойств и в первую очередь характеристики электро- и теплопроводности.

Выводы

1 Важным показателем отвечающим за качество литой заготовки, и определяющим её способность к пластической деформации, является однородность механических свойств по сечению заготовки, однако столбчатая структура меди этому не способствует из-за анизотропии свойств.

2 Установлено, что наиболее действенным способом управления структурой является процесс модифицирования расплава.

3 Проанализировано, что существуют модификаторы, которые улучшают структуру меди, но снижают ее электропроводность и не устраняют действия вредных примесей.

Цель работы: Исследовать влияние модификаторов и микролегирующих добавок на структуру меди и композиционных сплавов на ее основе.

Задачи работы:

1 на основе литературных источников и анализа механизма модифицирования выбрать модификатор для улучшения структуры меди и микролегирующую добавку для рафинирования границ зерен от кислорода и серы;

2 экспериментально исследовать совместное влияния модифицирующей и микролегирующей добавок, на формирование структуры и свойств меди, и композиционных сплавов на ее основе.

2 Оборудование и методика проведения исследований

2.1 Оборудование для плавки и литья экспериментальных образцов из меди

Печь «Таммана» для лабораторных испытаний материалов.

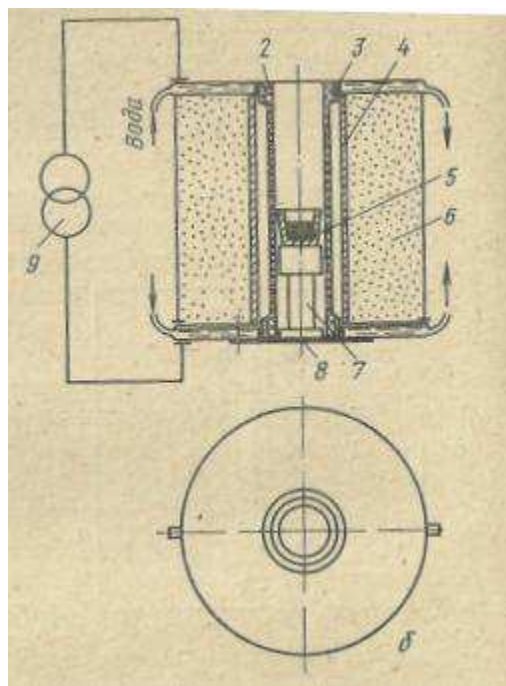
Технические характеристики печи «Таммана»:

- Максимальная рабочая температура 2000 °С;
- Масса исследуемых материалов до 400 г;
- Возможность продувки инертными газами.

Печь Таммана (рис. 2.1) в связи с простотой конструкции и возможностью плавного регулирования температуры в большом диапазоне температур (до 2000° С) широко используется в лабораториях [16].



а



б

Рисунок 2.1 – Печь Таммана: *а* – общий вид; *б* – схема печи: 2 – графитовая нагревательная трубка, 3 – контактные полукольца, 4 – экран, 5 – тигель с металлом, 6 – теплоизоляционная засыпка, 7 – графитовая подставка, 8 – нижняя крышка, 9 – трансформатор.

Литье в кокиль – это технологический процесс изготовления отливок путем заливания металлического расплава в многооборотные формы, выполненные из стали. Эту форму называют кокиль (рис 2.2).

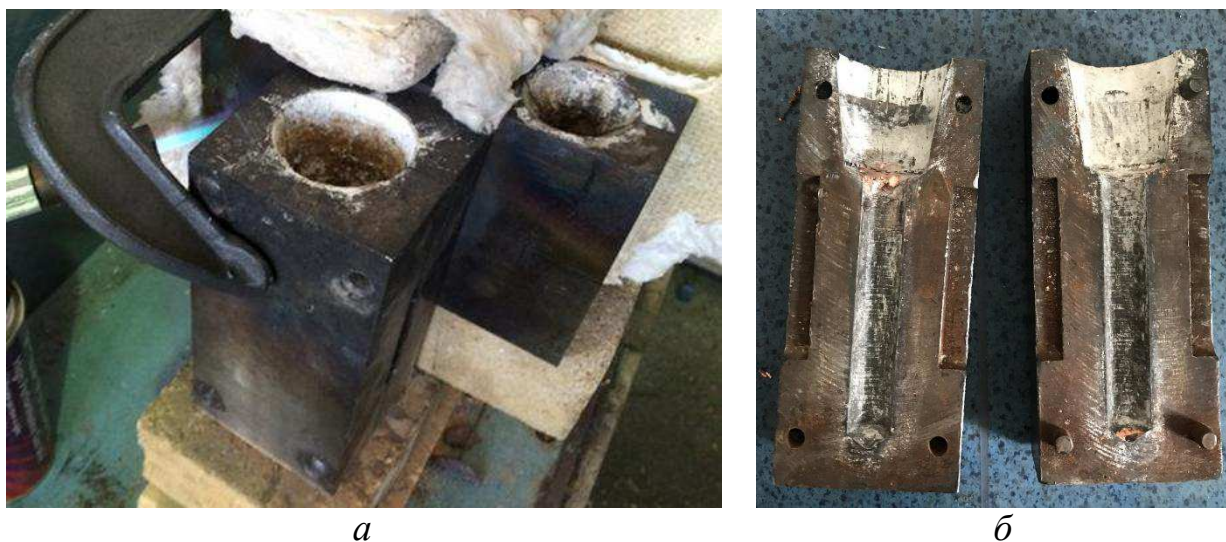


Рисунок 2.2 – Кокиль: *a* – общий вид, *б* – кокиль в разъёме

Перед началом литья в кокиль металлического расплава необходимо выполнить операции технологического процесса по подготовке его к работе. Эта работа выполняется в несколько этапов.

1 Поверхности кокиля и место стыков полуформ необходимо очистить от загрязнений, коррозии, масел.

2 Выполняют проверку подвижности перемещающихся деталей, точность их установки и надежность крепления на местах для этого предназначенных.

3 На этом этапе поверхности формы смазывают огнестойкими материалами. В этом качестве применяют специальные краски и смазки (например, смазки на основе оксида кальция или корунд).

Кокиль для литья – это многооборотная форма, изготавливаемая из стали. Несмотря на то что в такие формы могут использовать для получения отливок разных форм, их принципиальная конструкция одинакова. В состав

кокиля для литья входят полуформы, плита, различные вставки и литейные стержни. С помощью последних, происходит формирование отливки. Для его центрирования и соединения применяют штыри. Непосредственно перед началом заливки полуформы фиксируют с помощью специальных струбцин. Металлический расплав подают в форму через систему литников.

На рисунке 2.3. изображены полученные образцы после литья в кокиль.



Рисунок 2.3 – полученные образцы после литья в кокиле

На ряду с водоохлаждаемым кокилем, в котором скорость охлаждения составляет 100°C в секунду, существует и неводоохлаждаемый, скорость охлаждения в котором составляет 10°C в секунду [16].

2.2 Оборудование для металлографического анализа образцов, исследования твердости и механических свойств

2.2.1 Металлографический анализ

Съемку микроструктуры производили на немецком микроскопе AXIO Observer 40 MAT, при увеличении x100 и x500 крат (рис 2.5), который позволяет визуально исследовать шлифы, сфотографировать и выводить на экран монитора с помощью программы AxioVision 40 MAT.

Микроскоп Axio Observer 40 MAT используется для проведения рутинных работ в заводских и небольших исследовательских лабораториях. Этот прибор с качественной широкопольной оптикой позволяет применять все доступные методы контрастирования и оснащается на заказ осветителями различного типа и мощности. Наличие фото/видео – выхода обеспечивает возможность документирования изображения с помощью цифровых камер и дальнейшую обработку изображения с помощью программ анализа изображений. Прибор позволяет наблюдать на экране монитора изображение с микроскопа, фиксировать его через принтер. Кроме того компьютерные программы позволяют фотографировать, запоминать и производить расчет количества и размеров структурных составляющих [18].



Рисунок 2.5 – Микроскоп Axio Observer 40 MAT

2.2.2 Методика определения микротвердости

Микротвердость измеряли на образцах для металлографического анализа на приборе DM8, устройство которого представлено на рисунке 2.6 [19]. Метод микротвердости предназначен для определения микротвердости тонких и маленьких металлических образцов, а также хрупких материалов (ГОСТ 9450-76); в качестве индентора при измерении микротвердости использовали правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине . На каждую точку образца делали по 7-10 замеров при нагрузке 200 кгс при увеличении $\times 400$.

Измеренные значения микротвердости были обработаны на ЭВМ по программе Excel.

С помощью микроскопа 8, прибор позволяет выбрать участок, на котором необходимо измерить твердость.

Прибор автоматический с электронным плато. Главное его назначение в исследовательских работах – оценка твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов, а так же разницы в твердости разных участков этих составляющих.

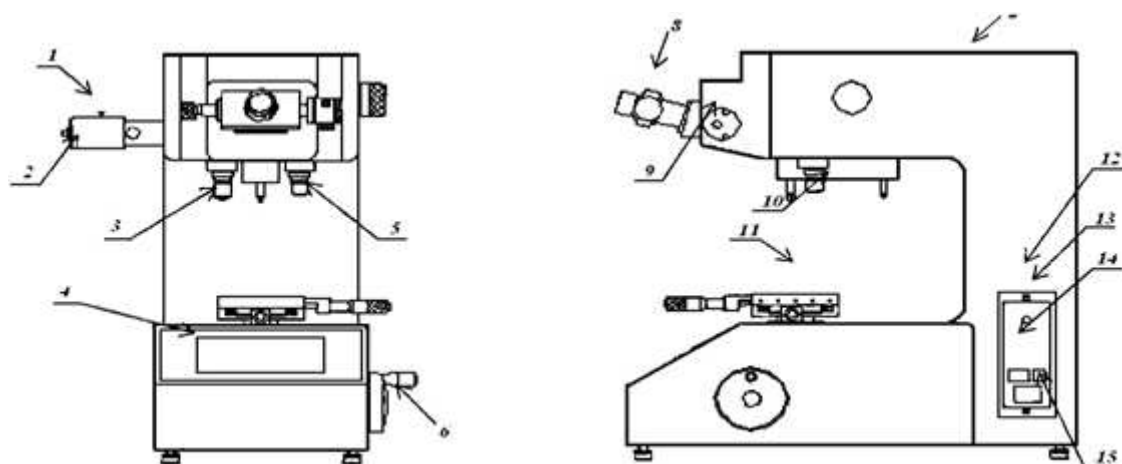


Рисунок 2.6 – Микротвердомер DM8: 1 – регулировочный болт; 2 – корпус лампы; 3 – линза А ($\times 40$); 4 – панель управления; 5 – линза D ($\times 10$); 6 – рукоятка перемещения столика; 7 – верхняя крышка;

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

Поворотом револьверного устройства 10 устанавливается линза 3, 5, либо индентор. Выбор нагрузки осуществляется поворотом рукоятки выбора нагрузки 9. Выбор метода и запуск измерения осуществляется с помощью сенсорной панели управления 4.

2.2.3 Методика измерения твердости

Твердость исследуемых образцов оценивали методом измерения по Виккерсу (ГОСТ 9012-59) на универсальном твердомере EMCQ-TEST M4 G3 вдавливанием пирамидки при нагрузке 62,5 кгс (рис 2.7) [20].

Твердомеры представляют собой стационарные средства измерений, состоящие из устройства приложения нагрузки и измерительного блока.

Твердомеры укомплектованы видеокамерой высокого разрешения, светодиодной подсветкой, автоматической фокусировкой и программным обеспечением автоматического измерения длины диагоналей восстановленного отпечатка.

Принцип действия твердомеров основан на статическом вдавливании наконечника – алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка и пересчетом значения длин диагоналей в значения твердости по Виккерсу (HV);

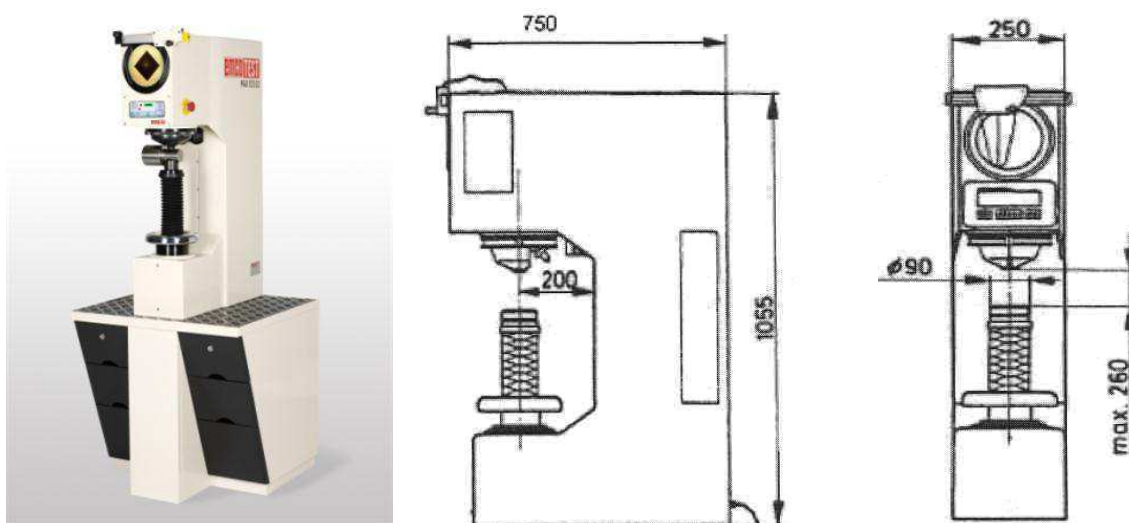


Рисунок 2.7 – Универсальный твердомер EMCQ-TEST M4 G3

Измерение твердости по Виккерсу HV выполняется в следующей последовательности:

- Образец или деталь устанавливается на стол прибора измеряемой поверхностью вверх. После этого стол вращением рукоятки маховика поднимают вверх, до лёгкого соприкосновения с индентором;

- Отпускают рычаг, приводя тем самым в движение нагружающий механизм. После установленной с помощью реле времени продолжительности измерения нагрузка снимается и рабочая головка, с закреплённым в ней индентором, возвращается в исходное положение;

- После этого можно развернуть приборный стол с образцом к имеющемуся на станине твердомера отсчётному микроскопу, и замерить диагонали отпечатка.

2.2.4 Испытание на растяжение

Физико-механические свойства (временное сопротивление разрыву, относительное удлинение) определяли по результатам испытаний на электромеханической испытательной машине серии LFM, которая оснащена устройством измерения изменения длины, которое имеет задание измерять удлинение образца во время испытания на растяжение (рис 2.8) [20].

При растяжении образца автоматически записывается зависимость осевой растягивающей нагрузки P (силы сопротивления образца деформации) от абсолютного удлинение Δl .

Измерение удлинения происходит с незначительным зажимным усилием. Измерительный датчик (в дальнейшем обозначенный как MFL) считывает удлинение образца с помощью тензометрических датчиков, расположенных в измерительных щупах. При этом к образцу подводятся две пары измерительных щупов. Если затем образец удлиняется, то встроенные тензометрические датчики регистрируют каждое изменение положения головок щупов (измерительных ножей).

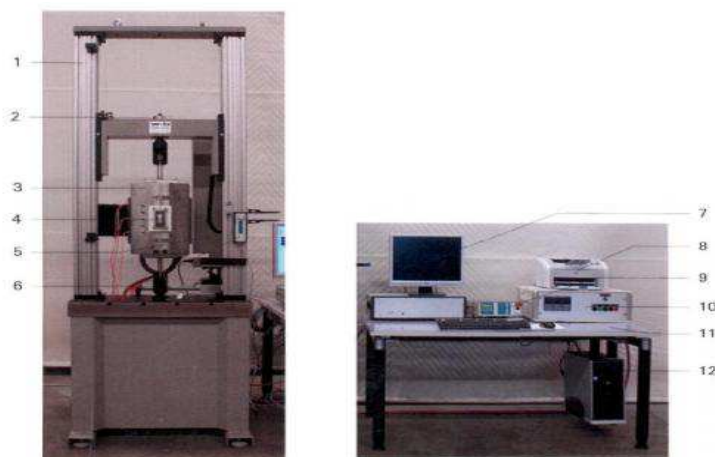


Рисунок 2.8 - Универсальная разрывная машина LFM: 1 - разрывная машина; 2 – подъемный механизм; 3 – печь STE –12Н/7000 С; 4 - экстензометр EXN 30.6; 5 – автоматический экстензометр MFL 300; 6 -нижнее зажимное устройство; 7 – монитор; 8 – принтер; 9 – регулирующая система EDS 120; 10 – контрольное устройство; 11 – компьютерный стол; 12 – процессор

3 Результаты опытов и их обсуждения

3.1 Влияние кислорода на структуру жидкой и твердой меди марки М1

Следуя из главы 2, плавка меди проводится в печи сопротивления – в печи Таммана. В процессе плавления расплав взаимодействует с атмосферой и соответственно окисляется. Кроме того, в процессе затвердевания в системе $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ образуется эвтектика (рис 3.1). В меди при температуре, соответствующей эвтектике (1065°C), максимальная растворимость кислорода составляет 0,39%. Но с повышением температуры растворимость кислорода увеличивается и выше температуры 1200°C образуется область расслоения 2-х жидких фаз. Вначале выпадает твердая фаза – Cu_2O , а затем (выше ее температуры плавления) – расплавленная оксидная фаза, насыщенная медью.

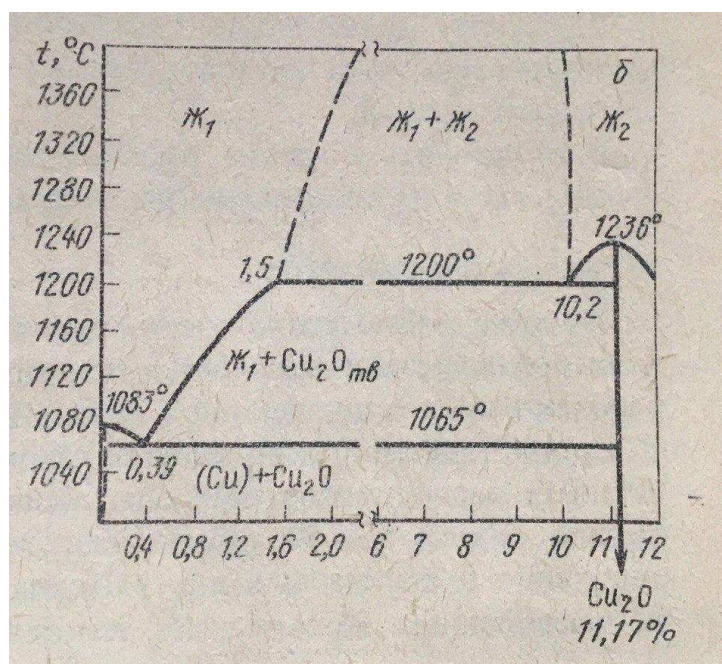


Рисунок 3.1 – Диаграмма состояния $\text{Cu}-\text{O}$

Присутствие растворенного кислорода отрицательно влияет на свойства отвердевшего металла. Неблагоприятное влияние связано с тем, что с понижением температуры и в процессе затвердевания резко уменьшается растворимость кислорода в металле, сопровождающаяся выделением из него

избыточной оксидной фазы, которая выявляется в твердом металле в виде оксидных неметаллических включений. Кислород в виде включений снижает качество твердого металла, понижает его механические свойства и способность к пластической деформации. [20]

3.2 Выбор модификатора

Известно, что резко негативное влияние на электропроводность меди, оказывают примеси, образующие в металле твердые растворы. Поэтому, выбираемые модификаторы должны обладать низкой растворимостью в твердом металле или сплаве и ограниченной – в жидком. Значит, они должны иметь большие молярные объемы, в сравнении с медью и сравнительно крупные размеры атомов. И быть поверхностно-активными, то есть понижать поверхностное натяжение расплава меди на границе с газовой фазой и межфазное натяжение на границе расплав-кристалл. Также желательной характеристикой является плотность, она должна быть близка к плотности меди. Исходя из приведенных характеристик для модификаторов и микролегирующих добавок, положительно влияющих на структуру и свойства литой меди, были подобраны поверхностно-активные вещества. Их свойства указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Свойства металлов, использованных при выборе модификаторов и микролегирующих добавок

Элемент	Температура плавления, $T_{пл}$, °C	Плотность, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Атомный радиус, Å	Молярный объем, $V \cdot 10^6$, м ³ /моль	Поверхностное натяжение σ , мДж/м ²	Растворимость в твердом металле, C_s , ат.%
Cu	1083	8,04	1,28	7,90	1320	-
Y	1502	4,39	1,80	20,26	870	0,001
La	920	5,98	1,87	23,23	701	0,001
Ce	797	6,69	1,82	20,91	735	0,001
Cd	321	7,987	1,52	14,07	627	0,26 при 300 °C

Из таблицы 3.1 следует, что редкоземельные (Y,La, Ce) и переходный (Cd) металлы не оказывают существенного влияния на электропроводность и теплопроводность меди, так как имеют сравнительно крупные размеры атомов, а значит практически не растворимы в ней.

Редкоземельные металлы, добавляемые в медь в количестве до 0,1 мас.%, уменьшают размер зерна в структуре меди, способствуют повышению

ее прочности и пластичности [21,22]. В виду низкой температуры плавления кадмия его вводят в расплав в виде модифицирующей лигатуры системы Cu-Cd с содержанием кадмия 0,9-1,2 мас.%, температура плавления которой 1040 °С. Медь, модифицированная кадмием, почти не отличается от электропроводности чистой меди, но заметно превосходит ее по прочности и твердости [23].

Поэтому, в данной работе для улучшения структуры меди применили комплексную добавку, состоящую из двух поверхностно-активных веществ (Cd и РЗМ). Рассмотрим роль каждого из них.

Исходя из классической теорией кристаллизации, чем меньше поверхностное натяжение расплава на границе с газом и, следовательно, на границе расплав – кристалл, тем меньше работа образования зародышей и их критический размер. Из таблицы 3.1 видно, что кадмий имеет наименьшую величину поверхностного натяжения σ , значит, высокую модифицирующую способность, как модификатор второго рода. Поверхностно-активные O_2 и S оказывают отрицательное влияние на процесс кристаллизации меди и дисперсно-упрочненных сплавов на ее основе. Введение РЗМ в медь, имеющих более высокую по сравнению с кадмием химическую активность к кислороду и сере, приводит к дополнительному рафинированию ее от вредных примесей и полностью нейтрализует их отрицательное влияние на процесс кристаллизации. Образовавшиеся в результате реакций тугоплавкие термически устойчивые оксиды и сульфиды остаются в расплаве как включения с более благоприятными формой и размерами, способствуя повышению ее прочности и пластичности.

3.3 Влияние редкоземельных металлов на чистую медь марки М1

Положительный эффект на уменьшения зоны столбчатых кристаллов и получения более мелкозернистой структуры меди, оказывают следующие факторы: перегрев расплава, его модифицирование редкоземельными металлами и увеличение скорости охлаждения в металлической форме [24]. Это проверено при получении литых образцов меди марки М1.

Установлено, что перегрев расплава до 1320 °С с последующим модифицированием мишметаллом марки МЦ50ЖЗ и заливкой в стальной кокиль способствуют переходу от столбчатой структуры к округлой зеренной структуре, а при заливке расплава в водоохлаждаемый стальной кокиль наблюдается измельчение кристаллической структуры (рис. 3.2). При этом средний размер зерна уменьшается от 0,55 до 0,25-0,30 мм.

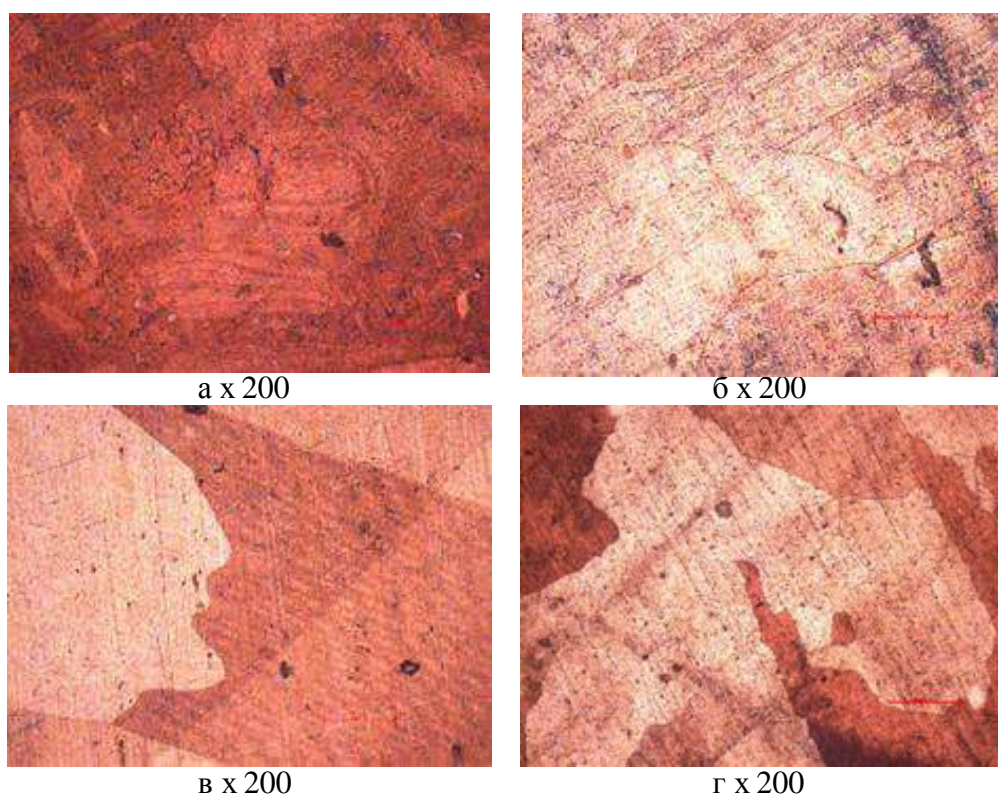


Рисунок 3.2 – Микроструктура образцов меди марки М1 в зависимости от количества введенного модификатора (а, б, в) и скорости охлаждения (в, г): а – без модификатора; б – 0,03 % модификатора; в – 0,1 % модификатора; г – 0,1 % модификатора (водоохлаждаемый кокиль)

3.4 Влияние комплексной добавки на дисперсно-упрочненную медь

3.4.1. Без применения модификатора

Целью улучшение структуры и свойств меди является получение электродов контактной сварки. Электроды контактной сварки должны обладать высокой электропроводностью и высокими прочностными характеристиками. На кафедре МиТОМ, на которой я обучаюсь, занимаются повышением прочностных характеристик меди, путем ее дисперсного упрочнения. Поэтому влияние выбранных добавок рассмотрим на дисперсно-упрочненной меди, для комплексного оценивания.

В первой серии опытов дисперсно-упрочненный сплав системы Cu-CrV₂ выплавляли при 1250-1260 °С без применения модификаторов. Макро- и микроструктура образцов, изготовленных в водоохлаждаемом стальном кокиле, приведена на рисунке 3.3. Структура образцов характеризуется столбчатым строением, большой протяженностью границ между структурными зонами и обладает анизотропией свойств, о чем свидетельствуют неравномерные значения твердости по сечению образца (таблица 3.2).

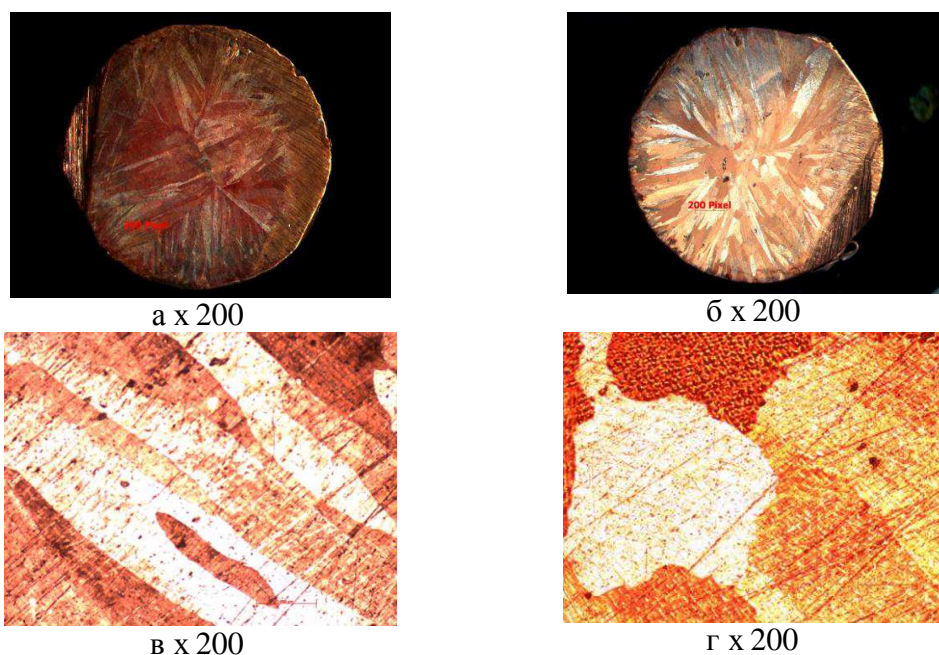


Рисунок 3.3 – Макроструктура (а, б) и микроструктура (в, г) образцов дисперсно-упрочненной меди, полученных в водоохлаждаемом стальном кокиле: а, в (сплав 2); б, г (сплав 3).

Таблица 3.2 – Значения микротвердости в структурных зонах образцов из дисперсно-упрочненных сплавов

Маркировка образца и состав сплава	микротвердость HV							Среднее значение микротвердости
2. Cu-0,3 CrB ₂	70,1	69,6	69,3	63,4	68,8	77,9	68,5	69,6
3. Cu-0,5 CrB ₂	69,4	72,8	71,8	72,8	69,6	71,5	73,8	71,6
4. Cu-1,0 CrB ₂	74,2	71,5	72,2	67,3	67,3	66,6	90,0	72,7

Измерение твердости проводили в 7 точках во всех структурных зонах при нагрузке 200 кгс. Среднее значение твердости исследуемых образцов находится в пределах 69,6-72,7 HV, что в 1,9 раза выше твердости литой меди без армирующих добавок.

3.4.2 Комплексное применение РЗМ и Кадмия

Известно, что перегрев расплава, повышает его окисление. Поэтому проводим модифицирование расплава поверхностно-активным кадмием, который снижает температуру перехода расплава меди из микрогетерогенного состояния в гомогенное. Это позволяет получать литой композиционный материал с улучшенной структурой при общепринятых температурах плавки и литья медных сплавов.

Также, введение кадмия в расплав меди в количестве до 0,1 мас. %:

- снижает межфазное натяжение на границе зародышевая фаза – кристаллизующийся расплав;
- увеличивает количество центров кристаллизации;
- уменьшает размер критического зародыша;
- способствует получению мелкозернистой структуры металлической матрицы композиционного материала (рис 3.4)

Средний размер зерна меди, модифицированной кадмием, снижается с 0,5 до 0,35 мм, а композиционного сплава на ее основе (Cu-0,5CrB₂) с 0,35 до 0,15 мм.



Рисунок 3.4 – микроструктура образца дисперсно-упрочненного сплава₂, модифицированного кадмием (0,1%) и микролегированного РЗМ (0,1%) (x200)

В результате твердость композиционного сплава по сравнению с исходной медью возрастает на 40-49%, при этом прочность материала

остается на достаточно высоком уровне (таблица 3.3). Удельная электропроводность композиционного сплава при комнатной температуре остается на уровне 79%, а при 350 °С – 60%, что отвечает требованиям, предъявляемым к сплавам электротехнического назначения.

Таблица 3.3 – Физико-механические свойства ЛКМ

№	Материал	Твердость, НV	Прочность, σ_B , МПа	Средний размер зерна, мм	Удельное электросопротивление $\cdot 10^{-8}$ Ом·м	
					При 20 °С	При 350 °С
1	Чистая медь М1	50	160	0,5	1,7	4,5
2	Cu-0,5% CrB ₂	60	182	0,55	2,10	6,3
3	Cu-1,0% CrB ₂	70	210	0,68	2,20	8,5
4	Медь М1 + 0,1% РЗМ + 0,1% Cd	55	170	0,35	1,75	4,63
5	Медь М1 + 0,5% CrB ₂ + 0,1% РЗМ + 0,1% Cd	72	178	0,15	2,15	6,5
6	Медь М1 + 1,0 % CrB ₂ + 0,1% РЗМ + 0,1% Cd	82	79	0,34	2,22	8,8

Улучшение свойств ЛКМ при вводе РЗМ обеспечивается за счет уменьшения среднего размера упрочняющей фазы, частицы которой приобретают глобулярную форму диаметром менее 2 мкм (рис 3.5). Этому способствует адсорбция интерметаллидной фазы (Cu₆Se, Cu₆La) на поверхность синтезируемых в расплаве меди частиц диборида хрома, улучшающая их смачивание расплавом меди и предотвращающая коагуляцию.

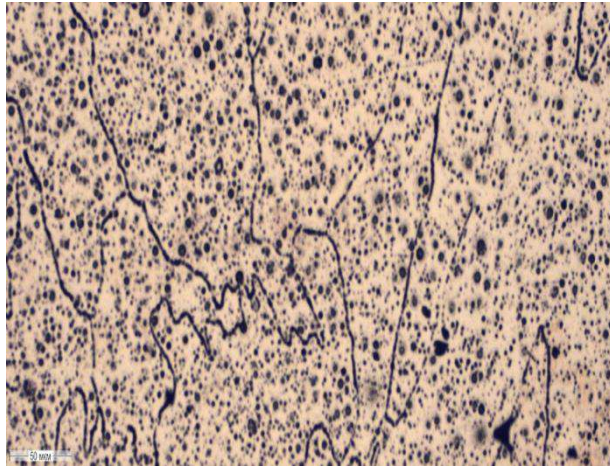


Рисунок 3.5 – микроструктура образца дисперсно-упрочненного сплава 3 (x1000)

Таким образом, введение комплексной добавки в расплав на основе меди позволяет не только измельчить зерно матрицы, но и очистить границы зерен от примесей. Кроме того, комплексная добавка способствует сфероидизации частиц упрочняющей фазы и уменьшению ее размера.

Выводы

Установлено, что при затвердевании меди ее структуру имеет столбчатое строение. Положительное влияние на ее устранение оказывает ввод в расплав миш-металла в количестве 0,1 % , а затем заливкой в водоохлаждаемый кокиль.

Также введение РЗМ в медь, приводит к дополнительному рафинированию ее от вредных примесей и полностью нейтрализует их отрицательное влияние на процесс кристаллизации.

Выявлено, что перегрев расплава, который повышает окисление, можно снизить вводом кадмия. Который еще и увеличивает количество центров кристаллизации, что способствует получению мелкозернистой структуры.

В результате получено, что введение комплексной добавки РЗМ и кадмия, повышает твердость, не изменяет прочность, и оставляет показатели электропроводности соответствующими требованиям, предъявляемым к сплавам электротехнического назначения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сулицин А.В. Развитие теоретических и технологических основ производства литых заготовок из электротехнической меди / А.В. Сулицин – Екатеринбург, 2017. – С. 13-16.

2 Базин Ю.А. О механизме модифицирования сплавов растворимыми добавками / Ю.А. Базин, Б.А. Баум // Цветные металлы. – 1994г. – №7. – 55-58 с.

3 Строганов Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием [Текст] / Г.Б. Строганов, Г.Б. Гершман, В.А. Ротенберг – М.: Металлургия, 1977. – 272с.

4 Ребиндер П.А. Физико-химические основы модификации металлов и сплавов малыми поверхностно активными примесями [Текст], в кн.: / П.А. Ребиндер, М.С. Липман. Исследования в области прикладной физико-химии поверхностных явлений, М. - Л., 1936.

5 Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов [Текст] – изд-во «Металлургия», М.: 1964. – 214 с. – ил.

6 Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали [Текст] / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. М.: Металлургия, 1986. - 26 с.

7 Ефимов В.А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов - М. Машиностроение. 1998. – 360 с.: ил.

8 Archer R.S. – Chem. and Met. Eng. / R.S. Archer.S, J.D. Edwards, 1924. V. 31, P. 504-505.

9 Боом Е.А. Природа модифицирования сплавов типа силумин [Текст] – М.: «Металлургия» - 1972. – 72 с.

10 Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов [Текст] / М.В. Мальцев, 2-е изд. – М.: "Металлургия", 1970. – 364 с.

11 Альтман М.Б. Повышение свойств стандартных алюминиевых сплавов [Текст] / М.Б. Альтман, Н.П. Стромская – М.: Металлургия, 1984. – 129 с.

12 Осинцев О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник / О.Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.

13 Сулицин А.В. Развитие теоретических и технологических основ производства литых заготовок из электротехнической меди / А.В. Сулицин – Екатеринбург, 2017. – С. 13–16.

14 Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова / Издательство «Металлургия», Москва, 1974 г.

15 Ташбулатов Ш.Б. Влияние различных примесей и добавок на свойства меди / Ш.Б. Ташбулатов, С.А. Турсунбаев, Ш.М. Чоршанбиев/ уни-т. г. Ташкент, Узбекистан

16 Рустем С.Л. Оборудование термических цехов. – М.: Машиностроение, 1971. – 288 с.

17 Термоанализатор NETZSCH STA449 C Jupiter. Инструкция по эксплуатации [ТЕКСТ]

18 Микроскоп Axio Observer 40 MAT. Инструкция по эксплуатации [ТЕКСТ]

19 Цифровой микротвердомер DM8. Инструкция по эксплуатации [ТЕКСТ].

20 Механические Испытания Металлов: Метод. указания сост. Е.С Лопатина, А.А Ковалева. – Красноярск : ИПК Сиб. федер. ун-то, 2008. – 64 с.

20 Арсентьев П.П. Экспериментальные работы по теории металлургических процессов: Учеб. Пособие для вузов / П.П. Арсентьев, С.Н. Падерин, Г.В. Серов и др. – М.: Metallurgia, 1989. – С. 218–220.

21 Бейлин В.М. О возможности улучшения свойств проводниковой меди путем легирования РЗМ [Текст] / Бейлин В.М., Ловчиков А.В. и др. // Цветные металлы. -1981. - №2. - С. 80-82.

22 H. Li. Effect of small amount addition of rare earth Ce on microstructure and properties of cast pure copper / H. Li, Sh. Zhang, Y. Chen, M. Cheng, H. Song, J. Lin // Journal of Materials Engineering and performance. – 2015. – Vol. 24, No. 8 – P.2857-2865.

23 Камышенченко Н.В. Влияние микролегирования иттрием на электрические свойства меди, полученной посредством вакуумно-индукционной плавки [Текст] / Камышенченко Н.В., Гальцев А.В., Дурыхин М.И. и др. // Журнал Научные ведомости БелГУ. Серия Математика и физика. – 2011. - вып. 23, №5. – С. 5-15.

24 Мысик Р.К. Проблемы производства литых заготовок из меди [Текст] / Мысик Р.К., Сулицин А.В., Брусницын С.В. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, - 2014. - Т.7, №4. - С. 394-399.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.И. Темных
(подпись)

« » 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Улучшение структуры электротехнической меди за счет модифицирования

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный руководитель

Бабкин 03.07.20
(подпись, дата)

В.Г. Бабкин

Выпускник

Могилев 06.07.20
(подпись, дата)

М.О. Огиенко

Рецензент

Пихутин 04.07.20
(подпись, дата)

И.А. Пихутин

Красноярск 2020