

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

« ____ » _____ 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление: 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Влияние модифицирования и деформационной обработки на структуру и
твёрдость медноматричных композиционных материалов

Руководитель _____
подпись, дата

В. Г. Бабкин

Выпускник _____
подпись, дата

А. А. Никитин

Нормоконтролер _____
подпись, дата

Л. А. Свечникова

Красноярск 2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Влияние модифицирования и деформационной обработки на структуру и твердость медно-матричных композиционных материалов» содержит 41 страниц, 14 рисунков, 8 таблиц, 6 формул и 21 источника литературы.

Цель работы: на основе литературного обзора по теме исследования определить технологию модифицирующей обработки дисперсно-упрочненных сплавов на основе меди и исследовать возможность их дальнейшего упрочнения за счет деформационной обработки.

Для выполнения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- выбрать модификаторы для устранения столбчатой структуры литых заготовок из сплавов на основе меди;

- на основе литературного обзора разработать технологию деформационной обработки слитков из электротехнической меди;

- с применением новой технологии в лабораторных условиях изготовить опытные образцы из композиционных материалов на основе меди и исследовать их структуру и твердость.

Ключевые слова: модифицирование, композиционные материалы, деформационная обработка.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Свойства литой и деформированной меди и композиционных материалов на ее основе.....	6
1.1 Физические свойства меди.....	6
1.2 Механические свойства меди.....	11
1.3 Деформируемые медные сплавы.....	11
1.4 Композиционные материалы электротехнического назначения.....	13
1.5 Методы упрочнения меде матричных композиционных материалов.....	15
1.6 Модифицирование меди.....	19
1.7 Выводы. Цель и задачи исследования.....	24
2 Исходный материал, оборудование и методика эксперимента.....	26
2.1 Исходный материал.....	26
2.2 Оборудование для исследований.....	27
2.3 Методика проведения исследований.....	30
3 Результаты опыта и их обсуждения.....	32
3.1 Структура и механические свойства меди марки М1.....	32
3.2 Исследование структуры и свойств дисперсно-упрочненной меди.....	33
Заключение.....	38
Список использованных источников.....	39

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, необходимость повышения конкурентоспособности электротехнической продукции из меди и медематричных композиционных сплавов заставляет производителей постоянно совершенствовать технологию ее изготовления. Следовательно, основным недостатком существующих технологий получения заготовок из меди методом литья является анизотропия их свойств, обусловленная столбчатой структурой и большой протяженностью границ между структурными зонами с различной направленностью роста кристаллов. Стоит отметить, что аналогичная картина наблюдается при литье дисперсно-упрочненных сплавов на основе меди.

Наибольшим спросом пользуется электротехническая медь. На ее производство расходуется более половины всего количества, добываемого и перерабатываемого медного сырья. В электротехнической промышленности кабели, электротехнические шины, трансформаторные обмотки и другие изделия изготавливают из разных сортов высококачественной меди. В тех случаях, когда требуется максимальная электропроводность, применяется бескислородная медь с высокой электропроводностью. Однако она имеет низкую твердость, низкую температуру рекристаллизации поэтому повышение этих свойств является весьма актуальным.

Медь применяется для получения различных изделий электротехнического назначения, например, электродов контактной сварки. Требования к уровню механических и эксплуатационных свойств этих изделий, работающих при повышенных температурах и давлениях, постоянно повышаются.

Необходимо улучшить структуру меди за счет модифицирования, что напрямую повлияет на эксплуатационные свойства (электропроводность, жаропрочность, твердость и др.). Данный метод является наиболее перспективным для получения композиционных материалов с заданным

комплексом свойств. Однако, крупнозернистая столбчатая структура и анизотропия свойств литых заготовок из меди связаны с микрогетерогенностью расплава и высокой теплопроводностью меди.

1 Свойства литой и деформированной меди и композиционных материалов на ее основе

1.1 Физические свойства меди

Медь в периодической таблице металлов имеет порядковый номер 29, тип структуры – ГЦК – решетка, параметр решетки, $a = 0,36153$ нм, ближайшее межатомное расстояние $0,2556$ нм, атомный радиус $0,128$ нм, основные физические свойства представлены в таблице 1.1 [1].

Таблица 1.1 – Основные физические свойства меди

Температура плавления $T_{п}$, °С	1084
Температура кипения $T_{к}$, °С	2560
Плотность γ , кг/м ³	8890
Удельная теплоемкость при постоянном давлении C_p , кДж/(кг·Дж)	385
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	16,8
Удельное электрическое сопротивление ρ , мОм·м	0,01724
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	390
Удельная электрическая проводимость ω , МОм/м	58

Коэффициент линейного термического расширения (КТР) меди существенно зависит от температуры (рисунок 1.1). Особенно ощутимо это влияние в диапазоне температур ниже комнатных, при повышении температуры КТР возрастает. Значения КТР приходится учитывать в случае работы изделий из меди при повышенных температурах, например, в теплообменных аппаратах [1]. Кроме того, этот фактор приходится учитывать при эксплуатации изделий из меди, работающих даже в относительно небольшом температурном диапазоне, но имеющем большую длину, когда даже небольшое изменение температуры вызывает за счет большой длины проводника

большое приращение этой длины. На рисунке 1.1 показана зависимость коэффициента линейного термического расширения от температуры для меди.

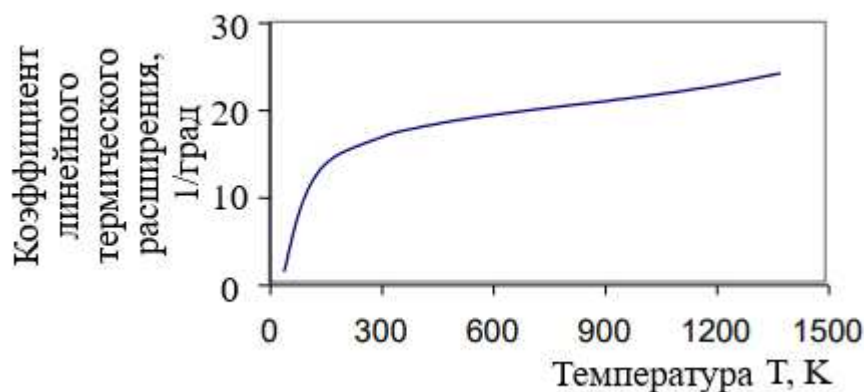


Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента линейного термического расширения от температуры для меди

В качестве примера можно привести режимы эксплуатации электроконтактных сетей железнодорожного и муниципального транспорта. В промышленности композиционных материалов медь часто является матрицей по отношению к другим металлам (например, по отношению к волокнам сверхпроводящего сплава ниобий–титан), имеющим иной коэффициент термического расширения. При совместной термической обработке таких материалов возможно появление значительных термических напряжений из-за разницы в КТР. Существенна также зависимость от температуры удельного электрического сопротивления (рисунок 1.2). Эта зависимость важна, поскольку медь часто выступает в качестве материала – проводника электрического тока. Как видно из графика, удельное электрическое сопротивление нелинейно возрастает с повышением температуры, причем темп возрастания при высоких температурах выше, чем при пониженных температурах, продукт будет отвечать многим требованиям, предъявляемым

к КМ. На рисунке 1.2 показано удельное электрическое сопротивление меди технической чистоты в зависимости от температуры.

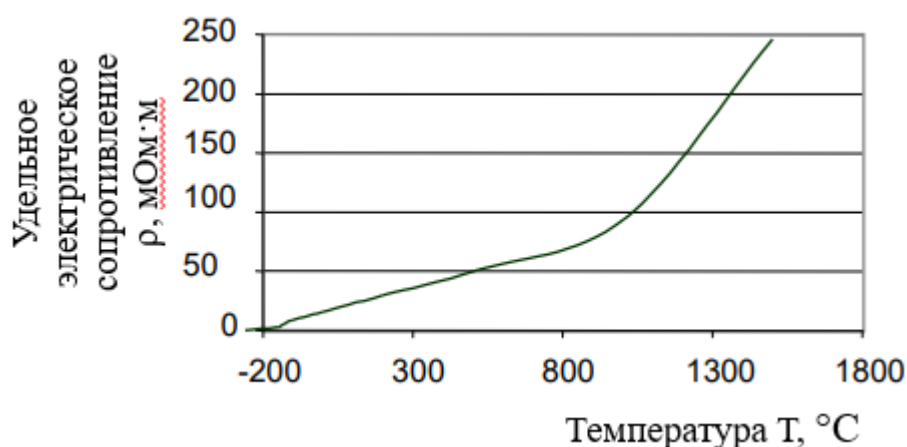


Рисунок 1.2 – Удельное электрическое сопротивление меди технической чистоты в зависимости от температуры

Необходимые материалу механические и физико-химические свойства, такие как пластичность, стойкость к окислению и электроэрозии, прочность, электропроводность, жаростойкость и др., определяют эти требования.

Медь, в качестве заменителя серебра, обладает набором необходимых свойств для материалов электроконтактного назначения, позволяющих создавать на ее основе сплавы с повышенным сопротивлением к электродуговому износу и свариванию. Медные проводники должны обладать не только высокой электропроводностью, но и способностью противостоять механическим нагрузкам при повышенных температурах. Перспективными материалами для изделий электротехнического назначения, обладающих высокой электропроводностью и достаточной прочностью при повышенных температурах, являются медные композиционные сплавы, упрочненные дисперсными частицами карбидов. Композиционные сплавы на основе меди широко применяют в электротехнике в качестве контактного материала для низко- и высоковольтных выключателей, вставок плазмотронов, электродов сварочных машин и др.

Технологии получения дисперсно-упрочненных металломатричных композитов, содержащих медную матрицу и упрочняющие элементы (тугоплавкие переходные металлы, карбиды, алмазные наночастицы, и др.) относятся, в основном, к методам порошковой металлургии или металлургическим методам: электронно-лучевого переплава компонентов композита с ограниченной растворимостью, их испарением и смешением в паровом потоке; получения полуфабрикатов из дисперсно-твердеющего низколегированного медного сплава с их последующей термомеханической обработкой; получения литых композиционных материалов, основанным на замешивании дискретных армирующих частиц в расплаве с применением механического, электромагнитного и других методов перемешивания жидкого металла вблизи температуры плавления.

Вообще говоря, медь является одним из лучших материалов для изготовления проводников тока. В массовых масштабах по применению в этой области с ней конкурирует лишь алюминий, электропроводность которого в 1,58 раза меньше, чем у меди, поэтому для изготовления электрических сетей равной мощности требуется по объему в 1,58 раза больше алюминия, чем меди. По массе алюминия потребуется меньше, чем меди, однако алюминий обладает гораздо меньшими прочностью и пластичностью, что создает неудобства при монтаже и ремонте электропроводящих систем. Прекрасные электропроводящие свойства меди привели к тому, что медь была выбрана эталоном для проверки электропроводности других металлов и сплавов. В шкале электропроводности металлов IACS за 100 % принята электропроводность чистой меди при комнатной температуре, а остальные металлы аттестуются относительно этой величины. Так, электропроводность алюминия составляет 63 % IACS, электропроводность железа только 17 % IACS. Медь является отличным проводником тепла, что позволяет применить ее в качестве конструкционного материала для изготовления теплообменников и радиаторов. Теплопроводность меди снижается с ростом

температуры, что иллюстрирует рисунок 1.3. Высокие значения теплопроводности меди наблюдаются при температурах ниже $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре 19 K теплопроводность меди составляет $5200\text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$, что в 13 раз ниже, чем этот же показатель при комнатной температуре. Значительно меньше градиент изменения теплопроводности при температурах выше комнатной [1]. На рисунке 1.3 представлена зависимость теплопроводности меди от абсолютной температуры.

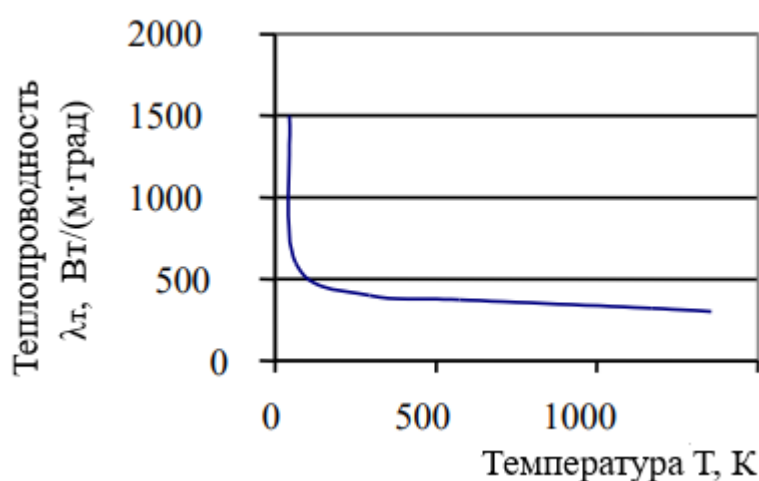


Рисунок 1.3 – Зависимость теплопроводности меди от абсолютной температуры

При нагреве медных заготовок до температур горячей деформации теплопроводность может снизиться на 30 %.

1.2 Механические свойства меди

Механические свойства меди в большей степени зависят от ее состояния (таблица 1.2) и в меньшей – от содержания примесей. Холодная пластическая деформация (достигающая 90 % и более) увеличивает прочность, твердость, предел упругости меди, но снижает пластичность и

электрическую проводимость. При пластической деформации возникает текстура, вызывающая анизотропию [2].

Таблица 1.2 – Механические свойства меди

Свойства	Состояние	
	деформированное	отожженное
Предел прочности на разрыв σ_b , МПа	340–450	220–245
Относительное удлинение после разрыва δ , %	4–6	45–55
Относительное сужение, после разрыва ψ , %	40–60	65–80
Твердость по Бринеллю НВ, МПа	90–110	35–55

При отрицательных температурах медь имеет более высокие прочностные свойства и более высокую пластичность, чем при температуре 20 °С. Признаков холодноломкости техническая медь не имеет. С понижением температуры увеличивается предел текучести меди и резко возрастает сопротивление пластической деформации [2].

1.3 Деформируемые медные сплавы

Деформируемые медные сплавы отличаются высокой пластичностью и электропроводностью. Эти металлы широко используются для создания различных конструкций, штампованных деталей, пружин, гильз, электротехнических и электронных изделий, а также декоративно-функциональных предметов интерьера.

Основной технологией производства хромовых бронз (в том числе комплексно легированных), являющихся распространенными материалами электротехнического назначения, служит двухстадийный способ выплавки, включающий производство лигатуры и конечного сплава, наиболее извест-

ные из них хромовые и хромоциркониевые бронзы. Оптимальная концентрация хрома в лигатуре для первых и вторых составляет 10 %. Лигатура вторых, кроме того, содержит от 1,0 до 1,5 % циркония. Особенностью технологии, определяющей высокую стоимость бронз, а также экологическую вредность производства, является изготовление лигатур [3]. Общеизвестно, что перспективным способом повышения свойств литых материалов служит модифицирование. При этом наиболее эффективно применение модифицирующих лигатур. Однако источники литературы, в которых описаны получение и использование модификаторов и модифицирующих лигатур для производства бронз электротехнического назначения, направленные на упрощение технологии изготовления и повышение физико-механических свойств, отсутствуют. Одним из перспективных методов решения проблемы производства лигатур и бронз является применение реакционного механического легирования, обеспечивающего получение модифицирующих лигатур и исключаящего из технологического процесса их производства высокотемпературную плавку [3].

В настоящее время кадмиевая бронза широко применяется в электротехнической промышленности, поскольку кадмий, присутствующий в этом сплаве, незначительно снижает теплопроводность и электропроводность меди, при этом значительно повышает ее прочностные характеристики. Кроме того, эта бронза обладает способностью к искрогашению [4]. Из нее изготавливают контактные провода для электрифицированного транспорта, коллекторные пластины роторов и статоров электрических двигателей и генераторов, электроды сварочных машин, контакты высоковольтных электрических разъединителей и другие изделия электротехнического назначения [4].

Качество готовой продукции во многом определяется качеством исходных полуфабрикатов, а получение качественных слитков из кадмиевой бронзы в настоящее время сопряжено с большими технологическими трудно-

стями, прежде всего, это большая склонность справа к обратной ликвации. Появление ликватов на поверхности слитков приводит к износу кристаллизатора и значительно снижает качество поверхности слитка. Учитывая тот факт, что научно-технический прогресс в отраслях промышленности, использующих медные сплавы, требует непрерывного повышения качества деформированных полуфабрикатов, весьма актуальным является исследование ликвационных процессов определение реальных путей снижения неоднородности слитка по химическому составу.

1.4 Композиционные материалы электротехнического назначения

Матрицу для композиционного материала выбирают, учитывая целый комплекс важных технологических свойств, благодаря которым конечный продукт будет отвечать многим требованиям, предъявляемым к КМ. Необходимые материалу механические и физико-химические свойства, такие как пластичность, стойкость к окислению и электроэрозии, прочность, электропроводность, жаростойкость и др., определяют эти требования.

Медь, в качестве заменителя серебра, обладает набором необходимых свойств для материалов электроконтактного назначения, позволяющих создавать на ее основе сплавы с повышенным сопротивлением к электродуговому износу и свариванию [5].

Медные проводники должны обладать не только высокой электропроводностью, но и способностью противостоять механическим нагрузкам при повышенных температурах.

Перспективными материалами для изделий электротехнического назначения, обладающих высокой электропроводностью и достаточной прочностью при повышенных температурах, являются медные композиционные сплавы, упрочненные дисперсными частицами карбидов. Композиционные сплавы на основе меди широко применяют в электротехнике в качестве

контактного материала для низко- и высоковольтных выключателей, вставок плазмотронов, электродов сварочных машин и др. [5].

Технологии получения дисперсно-упрочненных металломатричных композитов, содержащих медную матрицу и упрочняющие элементы (тугоплавкие переходные металлы, карбиды, алмазные наночастицы, и др.) относятся, в основном, к методам порошковой металлургии или металлургическим методам: электронно-лучевого переplava компонентов композита с ограниченной растворимостью, их испарением и смешением в паровом потоке; получения полуфабрикатов из дисперсно-твердеющего низколегированного медного сплава с их последующей термомеханической обработкой; получения литых композиционных материалов, основанным на замешивании дискретных армирующих частиц в расплаве с применением механического, электромагнитного и других методов перемешивания жидкого металла вблизи температуры плавления.

Известно применение кадмиевой меди $\text{Cu} - 1\% \text{Cd}$ [6, 7] как литой, так и порошковой, в качестве материалы для разрывных электрических контактов. Она значительно превосходит по основным служебным характеристикам чистую медь как контактный материал, но её переходное сопротивление и стойкость к проплавлению недостаточны. Известен также металлокерамический материал на основе меди с добавкой оксида кадмия $\text{Cu} - 5\% \text{Cd}$ [8], имеющий неплохие электроконтактные свойства и в том числе весьма низкий электроперенос при коммутации постоянного тока, Описан и изучен аналогичный материал $\text{Cu} - 10\% \text{Cd}$ [8], который показал хорошую работоспособность инертной атмосфере, но на воздух быстро разрушался.

Недостатком композиционных материалов на основе меди является грубая структура, связанная со столбчатым строением, чтобы этого избежать необходимо применить модифицирование [9].

1.5 Методы упрочнения медематричных композиционных материалов

Технологии получения дисперсно-упрочненных металломатричных композитов, содержащих медную матрицу и упрочняющие элементы (тугоплавкие переходные металлы, алмазные наночастицы, карбиды, и др.) относятся, в основном, к методам порошковой металлургии или металлургическим методам: электронно-лучевого переплава компонентов композита с ограниченной растворимостью, их непарением и смешением в паровом потоке; получения полуфабрикатов из низколегированного дисперсно-твердеющего медного сплава с их последующей термомеханической обработкой; получения литых композиционных материалов замешиванием дискретных армирующих частиц в расплаве с применением электромагнитного, механического и других методов перемешивания жидкого металла вблизи температуры плавления.

Метод механического легирования, наиболее распространенными способами упрочнения медематричных КМ (в отечественных и зарубежных источниках) являются методы порошковой металлургии [14,15].

Применение реакционного механического легирования является одним из перспективных механических методов упрочнения меди посредством введения хрома, которое исключает из процесса получения лигатур высокотемпературную плавку и литье [16]. Данная технология включает в себя операции размола, компактирования и пластической деформации в различных температурных интервалах.

Бронзы, полученные с применением этой технологии бронзы, имеют высокую плотностью, обладают беспористостью и отсутствием микровключений. Кроме того, они обладают высокими физико-механическими свойствами.

Смешиванием порошков титана, углерода и меди, путем обработки полученной измельченной шихты в шаровой мельнице, последующего холодного компактирования полученных гранул в брикеты и их горячей экструзии в пруток возможно получение КМ системы Cu–TiC с различным содержанием титана. Такие материалы обладают высокими прочностными свойствами ($\sigma_b = 425$ МПа), твердостью (145 МПа), электропроводностью (85 % от электропроводности чистой меди), а также высокими антифрикционными свойствами.

Электрическое сопротивление полученных сплавов превышает 85 % от сопротивления чистой меди. При увеличении содержания оксида алюминия до 1,1 масс. % прочность материалов возрастает до 370 МПа при относительном удлинении 24 %. Высокий уровень механических свойств и структура материала сохраняются и после термической обработки в течение 1 часа при температурах вплоть до 850 °С, при этом относительное снижение твердости не превышает 20 %. При увеличении содержания оксида алюминия до 2,1 масс. % наблюдается монотонное снижение относительного удлинения и электропроводности при увеличении прочностных характеристик.

Механоактивацией порошков меди, хрома и графита в планетарной шаровой мельнице с последующим компактированием возможно получение нанокompозитив Cu–Cr₃C₂ с высокой (до 4,4 ГПа) микротвердостью [17].

При всех достоинствах механических методов получения дисперсии:

- упрочненных композиционных материалов, недостатками являются;
- длительность и многостадийность технологического процесса;
- загрязнение материала железом вследствие истирания стальных мелющих;
- тел в процессе обработки в шаровой мельнице;
- сложность получения беспористых образцов.

Метод легирования армирующими материалами, в процессе изготовления литых металломатричных КМ, армированных дискретными частицами упрочняющих фаз должно обеспечиваться равномерное наполнителя в объеме матрицы, связь армирующего наполнителя с матрицей и возможность контроля процессов межфазного взаимодействия.

Одним из известных методов, позволяющих решить данные задачи, является механическое замешивание дискретного наполнителя в матричный расплав. Преимуществом данного метода является возможность варьировать в широких пределах температурно-временные параметры совмещения и состав компонентов.

В производстве композиционных материалов наибольшее распространение получили методы упрочнения медной матрицы путем введения армирующих гранул, прутков или слитков и порошков [18, 19].

Введением в расплав готовых порошков карбидов различных переходных металлов, хорошо смачиваемых медью, были получены композиционные материалы с повышенными физико-механическими свойствами. В частности, при упрочнении медной матрицы порошком карбида хрома (Cr_3C_2) прочность на разрыв при $400\text{ }^\circ\text{C}$ составила 649 Н/мм^2 , что больше чем в два раза, чем у образца из чистой меди 301 Н/мм^2 при той же температуре. Кроме того, полученный материал имеет удовлетворительную электропроводность, которая составляет 60 % чистой меди.

К недостаткам данного способа следует отнести применение порошков карбидов достаточно крупных размеров 16 мкм , которые склонны к дальнейшему укрупнению за счет коагуляции в расплаве меди с повышенным содержанием кислорода. Окисление металла происходит в процессе переплава катодной меди в открытой индукционной тигельной печи и в процессе замешивания в расплав порошков карбидов.

Наиболее перспективными для изделий электротехнического назначения, обладающих высокой электропроводностью и достаточной прочностью

являются литые медематричные композиционные материалы, упрочненные дисперсными частицами карбидов и боридов хрома, синтезированных в матричном расплаве. Известен способ получения композиционного материала для электрических контактов на основе меди, заключающийся в расплавлении меди, введении в медный расплав порошков графита до 2,0 % и хрома до 1,0 % фракцией до 10 мкм для синтеза упрочняющей фазы (Cr_3C_2) в расплаве меди с одновременным воздействием на полученный расплав вертикальных низкочастотных колебаний и последующей кристаллизации [20]. Это позволило уменьшить длительность и снизить температуру синтеза карбида хрома. При этом частицы графита менее 0,1 мкм полностью переходили в карбидную фазу, а более крупные частицы образовывали структурный комплекс, что существенно снижает прочность изделий, работающих при повышенных температурах и давлениях, например, электродов контактной сварки. Образцы ЛКМ, полученные предложенным способом обладают высокими значениями твердости и низким электросопротивлением (удельная электропроводность составляет 94–98 % чистой меди, твердость превышает таковую чистой меди на 17–40 %).

Основным недостатком данного метода является необходимость применения НЧК для разрушения конгломератов армирующих фаз и равномерного распределения их в объеме расплава, при этом в процессе литья и кристаллизации композиционных сплавов наблюдается повторное укрупнение частиц, о чем свидетельствует наличие в структуре композита включений карбидов различных размеров. Как известно, в процессе кристаллизации окисленной меди в ее структуре появляется оксидная фаза (Cu_2O), которая может выделяться как в чистом виде, так и в виде эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$). Данное состояние системы на основе меди является микрогетерогенным. Наличие в расплаве эвтектики способствует формированию конгломератов армирующих фаз, образующихся в процессе их синтеза.

Известен способ получения литого композиционного сплава электро-технического назначения на основе меди, заключающийся в раскислении медного расплава 0,7 % фосфористой медью, получении образцов способом совмещенного литья и прессования в установке для штамповки электродов контактной сварки, последующей закалки и старении медных образцов [21]. В качестве основного компонента используется медный лом, а также легирующий элемент в виде таблетки, состоящей из 100 г медного порошка и 20 г наноструктурированных частиц хрома. Дисперсно-твердеющие хромо-вые бронзы, содержащие от 0,4 до 1,0 масс. % Cr, обладают после закалки и старения высокой электропроводностью, однако температура рекристаллизации сплава снижается при эксплуатации электродов, что обусловлено растворимостью частичек твердого раствора на основе хрома в твердом растворе на основе меди. Недостатками данного метода также являются: грубая микроструктура, образованная крупными включениями карбидов, вследствие чего ухудшается деформируемость металла, необходимость проведения термической обработки, многооперационность технологического процесса, длительность использования термических печей, наличие плавильного и прессового оборудования и невозможность его применения в промышленных масштабах. Кроме того, раскисление расплава на основе меди фосфористой медью снижает ее электропроводность.

1.6 Модифицирование меди

Кислородосодержащая медь применяется для получения различных изделий электротехнического назначения. Требуемый уровень механических и эксплуатационных свойств постоянно повышается из-за возрастающих требований к надежности изделий и их ресурсу работы, особенно при повышенных температурах [10].

Необходимое сочетание эксплуатационных свойств (электропроводность, жаропрочность, твердость и др.) можно достигнуть за счет упрочнения изделий из меди дисперсными частицами, синтезированными в расплаве. Однако медь, выполняющая роль матрицы, имея высокую теплопроводность, склонна к образованию столбчатой структуры при затвердевании.

Для дальнейшей пластической обработки желательно иметь равноосные зерна в структуре литых заготовок, это позволит повысить технологичность литых заготовок при обработке давлением, и также уровень механических свойств готовой продукции.

Исходя из этого, для получения мелкозернистой равноосной структуры необходимо воздействовать на расплав меди в предкристаллизационный период, например, с помощью введения модифицирующих добавок.

Основная функция модифицирования, это измельчение кристаллического зерна, благодаря чему повышаются механические свойства модифицируемых сплавов. Модификаторы подразделяют на модификаторы 1-го и 2-го рода. Модификаторы 1-го рода – ПАВ (ингибиторы), адсорбируются на поверхности зародышей, возникающих и центрах кристаллизации и тормозят их рост, в результате появляется большое количество новых зародышей, рост их становится возможным из-за уменьшения концентрации модификаторов на их поверхности. Модификаторы первого рода ограниченно растворяются в жидком расплаве, имеют низкие температуру плавления и растворимость в твердом растворе (не более 0,01–0,1 ат. %), Модификаторы 2-го рода – так называем модификаторы инокулирующего действия облегчают образование в расплаве центров кристаллизации, например, коллоидных частиц, или служат непосредственно дополнительными центрами – зародышами кристаллизации при затвердевании. Такими зародышами могут служить малые частицы (обычно 1-3 мкм) химических соединений тугоплавких элементов (Ti, Zr, B и др.), имеющих кристаллическую структуру с межатомными расстояниями,

разнящиеся не более чем 15 %. Иногда на этих центрах кристаллизуются фазы, иначе не выделяющиеся в данном расплаве, Модификаторы 1-го рода усиливают, а 2-го – уменьшают переохлаждение расплава.

При выборе модификатора необходимо учитывать следующие рекомендации. Модификатор должен иметь кристаллографическое и размерное соответствие с матрицей сплава, температура его плавления должна быть выше температуры плавления сплава, плотность модификатора должна быть близкой к инфицируемому сплаву. Модификатор должен обладать достаточно сильными адсорбционными связями с атомами модифицируемого сплава. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие модификатора с примесями и возможность протекания сопутствующих процессов раскисления и рафинирования расплава, также важным является вопрос об оптимальной концентрации и целесообразности применения того или иного модификатора.

Чтобы изучить влияние РЗМ на структуру и свойства меди в работе Сулицина А.В. [11] были проведены эксперименты по модифицированию на примере меди марки М00 и мишметаллом в количестве от 0,0025 до 0,0125 мас. %. На рисунке 1.4,1.5 показана макроструктура слитков меди марки М00 и М1.

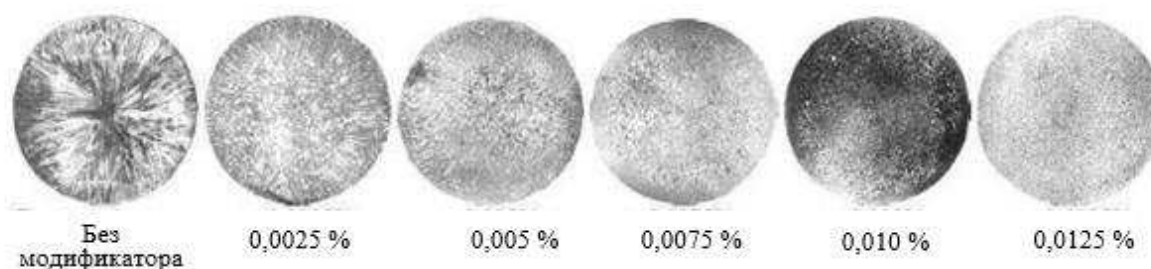


Рисунок 1.4 – Макроструктура слитков меди марки М00 зависимости от количества, введённого мишметалла

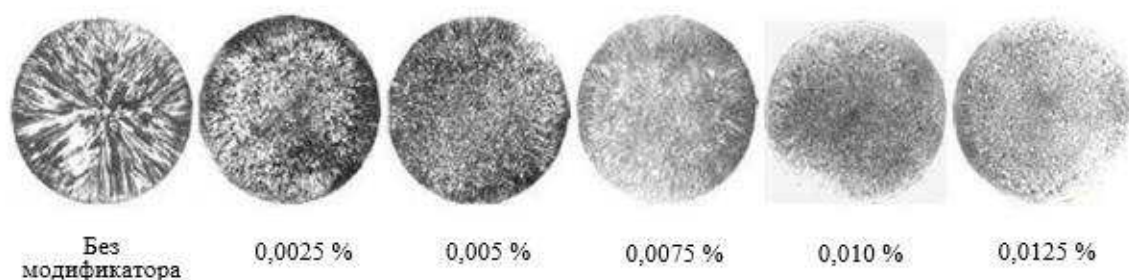


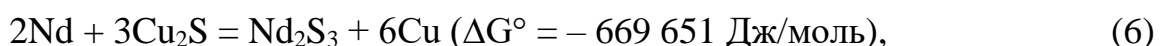
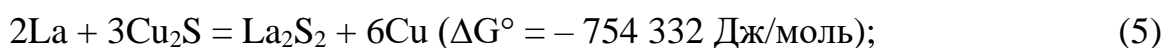
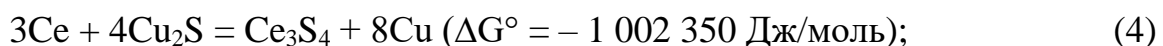
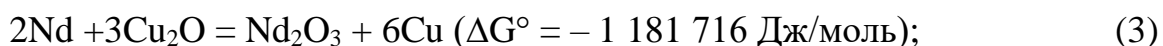
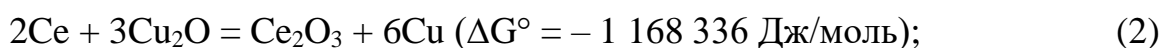
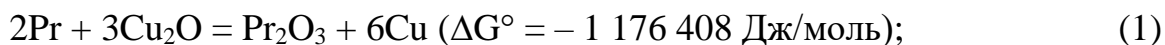
Рисунок 1.5 – Макроструктура слитков меди марки М1 в зависимости от количества, введенного мишметалла

При анализе микроструктуры образцов установлено, что при использовании модификатора в меди марок М00 и формируется преимущественно равноосная структура, протяженность зоны столбчатых кристаллов незначительна. Увеличения толщины границ зерен не наблюдается. Это свидетельствует о том, что межзеренные связи не ослаблены. При этом средняя площадь сечения зерна меди марки М00 уменьшается с 5 мм^2 до $0,9 \text{ мм}^2$ при введении $0,005 \text{ мас. \%}$ мишметалла и при дальнейшем увеличении количества вводимого модификатора она практически не изменяется. Средняя площадь сечения зерна меди марки М00 уменьшается с 6 мм^2 до $0,45 \text{ мм}^2$ при введении $0,005 \text{ мас \%}$ мишметалла. Разные значения средней площади сечения зерна в меди марки М00 и М1 объясняется присутствием большего количества примесей в меди марки М1.

Результаты механических испытаний образцов меди марки М00 и М1 показали, что при увеличении количества модификатора наблюдается повышение механических свойств (относительного удлинения, временного сопротивления разрушению при растяжении, твердости) в среднем на 15% . При этом интенсивный рост значений механических свойств меди отмечается при введении до $0,0075 \text{ мас. \%}$ мишметалла. Дальнейшее увеличение количества модификатора не приводит к существенному повышению уровня механических свойств.

Анализ результатов проведенных экспериментов по модифицированию меди марок М00 и редкоземельными металлами в составе мишметалла, показал, что влияние модификаторов на формирование структуры и свойств меди с различным содержанием примесей различное. Это свидетельствует о том, что в зависимости от содержания примесей в меди возможных отличиях в механизме модифицирования расплава.

При модифицировании меди различными элементами необходимо учитывать возможность образования тугоплавких соединений между вводимыми с модификаторами элементами и примесями, содержащимися в расплаве. Присутствующие в меди примеси при введении мишметалла могут образовывать различные тугоплавкие соединения, например, оксиды, сульфиды, интерметаллиды и др. При использовании редкоземельных металлов, входящих в состав мишметалла, вероятность образования тугоплавких соединений будет определяться более выгодными с точки зрения термодинамики условиями. В работе Сулицина А.В. [11] определена термодинамическая вероятность протекания следующих реакций по величине изменения стандартной энергии Гиббса при температуре 1 120 °С, рассчитанной по разработанной на кафедре «Теория металлургических процессов» УрФУ методике, и учитывающей возможные полиморфные превращения исходных веществ и продуктов реакции при данной температуре:



где ΔG – энергия Гиббса, кДж/моль.

Анализ результатов расчета показал, что все перечисленные реакции при температуре 1120 °С возможны, но очередность их протекания различна, в первую очередь протекает реакция между редкоземельными металлами и оксидом меди с образованием соответствующих оксидов РЗМ, но нельзя исключать, что все перечисленные реакции могут протекать одновременно. Таким образом, при введении в расплав меди мишметалла могут образовываться тугоплавкие соединения, которые могут являться центрами кристаллизации.

Установлено, что механизм и эффективность действия модификаторов зависят от содержания примесей в расплаве меди. Для меди марки МОО, содержащей максимум 0,04 мас. % примесей, чаще всего реализуется механизм модифицирования, связанный со стабилизацией и ростом упорядоченных группировок (кластеров), которые способны стать центрами кристаллизации, а для меди марки М1, содержащей максимум 0,1 мас. % примесей, преобладает зародышевый механизм модифицирования наряду с гетерогенизацией расплава [11, 12].

1.7 Выводы. Цель и задачи исследования

Выводы, которые можно сделать после проанализированной работы:

- более широкое применение медь нашла в производстве изделий электротехнического назначения, например, электродов контактной сварки;
- данные требования к уровню эксплуатационных и механических свойств изделий, использующих при больших температурах и давлениях, повышаются, в связи с этим приходится решать проблему с упрочнением чистой меди, и с сохранением пластичности и высокой электропроводности;
- дисперсно-упрочненные медематричные композиционные материалы относятся к методам порошковой металлургии и жидкофазным металлургическим технологиям, имеющим ряд недостатков;

- необходимо улучшить структуру меди за счет модифицирования, что напрямую повлияет на эксплуатационные свойства (электропроводность, жаропрочность, твердость и др.). Данный метод является наиболее перспективным для получения композиционных материалов с заданным комплексом свойств. Однако медь, выполняющая роль матрицы, имея высокую теплопроводность, склонна к образованию столбчатой структуры при затвердевании.

Следует, что литейным композиционными материалами электротехнического назначения на основе меди уделено недостаточно внимание, не смотря на их перспективность. Деформационная обработка и повышение механических свойств композиционных материалов на основе меди требует дополнительного оборудования. Данная медь выполняет роль матрицы и из-за высокой теплопроводности склонна к столбчатой структуре. На основании изложенного была поставлена следующая цель исследований: на основе литературного обзора по теме исследования определить технологию модифицирующей обработки дисперсно-упрочненных сплавов на основе меди и исследовать возможность их дальнейшего упрочнения за счет деформационной обработки.

После этого были поставлены следующие задачи:

- выбрать модификаторы для устранения столбчатой структуры литых заготовок из сплавов на основе меди;
- на основе литературного обзора разработать технологию деформационной обработки слитков из электротехнической меди;
- с применением новой технологии в лабораторных условиях изготовить опытные образцы из композиционных материалов на основе меди и исследовать их структуру и твердость.

2 Исходный материал, оборудование и методика проведения эксперимента

2.1 Исходный материал

Исследование относится к области цветной металлургии, в частности литейному производству, а именно к получению литого композиционного материала (ЛКМ) на основе меди для изготовления деталей электротехнического назначения, работающих при повышенных температурах и давлениях.

Для приготовления медных расплавов использовалась медь марки М1.

В таблицах 2.1–2.4 представлены химические составы исходных материалов.

Таблица 2.1 – Химический состав меди марки М1

Fe	Ni	S	As	Pb	Zn
До 0,05	До 0,02	До 0,04	До 0,02	До 0,05	До 0,04
O	Sb	Bi	Sn		
До 0,05	До 0,002	До 0,001	До 0,002	Cu+Ag min 99,9	

Таблица 2,2 – Химический состав РЗМ МЦ50Ж3

Марка	Массовая доля элементов, %				
	Ce	La	Nd	Pr	Fe
МЦ50Ж3	40,0–60,0	25,0–45,0	До 3,0	До 10,0	До 3,0

Таблица 2.3 – Химический состав хрома. Марка ПХ 99,0

Cr	Si	Al	Fe	C	P	S	O	N
Не менее	Не более							
99,0	0,15	0,1	0,3	0,05	0,01	0,01	0,2	0,1

Таблица 2.4 – Химический состав кадмиевой бронзы марки БрКд1

Cu	Cd	Примесей
98,5–99,1	0,9–1,2	Всего 0,3

Для раскисления расплава использовали алмазграфитовый наноразмерный алмазграфитовый порошок.

2.2 Оборудование для исследований

Плавки проводили в лабораторной печи Таманна с графитовым тиглем, изображенным на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Лабораторная печь Таманна с графитовым тиглем

Электропечь предназначена для комплексных технологических исследований процессов при прокаливании и плавлении порошкообразных и кусковых материалов, а также при твердофазных, гетерофазных и жидкофазных эндотермических реакциях.

Допускается работа в среде инертных газов повышенной чистоты при предельном избыточном давлении не более 0,02 МПа (0,2 кгс/см²), при этом рабочая температура в рабочем пространстве определяется в зависимости от физических параметров газа.

Камера печи представляет собой вертикальный водоохлаждаемый цилиндр, с торцов которого располагаются медные водоохлаждаемые диски, через которые подводится ток от понижающего трансформатора к цилиндрическому графитовому нагревателю. Контакт между нагревателем и медными дисками создается с помощью уплотнения из графитовой крошки, запрессованной прижимными крышками. Теплоизоляция камеры состоит из коаксиальных графитовых цилиндров-экранов. Тигель с загрузкой устанавливается на загрузочный столик.

Прокатный стан, машина для обработки давлением металла и др. материалов между вращающимися валками, т. е. для осуществления процесса прокатки, в более широком значении — автоматическая система или линия машин (агрегат), выполняющая не только прокатку, но и вспомогательные операции: транспортирование исходной заготовки со склада к нагревательным печам и к валкам стана, передачу прокатываемого материала от одного калибра к другому, кантовку, транспортирование металла после прокатки, резку на части, маркировку или клеймение, правку, упаковку, передачу на склад готовой продукции и др. На рисунке 2.3 представлен прокатный стан.

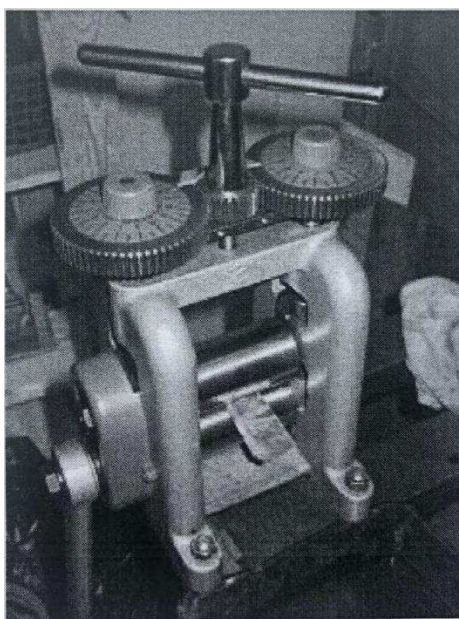


Рисунок 2.3 – Прокатный стан

Металлографические исследования осуществляли с помощью светового микроскопа *AXIO Observer 40 MAT* при увеличении $\times 100$ и $\times 500$ крат, который позволял выводить результаты на экран монитора с помощью программы *Axio Vision 40 MAT* и дальнейшей обработки с использованием программы анализа изображений. На рисунке 2.4 представлен Микроскоп *AXIO Observer 40 MAT*.



Рисунок 2.3 – Микроскоп *AXIO Observer 40 MAT*

Испытания на твердость по Бринеллю производили на универсальном твердомере *EMCQ-TEST M4 G3*. На рисунке 2.5 представлен универсальный твердомер *EMCQ-TEST M4 G3*.



Рисунок 2.5 – Универсальный твердомер *EMCQ-TEST M4 G3*

По условиям испытаний и требований ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю» и ГОСТ 23677-79 «Твердомеры для металлов. Общие технические требования» использовали индикатор-шарик диаметром 2,5 мм; нагрузка соответствовала 187,5 кгс, необходимое количество измерений – 3.

2.3 Методика проведения исследования

Экспериментальные сплавы готовили в печи Таммана. Медь плавил в графитовом тигле под покровом тонкомолотого графита, перегревали расплав до 1250–1260 °С и раскисляли наноразмерным алмазграфитовым порошком. Затем в расплавленную медь под зеркало металла вводили в медной фольге реакционную смесь порошков хрома и бора и выдерживали при данной температуре в течении 10 мин для протекания процесса растворения и синтеза упрочняющей фазы. Расплав перемешивали, охлаждали до 1200 °С, вводили микролегирующую и модифицирующую добавки и разливали в

металлический кокиль. Из полученных слитков диаметром 20 мм и высотой 200 мм изготавливали образцы для физико-механических испытаний и металлографических исследований. На рисунке 2.6 представлен стальной кокиль.



Рисунок 2.6 – Стальной кокиль

Из полученных слитков диаметром 20 мм и высотой 200 мм изготавливали образцы для физико-механических испытаний и металлографических исследований. На рисунке 2.7 представлены цилиндрические слитки.



Рисунок 2.7 – Цилиндрические слитки

3 Результаты опыта и их обсуждения

3.1 Механические свойства меди марки М1

Важной задачей современного материаловедения является разработка материалов, обладающих комплексом разнородных эксплуатационных свойств. Материалы электротехнического назначения должны сочетать высокую электропроводность, достаточную прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, сохраняющиеся при повышенных температурах. В таблице 3.1 представлены механические свойства меди марки М1.

Таблица 3.1 – Механические свойства меди марки М1

Состояние	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	ψ , %	НВ, МПа
Литое	160	35	25	–	40
Деформированное (на 90 %)	450	400	3	35	125
Отожженное	220	75	50	75	55

В качестве исходного компонента для получения композитного материала, как следует из таблицы кислородосодержащая нераскисленная медь имеет в литом состоянии низкую пластичность, а повышенное содержание кислорода в деформированной меди обладает повышенной прочностной характеристикой, однако в этом состоянии у неё низкая температура кристаллизации.

Модифицирование одним только РЗМ не позволяет, поэтому для получения свойства применили комплексный модификатор, который состоит из прутка кадмия (модифицирует матрицу), РЗМ применяется для получения более дисперсной округлой формы упрочняющей фазы.

3.2 Исследование структуры и свойств дисперсно-упрочненной меди

Способ получения литого композиционного материала на основе меди включает плавление меди под покровом тонкомолотого графита, введение в расплав реакционной смеси порошков хрома и бора для синтеза армирующих дискретных частиц диборида хрома CrB_2 , при этом расплав предварительно раскисляют наноразмерным алмазграфитовым порошком фракции 60–75 нм в количестве 0,06–0,07 мас. %, после чего в расплав вводят реакционную смесь порошков хрома и бора в количестве 0,5–1,0 мас. %.

Из полученных цилиндрических слитков вырезали образцы для металлографических исследований. Съемку микроструктуры производили на микроскопе *AXIO Observer 40 MAT*. На рисунке 3.1 показаны макроструктура и микроструктура образца на основе меди.

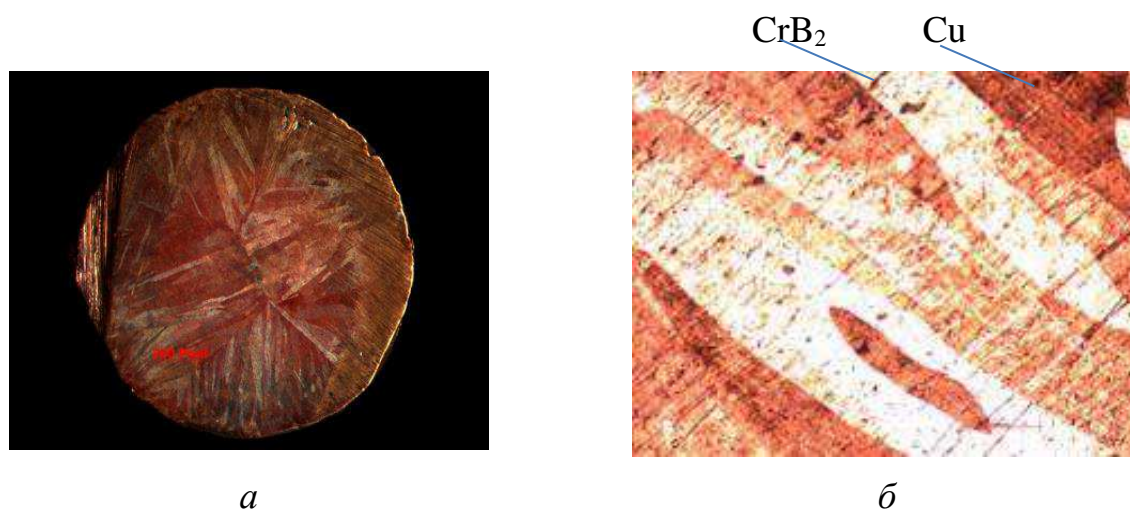


Рисунок 3.1 – Структуры ЛКМ, $\text{Cu}/0,5\% \text{CrB}_2$
a – макроструктура, $\times 2$; *б* – микроструктура, $\times 100$

Макроструктуры (*a*, *б*) образцов, приведенные на рисунке 3.1, показали, что независимо от количества в расплав бора и хрома она характеризуется столбчатым строением, но легирующие добавки меняют вид зерен.

Легирующие добавки направлены от поверхности в центр и имеют различное строение. Чем меньше содержание добавок, тем более вытянутую морфологию имеет зерно. При одинаковом содержании вводимых добавок некоторые различия в структуре образца связаны с особенностями охлаждения опытных образцов. Столбчатая структура имеет большую протяженность границ между структурными зонами и обладает анизотропией свойств и отрицательно сказывается на свойствах, особенно если эта заготовка будет подвергаться давлением.

Об этом свидетельствуют неравномерные значения твердости по сечению образцов, которые определяли на микротвердомере.

В таблице 3.2 представлены значения твердости по Виккерсу в структурных зонах образцов из дисперсно-упрочненных сплавов.

Таблица 3.2 – Значения твердости по Виккерсу в структурных зонах образцов из дисперсно-упрочненных сплавов

Маркировка образца и состав сплава	Твердость HV, кгс/мм ²							Среднее значение твердости
Cu–0,3 CrB ₂	70,1	69,6	69,3	63,4	68,8	77,9	68,5	69,6
Cu–0,5 CrB ₂	69,4	72,8	71,8	72,8	69,6	71,5	73,8	71,6
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 кг. Наибольшую твердость по Виккерсу HV имеет центр образца, а наименьшую – его поверхность. Среднее значение твердости исследуемых образцов находится в пределах 69,6–72,7 HV, что в 1,9 раза выше твердости литой меди без легирующих добавок. Исследование микроструктуры подтверждает столбчатое строение литых образцов. Столб-

чатые зерна имеют разную окраску, что связано с частичным растворением в меди легирующих компонентов.

Для уменьшения зоны столбчатых кристаллов и получения более мелкозернистой структуры необходимо применение модифицирования. Эффект модифицирования в значительной степени зависит от условий подготовки с целью получения однородного раствора, степени его переохлаждения и физико-химических свойств модификатора.

Модифицирование одним только рзм не позволяет достичь нужного результата по модифицированию матричного компонента(меди) поскольку при введении рзм происходит его окисление, а образующий оксид рзм не может быть модификатором меди, поэтому в качестве модификатора медной матрицы применили кадмиевую бронзу в количестве 0,1 % как модификатор 1 рода. Рзм является модификатором упрочняющей фазы поскольку адсорбируется на частицах деборида-хрома и предотвращает рост частиц упрочняющей фазы [13, 14]. Влияние комплексного модификатора на возможность получения мелкозернистой структуры матрицы и измельчения упрочняющей фазы исследовали на литых образцах из меди марки М1. Одновременно изучали роль перегрева расплава и скорости его охлаждения. Установлено, что высокий перегрев расплава меди до 1320 °С и последующей заливкой его в стальной кокиль способствует переходу от столбчатой структуры к округлой зернистой структуре, а при увеличении скорости охлаждения за счет расплава в водоохлаждаемый стальной кокиль, наблюдается измельчение кристаллической структуры (рис. 3.3).

При анализе микроструктуры образцов меди подтверждено положительное влияние предварительной подготовки расплава к модифицированию. Выявлено, что при введении в расплав меди модификатора на основе кадмия в количестве 0,1 мас. % и последующей заливки и затвердевания металла в водоохлаждаемом кокиле существенно измельчатся кристаллическая структура металлической матрицы. Добавка рзм в составе

комплексного модификатора позволяет измельчить упрочняющую фазу (деборид хрома) и способствует более равномерному распределению медной матрицы. На рисунках 3,2–3,3 представлена микроструктура образца дисперсно-упрочненного сплава.



Рисунок 3.2 – Микроструктура образца дисперсно-упрочненного сплава, модифицированного кадмием (0,1 %) и микролегированного РЗМ (0,1 %)

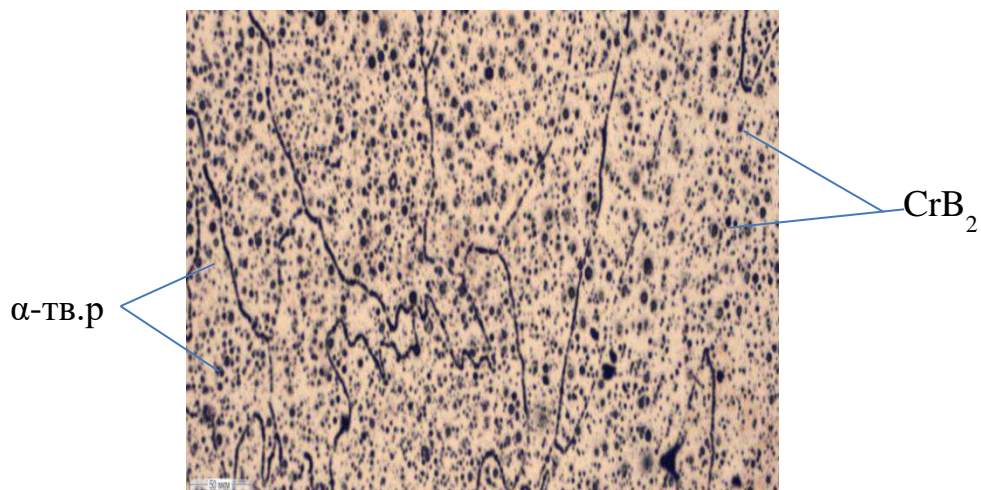


Рисунок 3.3 – Микроструктура образца дисперсно-упрочненного сплава.

Таблица 3.4 – Физико-механические свойства ЛКМ

№	Материал	Твердость HV, кгс	Прочность, σ_B , МПа	Средний размер зерна, мм	Удельное электросо- противление $\cdot 10^{-8}$ 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 + 0,5% CrB ₂ + 0,1% РЗМ + 0,1% Cd (деформированное состояние 60 %)	221	501	–	–	–

Полученные результаты способствовали получению литого композиционного материала на основе меди с улучшенной структурой и низким удельным электрическим сопротивлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано, совместное влияние модифицирование кадмиевой бронзой и РЗМ на формирование структуры и свойств электротехнической меди укрепленной дисперсными частицами диборида хрома.

Установлено, что модифицирование кадмиевой бронзой в количестве до 0,1 мас % измельчает зерно металлической основы композитного материала до среднего размера 0,15–0,35 мкм, а добавка в таком же количестве РЗМ способствует образованию в расплаве интерметаллидов Cu_6Se , которые адсорбируясь на поверхности частиц CrB_2 , представляют их укрепление за счет коагуляции. В результате твердость композитного сплава по сравнению с чистой медью возрастает на 40–49 %, при этом его прочность остается на достаточно высоком уровне. Деформационная обработка нового материала повышает твердость композита до 221 НВ, а прочность до 501 МПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Логинов, Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы : учебное пособие / Ю.Н. Логинов - Екатеринбург, 2004. - 136 с.
- 2 Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие/ А. К. Вершина [и др.]. - Минск: БГТУ, 2010. – 62 с.
- 3 Николаев, А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг – Москва : Metallurgia, 1983 - 175 с.
- 4 Осинцев, О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – Москва : Машиностроение, 2016 - 360 с
- 5 Справочник электротехнических материалов: 3-е изд. / В. Б. Березин [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с
- 6 Альтман А. Б. Металлокерамические контакты Cu-Cd и Ag- Cd. / А.Б. Альтман, Э.С. Быстрова // Вестник Научно-технического института железнодорожного транспорта - Москва - 1964, 285 – 290 с.
- 7 Бабкин В.Г. Литые металломатричные композиционные материалы электротехнического назначения /Бабкин В.Г., Терентьев Н.А., Перфильева А.И.// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии 4 (2014) – 416- 423 с.
- 8 Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев [и др.]. / под общ. Ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. - Москва. Машиностроение, 1990 - 512 с.
- 9 Солнцев Ю.П. Материаловедение: учебник для вузов /Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф. Войткун. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2007. - 781 с.
- 10 Сулицин А.В. Развитие теоретических и технологических основ производства литых заготовок из электротехнической меди: Дис, докт, техн. наук: 05. 16. 04./ Суцилин Андрей Владимирович - Екатеринбург, 2017. 372 с.

11 Березин, В. Б. Справочник электротехнических материалов: 3-е изд. / В. Б. Березин [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 399 с.

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

13 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.

14 S. SHEIBANI, S. HESHMATI-MANESH, A ATAIE. Synthesis of nano-crys- talline cu-cr alloy by mechanical alloying // International Journal of Modern Physics: Conference Series, 2012. Vol. 5. P. 496-501.

15 Толочин А. И. Анализ прочности и пластичности композитов Си - 35Сг и Си-65Сг, полученных прессованием в твердой фазе / А. И. Толочин, Е. В. Хоменко, А. В. Лаптев // Журнал : К.: ИПМ НАН Украины / Электрические контакты и электроды. – Украина, 2010. – С.189-197.

16 Пат. 2522584 Российская Федерация, МПК Н01Н 1/025, Н01Н 1/027, Н01Н 1/04, С22С 30/02. Способ изготовления материала для дугогасительных и разрывных электрических контактов / И. С. Гершман, Е. И. Гершман ; заявитель и патентообладатель Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский новый университет». – № 2013114045/04 ; заявл. 29.03.2013 ; опубл. 20.07.2014. – 6 с.

17 Ерёмина М. А. Композиты Си-карбид хрома, полученные с использованием механоактивации исходных компонентов в твердом и жидком состояниях / Ерёмина М. А. [и др.]. // Журнал : химическая физика и мезоскопия. – 2013. Т. 15, №2. – С. 262-269.

18 Metal and Ceramic Matrix Composites. Chapter 19. High-strength high-conductivity copper composites / Edited by Brian Cantor and Fionn Dunne and Ian Stone. IC Publishing Ltd. 2004. P. 425.

19 Бодрова Л. Е. Новые способы упрочнения хромовой бронзы / Бодрова Л. Е. [и др.]. // Журнал : перспективные материалы – 2014, № 9. – С. 66-72.


20 Бодрова Л. Е. Получение литых сплавов Cu-WC электротехнического назначения / Бодрова Л. Е. [и др.]. // Расплавы – 2010. №5. – С. 10-13.

21 Пат. 2412035 Российская Федерация, МПК В23К 35/40, В23К 11/30. Способ изготовления электродов для контактной сварки / С. Л. Бусыгин, А. И. Демченко, А. С. Рафальский ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение профессионального образования Сибирский Федеральный Университет – № 2010108888/02 ; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5. – 4 с.

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


« 28 » 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Направление: 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Влияние модифицирования и деформационной обработки на структуру и
твердость медноматричных композиционных материалов


Руководитель

28.06.21 

подпись, дата

В. Г. Бабкин


Выпускник

28.06.21 

подпись, дата

А. А. Никитин

Нормоконтролер

25.06.21 

подпись, дата

Л. А. Свечникова

Красноярск 2021