

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Кошмин Александр Николаевич

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО
ПРЕССОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ
ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор А.В. Зиновьев

Москва 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокие показатели электро- и теплопроводности в сочетании с пластичностью и отличной обрабатываемостью послужили применению меди и медных сплавов в качестве основного материала при изготовлении проводников электрического тока. Необходимость изготовления проводников, обладающих также и высокими прочностными свойствами, способствовала созданию сплавов меди, легированных различными элементами, среди которых наибольшее распространение получили Ag, Cd, Sn, Zr и Mg. Для изготовления контактных проводов, используемых в линиях электропередач высокоскоростных железнодорожных магистралей, оптимальным по набору прочностных свойств и электропроводности являются сплавы на основе меди, легированные магнием в количестве 0,2 и 0,5 % масс. К настоящему времени разработаны и обширно используются множество технологических процессов для деформации меди и сплавов на её основе. В производстве электрических проводников применяют как традиционные технологии, основанные на прямом или обратном прессовании, прокатке и волочении, так и современные процессы совмещающие принципы разных видов обработки давлением. Одним из примеров таких процессов является технология непрерывного прессования CONFORM, которая за счёт своей технологической гибкости и высокой энергоэффективности приобрела стремительное распространение на мини-предприятиях по всему миру в последние годы. Не смотря на достаточно широкое использование в промышленности, а также наличие множества научных исследований, посвящённых его особенностям, процесс непрерывного прессования CONFORM остаётся недостаточно изученным, особенно в вопросах касающихся эволюции микроструктуры и свойств при прессовании медных сплавов, технологических параметров и физико-механических процессов, развивающихся в очаге деформации. Отсутствие точных данных и результатов исследований посвящённых данным вопросам является причиной низкой контролируемости процессов структурного формирования и препятствует разработке механизма влияния на свойства прессуемых изделий из сплавов на основе меди.

Таким образом, актуальным представляется необходимость выполнения комплексного исследования особенностей процесса непрерывного прессования технической чистой меди и низколегированной магниевой бронзы, что позволит выявить основные характерные особенности процесса, такие как микроструктурная эволюция прессуемого материала, напряжённо-деформированное состояние в очаге деформации и температурные условия, определяющих в совокупности свойства готовых изделий.

Степень разработанности темы работы

Процесс непрерывного прессования CONFORM является сравнительно новым способом производства длинномерных профилей из медных и алюминиевых сплавов. Однако его принципы, основывающиеся на фундаментальных особенностях таких процессов интенсивной деформации, как скоростное прессование с активными силами предельного трения (СПАТ) и равноканальное угловое прессование (РКУП), достаточно широко раскрыты в работах В.Л. Бережного, Я.М. Охрименко, В.Н. Щербы, В.М. Сегала, Р.З. Валиева, Г.И. Рааба и других. Следует отметить работы С.Б. Сидельникова, Ю.В. Горохова, Н.Н. Довженко, Ю.Н. Логинова, В.Г. Шеркунова, И.Л. Константинова, а также учёных из стран Азии, Европы и Северной Америки, посвящённых исследованию процесса непрерывного прессования алюминиевых сплавов. Тем не менее вопросы структурообразования, эволюции физико-механических свойств и напряжённо-деформированного состояния материала в очаге деформации в процессе непрерывного прессования профилей из меди и сплавов на её основе в настоящее время раскрыты недостаточно, что подтверждает необходимость проведения дополнительных изысканий по данной теме.

Поддержка научных исследований

1. Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), (договор № 19-38-90104) по теме «Разработка научных основ эволюции микроструктуры непрерывно прессованных изделий из сплавов на основе меди для производства длинномерных проводников с заданными физическими и механическими показателями»;
2. Фонд содействия инновациям, конкурс «У.М.Н.И.К.», (договор № 14903ГУ/2019) по теме «Разработка технологии непрерывного производства контактного провода из медных сплавов для высокоскоростных магистралей».

Цели и задачи работы

Целью диссертации является проведение комплексного исследования процесса непрерывного прессования длинномерных изделий из сплавов на основе меди для усовершенствования технологии производства электрических проводников.

Для достижения цели определены следующие задачи исследования:

- изучить реологические свойства меди марки М1 и медномагниевого бронзы CuMg 0,2 и CuMg 0,5;

- выполнить экспериментальные исследования эволюции структуры и механических свойств материала в очаге деформации в процессе непрерывного прессования прямоугольных шин и прутков из меди М1;

- с использованием компьютерного моделирования исследовать напряжённо-деформированное состояние и изучить особенности развития процессов рекристаллизации в очаге деформации при прессовании меди по технологии CONFORM;

- изучить степень влияния температурно-скоростных параметров процесса непрерывного прессования на формирование функциональных свойств длинномерных проводников из меди М1;

- обосновать выбор материала для изготовления контактных проводов ВСМ по технологии непрерывного прессования CONFORM;

- исследовать закономерности формирования микроструктуры и функциональных свойств сплава CuMg 0,2 в процессе производства контактного провода фасонного сечения;

- разработать план мероприятий по совершенствованию процесса производства длинномерных электрических проводников из технической чистой меди для расширения возможностей управления их качеством;

- разработать рекомендации по совершенствованию технологии производства контактного провода для высокоскоростных магистралей из медномагниевого сплава CuMg 0,2 с требуемым уровнем эксплуатационных свойств.

Научная новизна работы

1. Расчетно-экспериментальными методиками подтверждены известные сведения о характере упрочнения технической чистой меди М1 в процессе деформации. Получены новые данные о реологии медномагневых сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5. Определён характер деформационного упрочнения данных сплавов в широком диапазоне температурно-скоростных параметров деформации.

2. Установлена зависимость характера структурообразования меди М1 в процессе прессования от конфигурации рабочего инструмента прессового оборудования, температурных условий и напряжённо-деформированного состояния материала в очаге деформации. Область упора в пресс-камере определена не только как очаг интенсивного дробления литой структуры, но и как центр развития рекристаллизационных процессов.

3. Подтверждена возможность непрерывного прессования сплава CuMg 0,2 по технологии CONFORM. Исследование образцов прессованных круглых прутков позволили выявить формирование неравномерной, частично рекристаллизованной структуры сплава, при сопутствующих низких показателях его прочности.

4. Экспериментально установлено, что относительная деформация при комнатной температуре непрерывно-прессованной заготовки на величину 30 – 40 % достаточна для придания сплаву CuMg 0,2 структуры, характеризующейся вытянутыми зёрнами, и прочности, соответствующей требованиям стандарта для контактных проводов.

Практическая значимость работы

1. Экспериментально и теоретически установлено, что изменение скорости непрерывного прессования в диапазоне 4 – 6 м/мин не оказывает существенного влияния на формирование свойств готовых изделий. Отмеченное практически исключает возможность управления свойствами проводников из меди путём варьирования скоростных параметров непрерывного прессования в указанном диапазоне.

2. Предложены рекомендации по совершенствованию технологии производства длинномерных проводников из меди М1, поставляемых в мягком состоянии. Они состоят во включении в технологический процесс термической обработки изделий в колпаковых печах, для получения изделий с твёрдостью, не превышающей 65 НV. Результаты исследований приняты ООО «Свелен» (г. Санкт-Петербург) для совершенствования производства проводников из меди и её сплавов по технологии непрерывного прессования.

3. Разработаны рекомендации по модернизации линий непрерывного прессования CONFORM. Модернизация включает дооснащение их блоками роликовых волок, предназначенных для двукратного волочения непрерывно-прессованной заготовки в готовый контактный провод сечением 150 мм² из сплава CuMg 0,2 с заданным уровнем функциональных свойств.

4. Результаты исследований используются при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по курсам «Инжиниринг основных технологий и оборудования ОМД», «Совмещённые процессы деформационно-термической обработки», «Инновационные комплексы и модули оборудования ОМД» а также в курсовом проектировании и при выполнении выпускных работ студентов бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Реологические особенности деформации сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 в диапазоне температур 25, 350 – 950 °С, скоростей деформации 0,000316 – 34,6 с⁻¹ и накопленной степени деформации 0,1 – 0,95.

2. Закономерности формирования микроструктуры и механических свойств меди М1 в процессе непрерывного прессования круглых прутков и прямоугольных шин.

3. Характер развития процессов рекристаллизации и напряжённо-деформированное состояние сплавов на основе меди в очаге деформации процесса CONFORM.

4. Рекомендации о включении в технологию производства мягких шин и прутков из меди М1 операции отжига для приведения свойств материала в соответствие с требованиями стандарта.

5. Обоснование выбора материала марки CuMg 0,2 контактного провода для применения в электрифицированных линиях высокоскоростных железнодорожных магистралей.

6. Режимы деформации непрерывно-прессованной заготовки из медномагниевого сплава CuMg 0,2 и конструкция инструмента для производства контактного провода высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ).

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается высокой корреляцией результатов конечно-элементного моделирования в программе QForm и экспериментов, выполненных с применением современных исследовательских методик и лабораторного оборудования. О надёжности результатов свидетельствует их повторяемость и сопоставимость с результатами, изложенными в литературных источниках. Текст диссертации и автореферата проверен в системе "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

Личный вклад автора

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной лично автором. Автору принадлежит основная роль в выполнении экспериментальных работ, проведении компьютерного моделирования, обработке полученных данных и анализе итоговых результатов. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Результаты работы доложены на межвузовской и институтской научно-технической конференции «72-е дни науки студентов НИТУ «МИСиС» (Москва, 2017); международной конференции MEFORM 18 «Resource Efficient Materials and Forming Technologies» (Фрайберг, Германия, 2018); XII международном конгрессе прокатчиков (Выкса, 2019); пятой международной молодежной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2020» (Магнитогорск, 2020); международной конференции MEFORM 2021:

«Materials Data for Smart Forming Technologies» (Фрайберг, Германия, 2021). Исследования, выполненные в рамках темы диссертации, отмечены дипломом конкурса «Молодые ученые 2019» международной промышленной выставки «Металл-Экспо».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, 5 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 5 – в базах Web of Science/Scopus. Все опубликованные статьи входят в базу данных РИНЦ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав и выводов, изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков, 10 таблиц и библиографический список из 93 наименований.

Благодарность

Автор выражает признательность научному руководителю, руководству и коллективу кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» за поддержку и помощь в выполнении научных исследований, а также к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры МЦМ НИТУ «МИСиС» Коротичкому А.В. за помощь в проведении испытаний реологии магниевых бронз.

Автор благодарит д.т.н., профессора Часникова Александра Яковлевича за постоянное организационно-консультативное содействие в выполнении и обсуждении результатов металлографических исследований (главы 3 и 4).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, представлены цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложен литературный обзор материалов и способов производства электрических проводников. Отмечено, что физико-механические свойства меди и сплавов на её основе послужили обширному распространению их применения в качестве материала проводников широкого ряда функционального назначения. Рассмотрены типовые технологические схемы производства проводников из меди и сплавов на её основе. Среди всех типовых технологий выделены две традиционные схемы, получившие наибольшее распространение на заводах по обработке цветных металлов (ОЦМ): горячее прессование и

дальнейшее волочение профилей, и горячая прокатка в многоклетевых прокатных станах. Проведён обзор создания и развития совмещённых и непрерывных технологических процессов производства длинномерных изделий. Среди рассмотренных способов, наибольшее распространение в промышленности и производстве проводников из меди и её сплавов снискала технология CONFORM. Широкое применение данный процесс получил на мини-предприятиях и микро-металлургических заводах. Выполнен обзор низколегированных медных сплавов (бронз), которые составляют особую группу сплавов, характеризующихся высокой электро- и теплопроводностью, при достаточно высоких показателях прочности и пластичности. Среди прочих проанализированных марок бронз наиболее подходящими для производства контактного провода (основной детали контактной сети электрифицированных высокоскоростных железнодорожных магистралей) определены сплавы меди и магния – CuMg 0,2 и CuMg 0,5.

Во второй главе представлена система отбора темплетов и подготовки образцов, рассмотрены методы экспериментальных и теоретических исследований. В качестве материалов исследования выбраны технически чистая медь марки М1 и медномагниевого сплавы CuMg 0,2 и CuMg 0,5, приведён анализ их химического состава (таблица 1), свойств и макроструктуры литых образцов. Выполнено краткое описание принципа работы пластометрического комплекса «Gleeble System 3800» и методики проведения исследования сопротивления деформации меди марки М1 и сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5. Выбраны методы экспериментальных исследований литой и деформированной структуры образцов, такие как рентгеноструктурный анализ, дифракция отражённых электронов, которые необходимы для решения поставленных в работе задач. Отмечено, что они являются прогрессивными методами исследования, обеспечивающими получение результатов высокой точности и информативности. Сочетание выбранных методик с математическим и компьютерным конечно-элементным (КЭ) моделированием позволило достаточно подробно изучить и проанализировать особенности процесса непрерывного прессования длинномерных проводников из сплавов на основе меди.

Таблица 1 – Химический состав материалов исследования

Сплав	Элемент	Масс. %	Атом. %
М1	Cu, не менее	99,90	–
	Примеси	0,10	–
CuMg 0,2	Cu	99,77	99,39
	Mg	0,23	0,61
CuMg 0,5	Cu	99,47	98,62
	Mg	0,53	1,38

В третьей главе представлено исследование реологических свойств меди М1 и медномагниевого сплава CuMg 0,2 и CuMg 0,5. Для возможного уточнения литературных данных и анализа степени влияния технологических параметров литья на прочностные характеристики меди марки М1, формируемые при дальнейшей деформации, проведены испытания реологии литых прутков, полученных по технологии литья вверх при скоростях вытягивания 300 и 500 мм/мин. Цилиндрические образцы подвергали одноосному сжатию при температуре 480 °С и скорости деформирования 75 мм/с. Результаты реологического исследования свидетельствуют о высокой сходимости экспериментальных данных с литературными, а также демонстрируют низкую степень влияния условий литья и кристаллизации меди на её прочностные свойства при деформации. Таким образом установлено, что данные временного сопротивления меди М1, приведённые в литературе, не нуждаются в уточнении и могут быть использованы как в математических расчётах, так и в расчётах процессов деформации посредством компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Исследование реологии сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 выполняли в диапазоне температур испытания 500 – 900 °С, скоростей деформации 0,01 – 10 с⁻¹ и степени деформации 0,01 – 0,95. В результате эксперимента и математической обработки полученных данных, было получено 119 кривых деформации для каждого сплава, частично представленных на рис. 1. Анализируя полученные кривые временного сопротивления сплавов CuMg 0,2, отмечается значительное упрочнение, которое проявляется наиболее заметно при низких температурах и высоких скоростях деформации. При скорости деформации 10 с⁻¹ и температуре 600, 700 и 800 °С наблюдается неустойчивость формирования временного сопротивления материала от степени накопленной деформации. Эта осцилляция кривой связана с более интенсивным протеканием в металле процесса динамической рекристаллизации, носящей в данном случае циклический характер, а также погрешностью прибора, связанной с более интенсивным теплообменом образца с бойками. Полученные данные использовали при задании граничных условий КЭ-модели процесса непрерывного прессования сплава CuMg 0,2. На основании выполненного анализа физико-механических свойств магниевого бронзы и результатов изучения их реологии в качестве материала для дальнейших исследований технологических процессов производства контактного провода был выбран сплав CuMg 0,2. Основанием для такого решения послужило более оптимальное сочетание характеристик прочности и электропроводности данного сплава и меньшее, по сравнению с CuMg 0,5, временное сопротивление при деформации в диапазоне температур 500 – 700 °С.

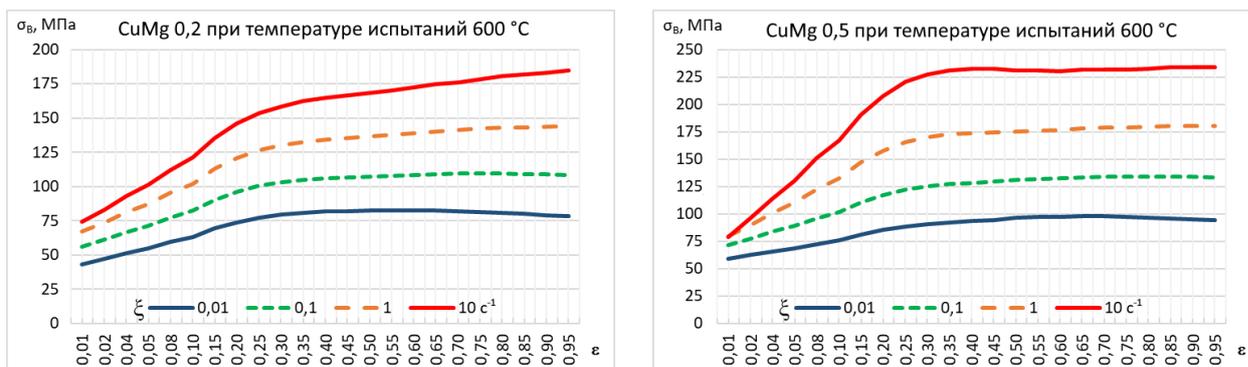


Рисунок 1 – Зависимость временного сопротивления сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 от скорости и степени деформации

В четвертой главе изложены результаты комплексного исследования особенностей формирования структуры, механических свойств, напряженно-деформированного состояния и условий рекристаллизации меди М1 в очаге деформации в процессе непрерывного прессования прямоугольных шин и прутков. Исследования выполняли применительно к прессованию прутков круглого сечения диаметром 8, 24 и 30 мм и прямоугольных шин размерами 10×30, 10×60, 10×80, 10×100 мм. В процессе прессования были обеспечены следующие коэффициенты вытяжки: 18,60 – в случае прессования прутка диаметром 8 мм; 4,35 – в случае прессования прутка диаметром 24 мм; 2,05 – при прессовании прутка диаметром 30 мм; 3,33 – в случае прессования шины размерами 10×30 мм; 2,75 – в случае прессования шины размерами 10×60 мм; и 2,50 – при прессовании шин остальных типоразмеров. Структура заготовки – литого прутка, вдоль направления литья в центральном сечении, характеризуется крупным размером зёрен (рис. 2, а), величина которых достигает 800 – 1000 мкм.

После соответствующей подготовки изучали микроструктуру образцов в условных областях очага деформации: в центре пресс-камеры (рис. 2, б), перед входом в матрицу (рис. 2, в) и в области отпрессованного профиля (рис. 2, г). Установлено, что общие закономерности формирования их структуры на участках перед матрицей и после нее, в общем, идентичны. Полученные снимки микроструктуры свидетельствуют о повсеместном измельчении литой структуры в пресс-камере до 35 – 40 мкм. При продвижении металла к матрице с заданной конфигурацией и истечения из нее появляется определенная ориентировка зерен в направлении прессования и возникает подобие текстуры рекристаллизации с сохранением средней величины зерна – 40 мкм.

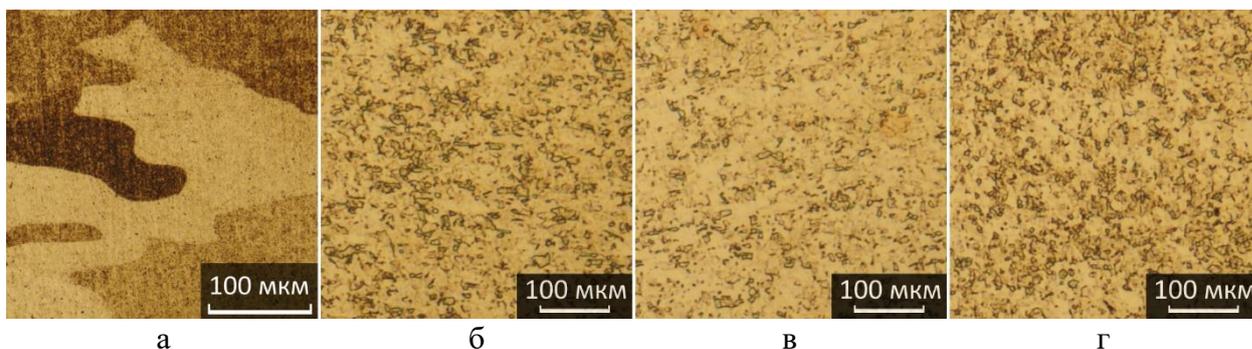


Рисунок 2 – Эволюция структуры меди М1 в процессе прессования прутка диаметром 30 мм: а – литой пруток, б – пресс-камера, в – перед входом в матрицу, г – после матрицы

Измерение твёрдости показало, что перед подачей в наполнительную камеру, твёрдость литого прутка составляет 56,8 HV. Твёрдость прутка диаметром 8 мм в накопительной камере, перед входом в матрицу, составляет 98 HV. В результате действия интенсивной деформации, оказываемой на металл в процессе прессования CONFORM, и выделения при этом деформационного тепла, металл разогревается и его твёрдость снижается до 90,8 HV. Результаты измерений микротвёрдости вдоль линии центрального сечения прутка диаметром 24 мм и шин размерами 10×30, 10×60 и 10×80 мм имеют схожий вид с изменением твёрдости прутков диаметром 8 мм. Так, перед входом в матрицу обнаруживается максимум значений твёрдости, который затем, по мере прохождения матрицы, снижается. Однако при прессовании прутка диаметром 30 мм и шины размером 10×100 мм закономерности изменения твёрдости материала существенно отличаются, что связано со значительным объёмом металла, находящимся в пресс-камере в данном случае.

Более подробное изучение характера эволюции микроструктуры и напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации выполняли для случая прессования прямоугольной электротехнической шины размером 10×60 мм. Для изучения НДС в очаге деформации осуществляли компьютерное моделирование. На рис. 3 приведены поля распределения накопленной деформации, скорости деформации и средних напряжений по очагу деформации. На стадии заполнения металла калибра колеса накопленная деформация составляет всего 0,5 – 1, однако по достижении заготовкой упора её величина резко возрастает до средних значений 50 – 100, при максимуме – 350, который проявляется непосредственно на участке контакта заготовки и упора. Картина распределения скорости деформации в пресс-камере отчётливо свидетельствует о том, что деформация металла происходит не только в зоне упора и входа в матрицу, но также и на входе в пресс-камеру в области «распрессовки» заготовки. В точке, расположенной на контакте с упором, рядом с участком отвода облоя, наблюдается максимум сжимающих

напряжений, равный -1419 МПа, и являющийся причиной возникновения центра роста температуры в пресс-камере.

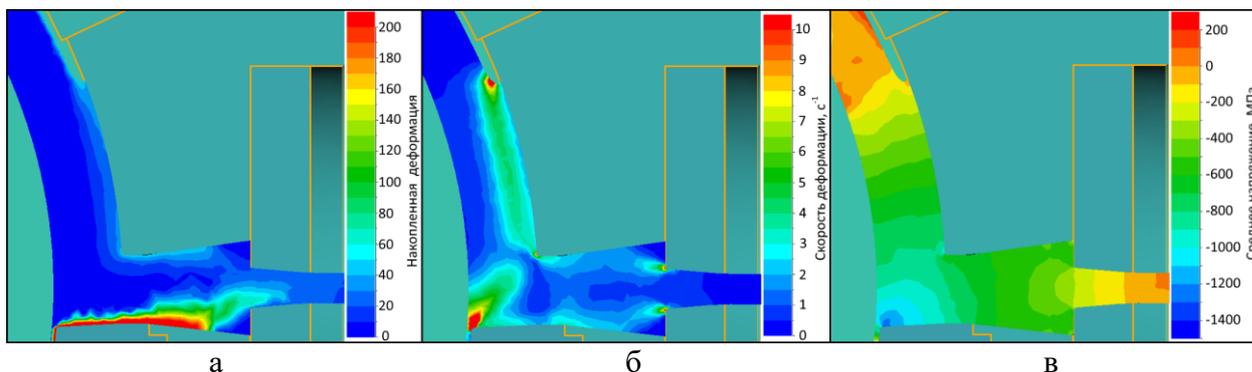


Рисунок 3 – Распределение накопленной деформации (а), скорости деформации (б) и средних напряжений (г) в вертикальном центральном сечении очага деформации

EBSD-анализ структуры образца, отобранного из центрального сечения пресс-остатка и разбитого на участки упора, начала пресс-камеры, расширяющейся форкамеры и матрицы (рис. 4) показал, что в процессе прохождения прессуемым материалом области упора происходит наиболее интенсивное дробление его литой структуры, средний размер зерна здесь в основном не превышает 10 мкм. На последующих участках, вследствие действия высокой температуры, отмечается общее увеличение среднего размера зёрен. Так, в области пресс-камеры происходит наиболее ярко выраженное её укрупнение и средний размер зерна здесь уже составляет 38 мкм. В ходе продвижения металла вдоль очага деформации его структура вновь частично измельчается и средний размер кристаллов составляет 18 и 23 мкм на участках форкамеры и матрицы соответственно.

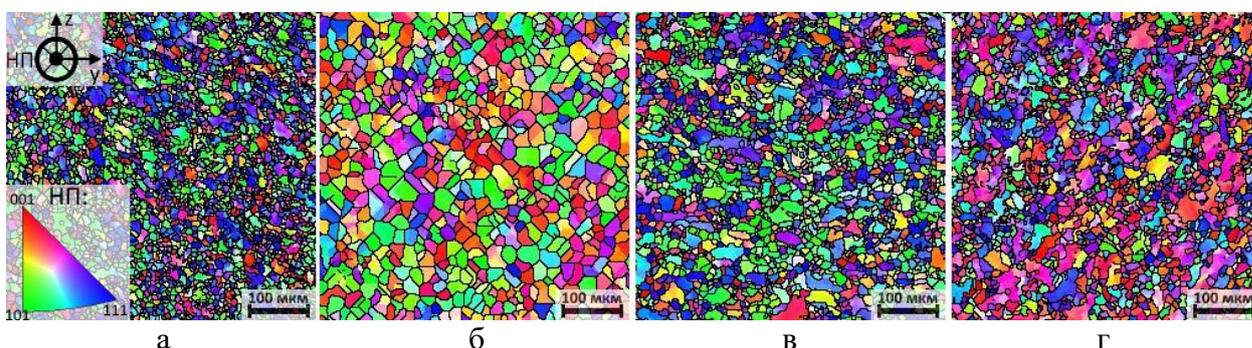


Рисунок 4 – EBSD-снимки структуры меди марки М1 в следующих областях очага деформации: а – близ упора, б – пресс-камера, в – форкамера, г – матрица

Рис. 5 иллюстрирует результаты анализа деформированного и рекристаллизованного состояния материала, выполненного посредством ДОЭ-

микроскопии. В зоне упора структура материала в большей мере (на 77,7 %) состоит из деформированного зерна. По доле рекристаллизованной структуры можно считать, что процессы рекристаллизации здесь только начинают своё развитие. Далее, по ходу продвижения металла в пресс-камеру, повышения его температуры и снижения действующих на него сжимающих напряжений происходит обширная рекристаллизация, сопровождаемая отмеченным ранее ростом зёрен. На участке форкамеры наблюдается сохранение количества деформированной фракции и увеличение количества субструктуры, отражающей переход от рекристаллизованного состояния в деформированное. При прохождении прессуемого материала матрицы и формировании в нём определённой, присущей процессам ОМД, текстуры, происходит вполне закономерный рост числа зёрен, находящихся в деформированном состоянии (до 65,7 %).

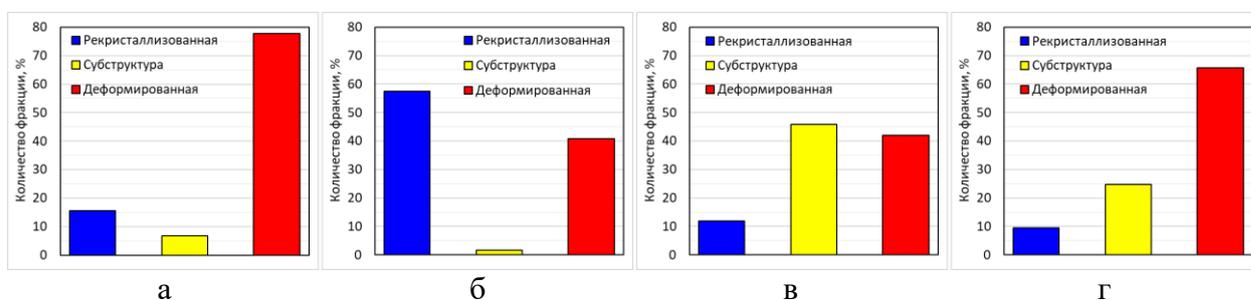


Рисунок 5 – Диаграммы рекристаллизованной фракции меди марки М1 в следующих областях очага деформации: а – близ упора, б – пресс-камера, в – форкамера, г – матрица

На основании полученных результатов исследования структуры и свойств в очаге деформации процесса CONFORM выполняли опытную работу, направленную на изучение возможности управления физико-механическими процессами, имеющими место при прессовании технически чистой меди. Для этого осуществляли КЭ-моделирование процесса и эксперимент по прессованию медных шин размером 10×60 мм из литых заготовок, полученных при разной скорости вытягивания из расплава ($v_{\text{в}} = 300$ и 500 мм/мин), по двум (4 и 6 м/мин) вариантам скорости подачи заготовки в очаг деформации ($v_{\text{п}}$). Результаты моделирования подтверждают, что центром роста температуры металла является участок контакта заготовки с упором. Отмечено, что при увеличении скорости прессования до 6 м/мин средняя температура металла в очаге деформации увеличивается на 40 °С, что приводит к снижению действующих в пресс-камере напряжений на 20 %. На рис. 6 приведены снимки микроструктуры в их центральной части прессованных шин. Существенного влияния скорости литья и прессования на формирование микроструктуры не наблюдается, что объясняется глобальной перестройкой (разрушением) литой структуры

и динамической рекристаллизацией, развивающейся в очаге деформации под действием высокой температуры. Размер зерна в образцах составляет 15 – 30 мкм.

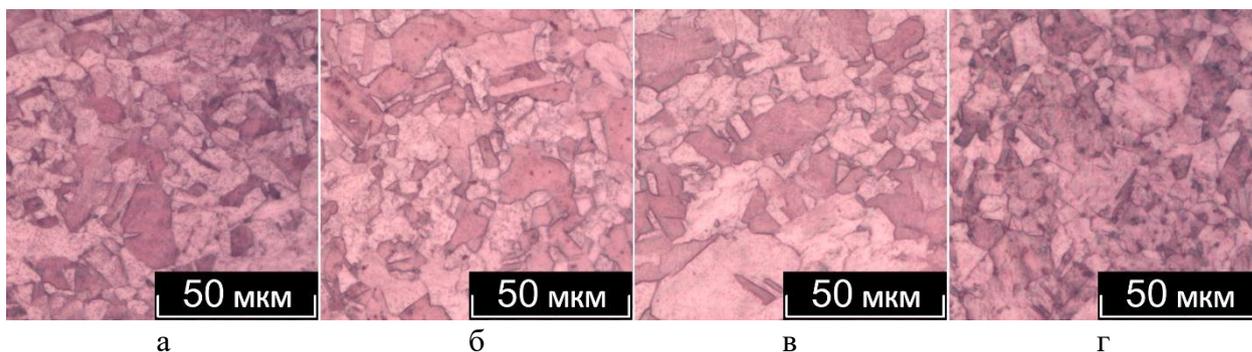


Рисунок 6 – Микроструктура шин в центральном продольном сечении при следующих скоростях литья ($v_{\text{в}}$) – прессования ($v_{\text{п}}$): а) 300 мм/мин – 4,5 м/мин; б) 300 мм/мин – 6 м/мин; в) 500 мм/мин – 4,5 м/мин; г) 500 мм/мин – 6 м/мин

Результаты измерений твёрдости образцов показали, что имеются незначительные тенденции к росту твёрдости на краях шины, что можно объяснить более интенсивным охлаждением металла при контакте с матрицей, подтверждаемым результатами моделирования. Средняя твёрдость шин составила 66 – 68 HRV (таблица 2). При увеличении скорости прессования отмечается незначительное снижение твёрдости, в среднем на 1 – 2 единицы. Измерение электропроводности образцов также показало аналогичные результаты. Например, вне зависимости от скорости литья и прессования электропроводность литых образцов составила 93 % IACS (международный стандарт отожжённой меди «Annealed Copper Standard»), а образцов, прессованных на установке CONFORM – 96 % IACS. Таким образом, рассмотренные в пределах технологических возможностей оборудования скорости обработки следует считать сопоставимыми в части влияния на формирование структуры материала.

Таблица 2 – Твёрдость и электропроводность образцов литых прутков и прессованных шин из меди марки М1, произведенных по разным скоростным режимам

Изделие	Микротвёрдость HV^1	Электропроводность, МСм/м	% IACS
Литой пруток, $v_{\text{в}}$ 300 мм/мин	54,0	53,92	93
Литой пруток, $v_{\text{в}}$ 500 мм/мин	48,0	54,44	94
Шина ($v_{\text{в}}$ 300 мм/мин; $v_{\text{п}}$ 4 м/мин)	67,0	55,68	96
Шина ($v_{\text{в}}$ 300 мм/мин; $v_{\text{п}}$ 6 м/мин)	66,8	55,36	95
Шина ($v_{\text{в}}$ 500 мм/мин; $v_{\text{п}}$ 4 м/мин)	69,0	55,60	96
Шина ($v_{\text{в}}$ 500 мм/мин; $v_{\text{п}}$ 6 м/мин)	65,2	55,76	96

В пятой главе приведены результаты моделирования процессов горячего прессования и волочения контактного провода ВСМ, и исследования особенностей формирования микроструктуры и свойств сплава CuMg 0,2 в процессе непрерывного прессования и волочения. В результате моделирования традиционной технологии изготовления контактного провода получены картины распределения накопленной деформации на этапах горячего прямого прессования заготовки диаметром 20 мм из литого круглого слитка диаметром 60 мм и пятикратного волочения. Полученные данные демонстрируют, что в центральной части провода в результате комбинации указанных операций достигается низкий уровень накопленной пластической деформации, равный 2,1. Затем выполняли моделирование непрерывного прессования CONFORM прутковой заготовки диаметром 20 мм в готовый фасонный провод сечением 150 мм² на длину 100 мм. В данном случае накопленная деформация в объёме контактного провода характеризуется гораздо большими значениями и наибольшим уровнем её однородности по сечению изделия. Исследование микроструктуры образцов сплава CuMg 0,2 показало, что в результате непрерывного прессования в материале образуется частично рекристаллизованная структура, состоящая преимущественно из округлых неравноосных зёрен. Операция пятикратного волочения после прессования позволяет осуществить пластическую деформацию с формированием существенно вытянутой в направлении деформации зёрненной структуры. Анализ механических свойств образцов дал вполне ожидаемые результаты (таблица 3). Твёрдость и временное сопротивление образцов непосредственно после прессования CONFORM невысокие, относительно мало отличаются от прочностных свойств литых образцов и составляют 62 HV и 198,5 МПа соответственно. Образцы после пятикратного волочения характеризуются гораздо большей прочностью. Их твёрдость и временное сопротивление составляют 133 HV и 426 МПа, соответственно. Полученные результаты позволяют заключить, что свойства материала, получаемые в ходе непрерывного прессования, не удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 55647-2018 к прочности контактных проводов, и такой материал не может быть использован для их производства без операций холодной деформации после прессования.

Для определения величины деформации, достаточной для придания требуемого уровня свойств заготовкам, произведённых по технологии CONFORM, был проведён ряд экспериментов, моделирующих процесс волочения. Для этого из непрерывно-прессованных прутков вырезали квадраты с разной длиной сторон для деформации в закрытом калибре прокатного стана со степенью относительного обжатия 10, 20, 30 и 40 %. Микроструктура полученных образцов (рис. 7) свидетельствует о постепенном измельчении зерна и его вытягивании с ростом величины накопленной деформации.

Результаты измерения их твёрдости и временного сопротивления (таблица 3) свидетельствуют о значительном (почти в 2 раза) упрочнении сплава CuMg 0,2 уже при достижении относительной деформации 10 %, по сравнению с прессованным состоянием материала. При дальнейшем увеличении степени обжатия темп прироста прочности материала снижается и временное сопротивление составляет 404, 421,5 и 425,5 МПа при относительной деформации 20, 30 и 40 % соответственно. Электропроводность образцов с увеличением степени деформации постепенно снижается до 84 % IACS при достижении относительной деформации 40 %. Следует отметить, что достигнутый уровень прочностных и электрических характеристик удовлетворяет требования ГОСТа для контактных проводов из сплава CuMg 0,2.

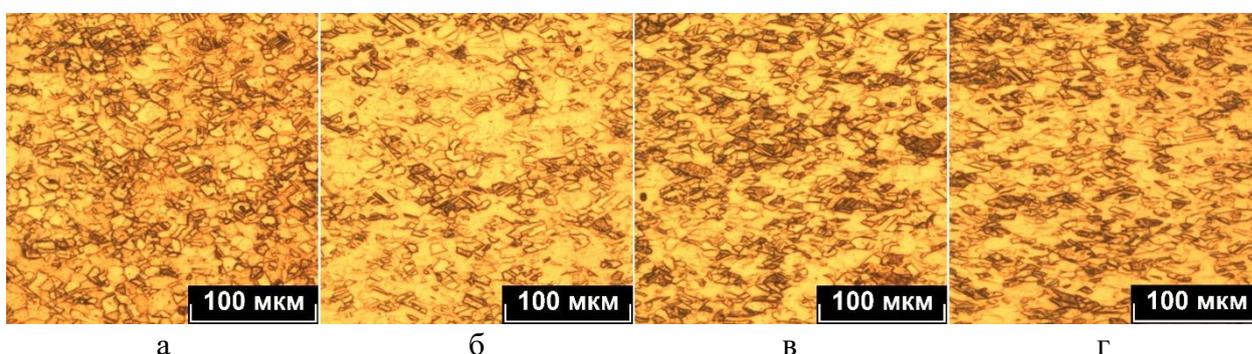


Рисунок 7 – Микроструктура в центральном продольном сечении образцов после относительной деформации на: а – 10 %; б – 20 %; в – 30 %; г – 40 %

Таблица 3 – Механические и электрические свойства образцов из сплава CuMg 0,2 после разных видов обработки

Образец	Твёрдость HV ¹	Временное сопротивление, МПа	Электро- проводимость,	
			МСм/м	% IACS
Литой пруток Ø 20 мм	54,8	–	50,7	87,4
Прессованный пруток Ø 20 мм	62,1	198,6	50,4	86,9
Контактный провод сечением 150 мм ² после 5-кратного волочения	133,6	426,1	48,3	83,3
Прессованный, после холодной деформации с $\varepsilon_{отн} = 10\%$	119,9	385,1	49,9	86,0
Прессованный, после холодной деформации с $\varepsilon_{отн} = 20\%$	126,4	404,1	49,7	85,7
Прессованный, после холодной деформации с $\varepsilon_{отн} = 30\%$	132,0	421,5	49,3	85,0
Прессованный, после холодной деформации с $\varepsilon_{отн} = 40\%$	133,5	425,5	48,9	84,3

В шестой главе осуществлён анализ результатов выполненных исследований, на основе которого разработаны и рекомендованы к использованию в промышленности мероприятия по совершенствованию технологии непрерывного прессования длинномерных проводников из меди и медномагниевого сплава CuMg 0,2. Установлено, что получаемые в процессе непрерывного прессования изделия из меди М1 соответствуют лишь полутвёрдому состоянию, регламентированному требованиями ГОСТа 1535-2006. При производстве и реализации изделий в мягком состоянии их дополнительная обработка не производится и полуфабрикаты отпускаются потребителям в состоянии, несоответствующем требованиям стандарта. Приведённые в главе 4 результаты исследования влияния параметров прессования на формирование свойств изделий из меди свидетельствуют о слабой возможности управления свойствами готового материала в процессе деформации. В данном случае единственно-верным решением представляется совершенствование процесса производства длинномерных проводников из меди путём дополнения ряда технологического оборудования линий непрерывного прессования печами для проведения рекристаллизационного отжига изделий. Исходя из известных технологических режимов термической обработки технической чистой меди, а также особенностей планировки мини-предприятий с линиями непрерывного прессования CONFORM, предложено осуществить дооснащение цехов непрерывного прессования колпаковыми печами для отжига. Предложены конструкция печи и режим отжига в защитной среде, разработан эскиз схемы цеха с добавленным оборудованием.

Применительно к производству контактного провода ВСМ сечением 150 мм² разработаны рекомендации по совершенствованию технологии его изготовления с целью получения готового изделия непосредственно на линиях CONFORM. Решение данной задачи позволяет упростить и удешевить процесс производства провода благодаря исключению дискретных операций многократного волочения. Соответственно предложена корректировка деформационного режима. Корректировка включает в прессование на установке CONFORM фасонного провода (рис. 8) и дальнейшую его деформацию в двух блоках роликового волочильного устройства с суммарной относительной деформацией 30 %, что достаточно для придания проводу требуемого уровня прочности.

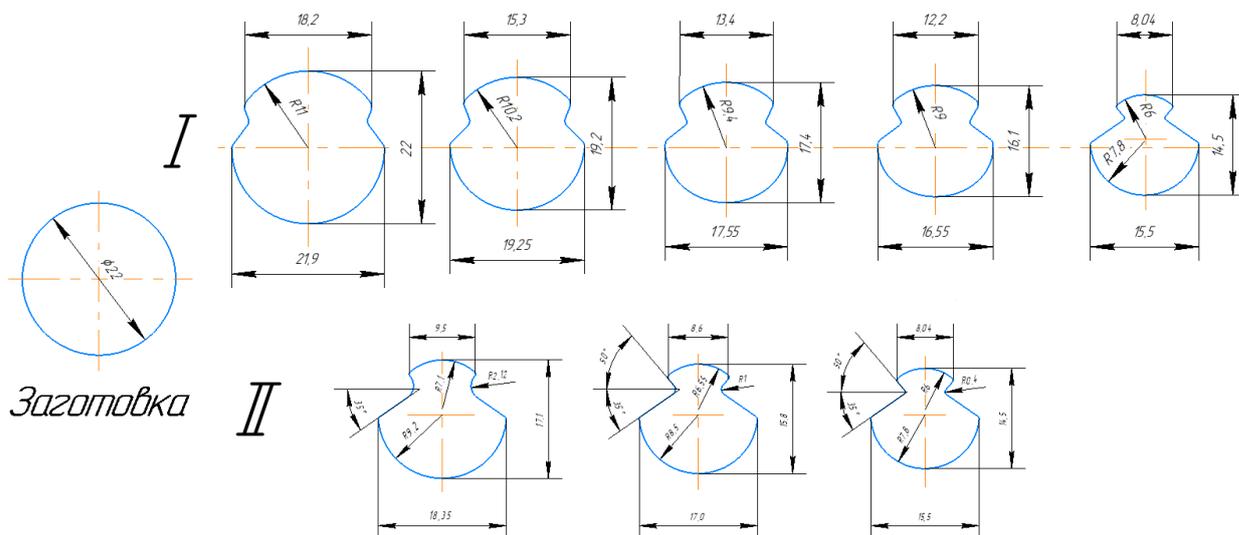


Рисунок 8 – Последовательность операций деформации при производстве контактного провода: I – пятикратное волочение прессованной заготовки; II – непрерывное прессование литой заготовки и двукратное волочение

Для выполнения деформации непрерывно-прессованного полуфабриката контактного провода рекомендована трёх роликовая схема компоновки волочильной установки, что обусловлено известными преимуществами волочения в роликовых калибрах по сравнению с монолитными волоками. Для реализации схемы в работе рекомендовано волочение в две стадии в последовательно расположенных волоках, при этом для предупреждения возникновения рассогласования скоростей деформации и устранения действия натяжения и противонапряжения (приводящих к возникновению утяжек) рекомендовано использовать петленакопитель между волоками. Для обеспечения стабильного тянущего усилия рекомендовано в линию роликового волочильного устройства установить тянущее устройство усилием 1800 кг. Разработанная модель инструмента роликовой установки предполагает использование трёх роликов, выполненных из инструментальной стали (например 9Х1) и установленных в станину посредством крепления в узлах роликотопшпниковых опор. Проверку работоспособности разработанных решений выполняли в программном комплексе КЭ-моделирования. С использованием моделей созданного инструмента, а также реологических свойств материала CuMg 0,2, полученных в ходе пластометрических испытаний, разработана модель технологического процесса производства контактного провода, состоящая из операций непрерывного прессования и двух операций волочения в роликовых волоках. Путём моделирования получены расчётные значения усилия прессования и момента вращения на рабочем колесе, а также температурный градиент материала в очаге деформации. Значения накопленной деформации (рис. 9), обеспечиваемой в ходе

моделирования разработанной технологии, свидетельствуют о возможности значительного увеличения однородности свойств контактного провода по его сечению.

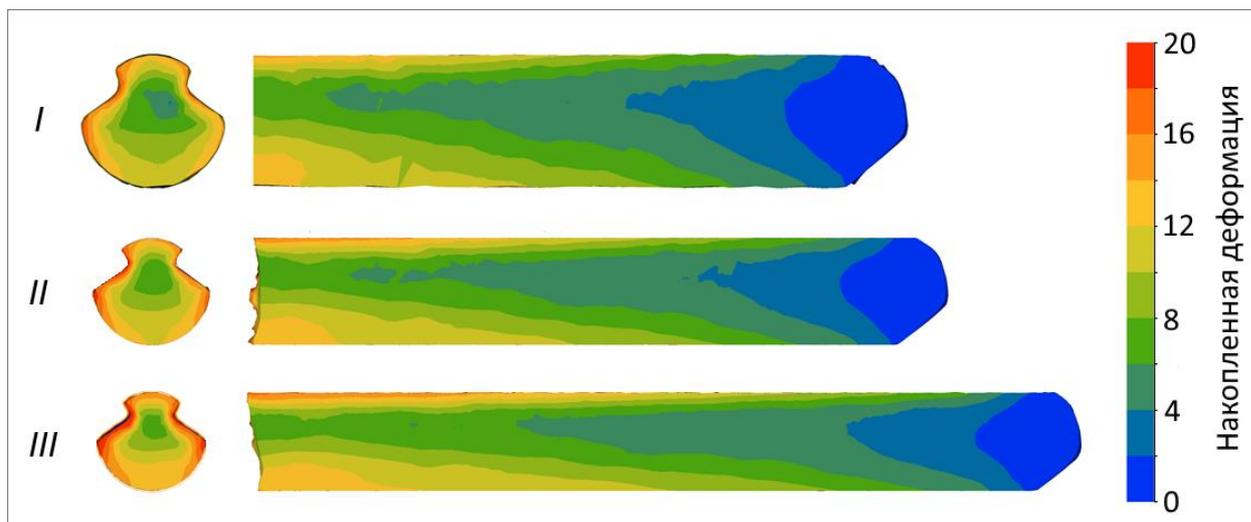


Рисунок 9 – Распределение накопленной деформации материала в поперечном и продольном сечениях провода после: I) непрерывного прессования; II) волочения в первом блоке; III) волочения во втором блоке

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследование реологических особенностей деформации меди М1 показало, что скоростные условия процесса литья не оказывают влияние на формирование прочностных характеристик материала, а известные значения временного сопротивления меди М1, приведённые в литературе, не нуждаются в уточнении и могут быть использованы как в математических расчётах, так и в расчётах процессов деформации посредством компьютерного моделирования методом конечных элементов.

2. В результате исследования реологических особенностей деформации медных сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 получены новые результаты, в широком температурно-деформационном диапазоне описывающие поведение материала. Установлено, что прочность сплава CuMg 0,5 в среднем на 20 % превосходит прочность сплава CuMg 0,2. Существенно низкая электропроводимость сплава меди с 0,5 % магния, а также более высокая температура его горячей деформации использованы в качестве основания при выборе бронзы CuMg 0,2 для непрерывного прессования контактного провода.

3. Установлено, что закономерности формирования структуры шин и прутков из меди марки М1 аналогичны для всего рассмотренного сортамента длинномерных проводников. В то же время результаты измерения твёрдости прутков и шин

свидетельствуют о наличии влияния конфигурации узла рабочего инструмента установок CONFORM на характер формирования их свойств.

4. Показан низкий уровень их влияния температурно-скоростных параметров прессования на формирование структуры и свойств шин из меди М1 в рассмотренном диапазоне, что исключает возможность управления свойствами материала в процессе прессования, путём варьирования указанных параметров процесса CONFORM.

5. Обосновано, что в ходе непрерывного прессования металл претерпевает сложный характер эволюции структуры, сопровождающийся как измельчением, так и ростом зёрен, при этом на выходе из матрицы он приобретает ориентированную в направлении истечения структуру со средней величиной зерна 20–25 мкм. Установлено, что итоговая структура материала после непрерывного прессования CONFORM является деформированной, с содержанием частично рекристаллизованных зёрен.

6. Результаты исследования сплава CuMg 0,2 свидетельствуют, что получаемый уровень свойств после непрерывного прессования недостаточен для использования материала при изготовлении контактного провода без дополнительной обработки, что обусловлено его низкой прочностью ($\sigma_b = 198,5$ МПа), вызванной развитием процессов рекристаллизации в очаге деформации CONFORM. Установлено, что дальнейшая деформация непрерывно-прессованной заготовки при комнатной температуре с $\varepsilon_{отн} = 30$ % позволяет повысить временное сопротивление материала до $\sigma_b = 421,5$ МПа

7. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса непрерывного прессования изделий из меди М1, путём использования операции рекристаллизационного отжига. Разработаны адаптационные режимы термической обработки бунтов длинномерных медных проводников в печах колпакового типа.

8. Разработаны рекомендации по совершенствованию процесса производства контактного провода ВСМ из сплава CuMg 0,2, позволяющие исключить из технологической цепочки его производства волочение на многократных волочильных станах. Рекомендации содержат деформационный и температурно-скоростной режимы непрерывного прессования и волочения в роликовом устройстве, а также параметры деформирующего инструмента (матрицы и роликовых волок). Результатами КЭ-моделирования показана возможность реализации разработанных решений в промышленных условиях.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Zinoviev A.V., **Koshmin A.N.**, Chasnikov A.Y. Evolution of the microstructure of the copper alloy (DIN-ECu-57) in the deformation zone in the process of pressing CONFORM // Materials Science Forum. 2018. Vol. 918, pp. 145-151.
2. Зиновьев А.В., **Кошмин А.Н.**, Часников А.Я. Исследование формирования микроструктуры сплава М1 в очаге деформации при непрерывном прессовании шин // Цветные металлы. 2018. № 10, с. 81-85.
3. Зиновьев А.В., **Кошмин А.Н.**, Часников А.Я. Влияние параметров процесса непрерывного прессования на формирование микроструктуры и механических свойств прутков круглого сечения из сплава М1 // Metallurg. 2019. № 3, с. 94-98.
4. **Koshmin A.**, Zinoviev A., Chasnikov A., Grachev G. Influence of process parameters on the properties of continuously extruded copper buses // Magnitogorsk Rolling Practice 2020: материалы V международной молодежной научно-технической конференции, Магнитогорск, 24–27 ноября 2020 года / под ред. А.Г. Корчунова. 2020. с. 88-89.
5. **Кошмин А.Н.**, Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния и трансформации микроструктуры медных электротехнических шин в очаге деформации при непрерывном прессовании // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 1, с. 36-48.
6. **Кошмин А.Н.**, Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н. Экспериментальное и теоретическое исследования влияния технологических параметров процесса непрерывной экструзии на формирование свойств прямоугольных медных шин // Цветные металлы. 2021. № 7, с. 71-78.