МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор А.В. Зиновьев

Москва, 2021

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Литературный обзор 9

1.1 Аналитический обзор материалов электрических проводников 9

1.2 Типовые технологические схемы производства проводников из меди и её сплавов 14

1.3 Развитие совмещённых и непрерывных технологических процессов производства длинномерных изделий 17

1.4 Конструктивные и технологические особенности процесса непрерывного прессования 21

1.5 Выводы по главе 31

Глава 2. Материалы и методы исследования 33

2.1 Методика исследования сопротивления деформации 33

2.2 Методы структурного и текстурного анализа 35

2.3 Методы испытаний физико-механических свойств 36

2.4 Обоснование и методика компьютерного моделирования 37

2.5 Общая характеристика материалов исследования 39

2.6 Выводы по главе 43

Глава 3. Исследование реологических свойств меди и магниевых бронз 44

3.1 Сопротивление деформации технически чистой меди 44

3.2 Результаты экспериментального исследования сопротивления деформации магниевых бронз 46

3.3 Выводы по главе 51

Глава 4. Исследование особенностей непрерывного прессования профилей из меди марки М1 52

4.1 Эволюция структуры и механических свойств шин и прутков из меди М1 в процессе непрерывного прессования 52

4.2 Компьютерное моделирование и анализ НДС в очаге деформации процесса CONFORM 59

4.3 Влияние технологических параметров непрерывного прессования на формирование свойств медных шин 72

4.4 Выводы по главе 77

Глава 5. Исследование особенностей формирования структуры и свойств контактного провода из магниевой бронзы 78

5.1 КЭ-моделирование процессов производства контактного провода из сплава CuMg 0,2 78

5.2 Формирование функциональных свойств сплава CuMg 0,2 в процессе непрерывного прессования и волочения 81

5.3 Исследование влияния холодной деформации на формирование микроструктуры и свойств сплава CuMg 0,2 84

5.4 Выводы по главе 88

Глава 6. Разработка рекомендаций и практическое использование результатов исследований 89

6.1 Анализ и разработка рекомендаций по совершенствованию процесса непрерывного прессования профилей из меди марки М1 89

6.2 Совершенствование технологии производства контактного провода ВСМ на линиях непрерывного прессования 93

6.3 Выводы по главе 99

Основные выводы по работе 101

Список использованных источников 103

Приложение А 111

Приложение Б 113

Приложение В 114

Приложение Г 117

Введение

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 технически 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.

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».

Научная новизна работы

1. Расчетно-экспериментальными методиками подтверждены известные сведения о характере упрочнения технически чистой меди М1 в процессе деформации. Получены новые данные о реологии медномагниевых 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, характеризуемой 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 HV. 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 мм^2 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 надежности 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» Коротицкому 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).

Глава 1. Литературный обзор

Проводники электрического тока в современном мире являются неотъемлемой частью технического прогресса и развития общества в целом. В связи с повсеместной электрификацией производств, имевшей место в XX веке, а также избранным социальным курсом, направленным на повышение качества продукции и энергоэффективности технологических линий, за последние десятилетия возникло множество новых материалов и видов электрических проводников, и, в частности, способов их производства.

1.1 Аналитический обзор материалов электрических проводников

Проводником называется материал (или изделие из этого материала), особенностью которого является присутствие в структуре свободных электронов. Наилучшими и наиболее распространёнными материалами проводников являются различные металлы. Такие металлы как медь, алюминий, серебро и золото, число свободных электронов у которых наиболее велико, обладают высокой электропроводностью (Таблица 1).

Таблица 1 – Электрическая проводимость некоторых чистых металлов [1]

Металл	Электрическая проводимость $(Ом \cdot м)^{-1}$
Серебро	$6{,}3 \times 10^7$
Медь (технически чистая)	$5{,}8 \times 10^7$
Золото	$4{,}2 \times 10^7$
Алюминий (технически чистый)	$3{,}4 \times 10^7$

Среди прочих металлов наиболее часто в качестве проводников используют алюминий и медь, что связано с их распространённостью, простотой в обработке и гораздо более низкой ценой по сравнению с серебром и золотом. Алюминиевые проводники дешевле медных, однако они уступают им по многим показателям. Так, электропроводность алюминия равна лишь 65 % от проводимости меди. Для большинства технологических задач алюминий приходится упрочнять, вводя в его состав магний и кремний, что в свою очередь снижает проводимость ещё на 10 %.

Медь и сплавы на её основе являются наиболее распространённым материалом для изготовления токопроводящих деталей. Среди свойств меди выделяются высокая электро- и теплопроводность, хорошая коррозионная стойкость, средний уровень прочности, возможность управления свойствами посредством термической обработки и хорошая свариваемость относительно других металлов [2]. Именно по этой причине из меди и её сплавов производят шины и прутки различного профиля, проволоку, контактные провода, а также широко используют в обмотках трансформаторов и двигателях. Однако, обладая одними из лучших показателей электро- и теплопроводности, а также пластичности, чистая

медь не наделена высокими прочностными характеристиками, необходимыми во многих сферах применения проводников [3]. Поэтому распространение получило легирование меди различными элементами для улучшения её физическо-механических свойств.

Легирующие элементы, добавляемые к чистым металлам, вызывают дополнительное рассеяние электронов и, таким образом, увеличивают удельное электрическое сопротивление материала. Влияние небольших добавок различных элементов на удельное электрическое сопротивление чистой меди при комнатной температуре показано на рисунке 1. Эффект, оказываемый различными элементами на электросопротивление, значительно различается. Среди представленных элементов серебро увеличивает удельное сопротивление меньше всего, а фосфор больше всего при том же количестве.

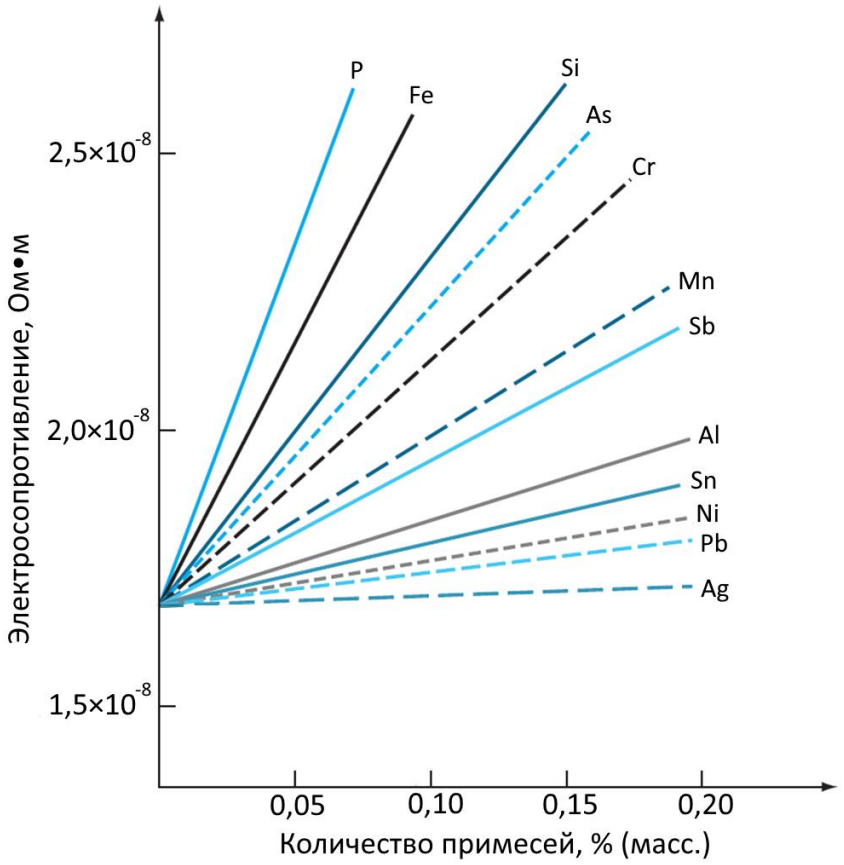


Рисунок 1 – Влияние на удельное электросопротивление меди некоторых элементов [4]

Элементы, обычно применяемые для легирования меди — это алюминий, никель, кремний, олово и цинк. Другие элементы и металлы обычно добавляют в небольших количествах для улучшения определенных характеристик материала, таких как коррозионная стойкость или обрабатываемость. Медь и ее сплавы могут быть классифицированы на девять основных групп [2]:

1) технически чистая медь, содержащая не менее 99,3 % Cu;
2) низколегированные сплавы, содержащие до 5 % добавок;
3) медно-цинковые сплавы (латуни), содержащие до 40 % Zn;
4) медно-оловянные сплавы, содержащие до 10 % Sn и 0,2 % P;
5) медно-алюминиевые сплавы, содержащие до 10 % алюминия;
6) медно-кремниевые сплавы, содержащие до 3 % Si;
7) медно-никелевые сплавы, содержащие до 30 % Ni;
8) медно-цинко-никелевые сплавы, содержащие до 27 % цинка и 18 % никеля;
9) специальные сплавы.

Низколегированные сплавы (бронзы) составляют особую группу сплавов, характеризуемых высокой электро- и теплопроводностью. Суммарное содержание каждого из легирующих элементов в сплавах этой группы находится в следующих пределах: 0,9-1,2 % Cd в кадмиевой бронзе БрКд 1; 0,08-0,12 % Ag в серебряной бронзе БрСр 0,1; 0,2-0,5 % Mg в магниевой бронзе БрМг 0,3; 0,08-0,24 % Sn в оловянной бронзе БрОл 0,15; 0,3-0,5 % Zr в циркониевой бронзе БрЦр 0,4 [5]. Эти бронзы обладают сочетанием высоких характеристик электропроводности, прочности и жаропрочности – свойств, сочетание которых не может быть получено у материалов на другой металлической основе. Эта группа сплавов широко применяется в электротехнике, в частности в качестве материала проводников для электрифицированных железнодорожных линий.

В стратегию развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года включена концепция строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ) движения пассажирских составов скоростью до 350 км/ч [6]. Для создания таких линий необходимо использование в их конструкциях материалов, обладающих наиболее высокими среди аналогов функциональными показателями. Одной из важнейших деталей контактной сети электрифицированных железнодорожных магистралей является контактный провод фасонного сечения, используемый для передачи электроэнергии через токосъемники электроподвижному составу. Наиболее перспективными материалами для производства контактного провода ВСМ являются низколегированные бронзы, описанные ранее (таблица 2).

Результаты исследований свидетельствуют, что контактные провода должны обладать прочностью не менее чем на 15% выше медных проводов, сопротивляемостью разупрочнению при нагреве до температуры рекристаллизации выше, чем у меди на 35 % и износостойкостью, превосходящей медный провод в 2 – 2,5 раза. При этом их электропроводность должна быть не ниже 80 – 85 % от электропроводности отожжённой технически чистой меди (IACS) [7]. Среди прочих представленных сплавов выделяются

сплавы меди с магнием, обладающие оптимальным набором физических характеристик (таблицы 2 и 3), и имеющие низкую стоимость легирующего компонента, а также хорошо зарекомендовавшие себя в строительстве линий ВСМ на территории стран Европы и Азии [8].

Таблица 2 – Основные физические свойства материалов проводников ВСМ

Свойства	Сплавы					
	БрСр 0,1	БрМг 0,3	БрМг 0,5	БрОл 0,15	БрКд 0,7	БрКд 1
Удельное электросопротивление, Ом/км	0,122	0,154	0,191	0,165	0,138	0,139
Предел прочности, Н/мм^2	350	420	470	420	430	445
Удлинение, %	3-10	3-10	3-10	2-8	2-8	2-7

В основе магниевых бронз CuMg 0,2 и CuMg 0,5 (аналог по ГОСТ БрМг 0,3 и БрМг 0,5 соответственно [9]) лежит диаграмма состояния Cu-Mg эвтектического типа (рисунок 2). В медной ее части, в равновесии с твердым раствором на основе меди находится конгруэнтно плавящаяся при температуре 819 °С фаза Cu_2Mg. Между α-твердым раствором и интерметаллидом Cu_2Mg проходит эвтектическая реакция при температуре 722 °С. Предельная растворимость магния в меди при эвтектической температуре составляет 3,3 %. Далее растворимость магния в меди уменьшается и при 700, 600, 500, 400 и 300 °С составляет 3,0, 2,3, 1,75, 1,3 и 0,9 % соответственно.

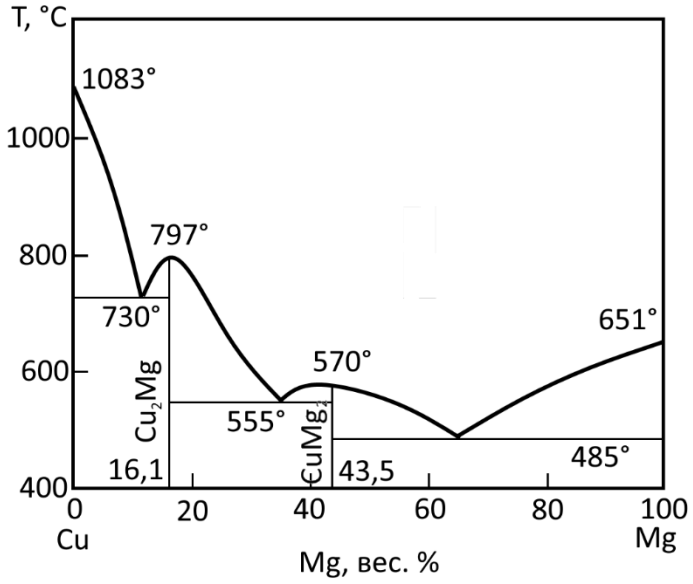


Рисунок 2 – Диаграмма состояния медь – магний [10]

Таблица 3 – Типичные физико-механические свойства медномагниевых бронз

Свойства	CuMg 0,2	CuMg 0,5
Температура ликвидус, °С	1078	1075
Температура солидус, °С	1020	1000
Плотность, мг/м^3	8,91	8,9
Теплоемкость, кДж/кг·°С	0,39	
Коэффициент линейного расширения 20-300 °С, 1/°С	17,5	
Теплопроводность, Вт/м·град	300	260
Модуль упругости, ГПа	123	125
Твердость после деформации 90-95 %, НВ	140	160
Временное сопротивление (в деформированном состоянии), МПа	430	650
Условный предел текучести (в деформированном состоянии), МПа	390	630
Относительное удлинение δ_{10} (в деформированном состоянии), %	3	2
Температура разупрочнения на 50 % при выдержке в течении 1 часа (в деформированном состоянии), °С	400	

На рисунке 3 приведены значения удельного электросопротивления для меди марки М1 и магниевых бронз CuMg 0,2 и CuMg 0,5.

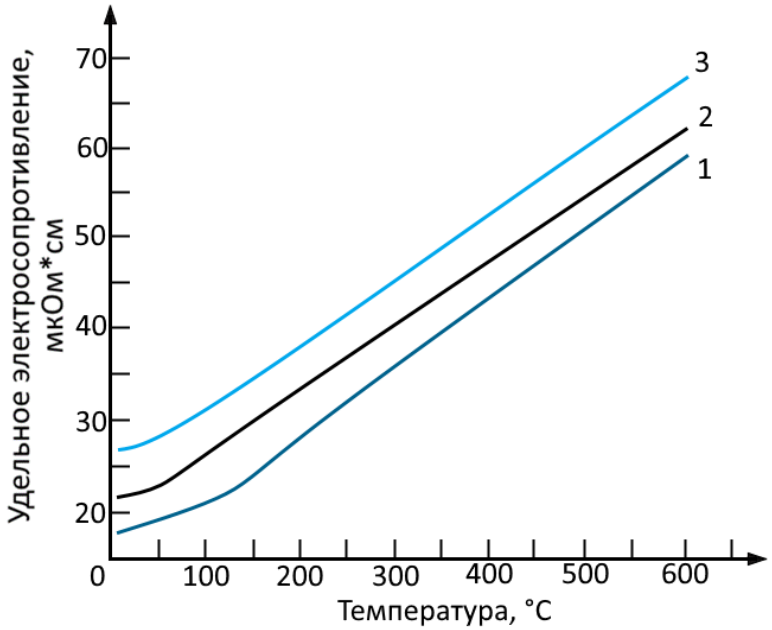


Рисунок 3 – Удельное электросопротивление медномагниевых сплавов при разных температурах испытаний: 1 – медь М1; 2 – CuMg 0,2; 3 – CuMg 0,5

Кривые (рисунок 3) свидетельствуют о незначительном снижении электропроводности технически чистой меди в случае легирования её магнием в количестве 0,2 %. Однако, при легировании магнием в количестве 0,5 % снижение электропроводности материала носит более выраженный характер и в таком случае электропроводность

составляет 75 – 80 % IACS, что является предельными значениями требований к контактным проводам для ВСМ.

1.2 Типовые технологические схемы производства проводников из меди и её сплавов

Обработка давлением цветных металлов, материалов проводников, занимает важное место в промышленности, в частности, ей подвергают примерно 65 – 80 % алюминия, 80 – 90 % меди, 20 – 30 % никеля [11]. На заводах по обработке меди и сплавов на её основе производят плоский и сортовой прокат, профили различной формы поперечного сечения, а также трубы [12, 13]. Как правило такие заводы включают два передела, образующие металлургический цикл: заготовительное (плавильное) производство и обрабатывающее производство (рисунок 4). Некоторые предприятия лишены плавильного передела, в таком случае слитки поставляются с других предприятий.

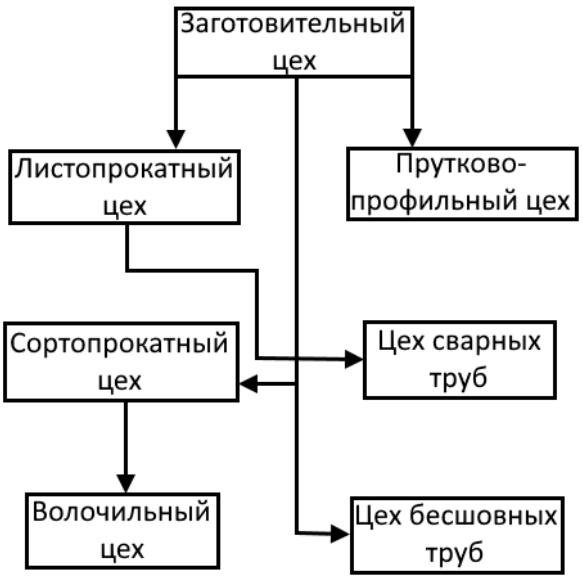


Рисунок 4 – Типовая схема завода по производству изделий меди и её сплавов [11]

Вся история развития науки и техники богата на события и открытия по совершенствованию оборудования и технологий производства проводников из меди и сплавов на её основе. К настоящему времени в практике сложилось множество типовых технологических схем их производства. Среди всех типовых технологий можно выделить две традиционные схемы, получившие наибольшее распространение на заводах по обработке цветных металлов (ОЦМ) – это горячее прессование с дальнейшим волочением, и горячая прокатка вайербарсов в многоклетьевых прокатных станах.

Прессование сплавов на основе меди выполняют на вертикальных прессах усилием 6 – 10 МН либо на горизонтальных прессах усилием 10 – 80 МН [14]. Основная масса продукции выпускается на производствах с горизонтальными прессами, также оснащёнными устройствами для нагрева и транспортировки слитков от печи к прессу, устройствами на выходной стороне пресса (холодильники, механизмы правки, резки и транспортировки изделий, моталки и бухтовые устройства), вспомогательными механизмами, механизмами управления и устройствами привода пресса и всех его узлов [15].

Типовая схема производства заготовок и готовых изделий проводников из меди и её сплавов на линии горизонтального пресса усилием 80 МН приведена на рисунке 5. Технологический процесс прессования прямым методом на данном прессе полностью механизирован и осуществляется в следующей последовательности. Слиток, нагретый в печи *6* до 600 – 900 °С, передается тележкой *7* на лапу механизма подачи *8*, который перемещает его на ось пресса в пространство между контейнером и пресс-штемпелем. Слиток помещается в контейнер, а рабочая пресс-шайба подается на ось пресса механизмом, установленным на контейнеродержателе и начинается его прессование. Прессование слитка продолжается до получения определенной величины пресс-остатка.

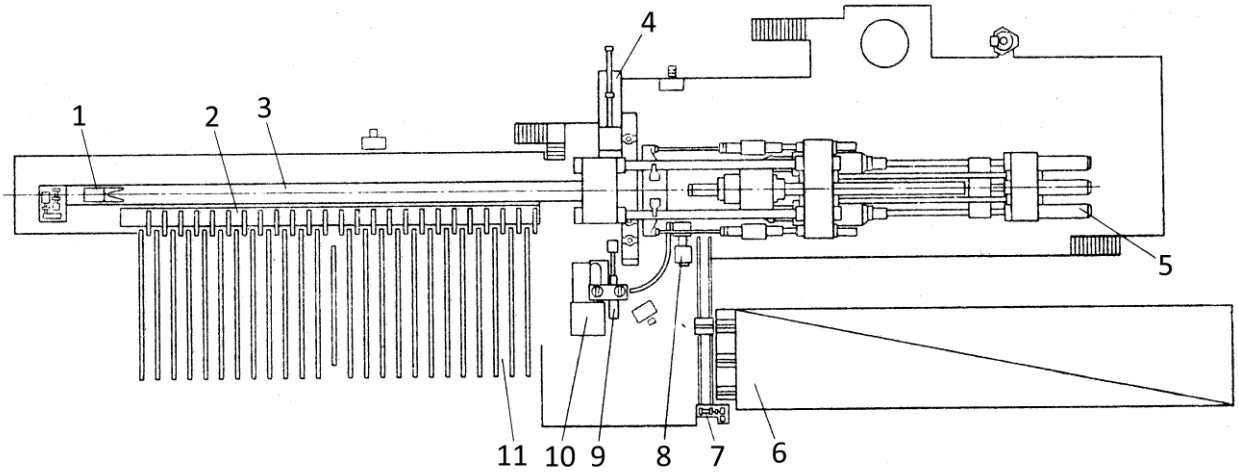


Рисунок 5 – Схема расположения оборудования линии горизонтального пресса усилием 80 МН [11]

После выполнения операции прессования контейнер и подвижная поперечина отводятся назад, вытягивая за собой изделие из отверстия матрицы. Затем опускается пила и отрезает пресс-остаток от изделия, которое тянущей тележкой удаляется из передней поперечины. Одновременно с этими операциями толкатели механизма смены матриц *4* выталкивают мундштук с матрицей, прошедшей прессование, и заталкивают другой

мундштук с подготовленным инструментом в соседнюю обойму. Далее после нанесения смазки на инструмент пресс становится подготовленным для начала следующего цикла. Параллельно на механизме отделения пресс-остатка *9* ходом нижнего ножа рабочая пресс-шайба освобождается и попадает на поворотный стол, а пресс-остаток удаляется по склизу в бункер *10*. Отпрессованное изделие попадает на стол *3*, затем тянущей тележкой *1* захватывается за конец, выдергивается из очка матрицы и транспортируется за пределы передней поперечины. После освобождения из тянущей тележки отпрессованное изделие опрокидыванием желоба стола сбрасывается на рычаги. Затем, при необходимости, изделие может быть быстро охлаждено в ванне *2* с водой или передано на горизонтальный конвейер холодильника *11* [11].

Наиболее распространённым способом производства катанки, получившим своё развитие в прошлом веке, является горячая прокатка вайербарсов – квадратных слитков массой до 120 кг, на непрерывных прокатных станах [16]. Однако, такие недостатки данного метода, как малая масса получаемых бунтов катанки и невысокая производительность послужили к созданию новых способов, основывающиеся на принципах совмещения процессов литья и прокатки [17]. К данным методам могут быть отнесены такие методы как CCR CONTINUUS Properzi, SCR Southwire, SMS-MEER Contirod, немного отличающиеся друг от друга конструкцией основных элементов оборудования и характером ведения технологического процесса [18]. Структура мирового производства медной катанки по типу применяемой технологии на 2010 год распределена следующим образом: Southwire – 50 %; Contirod – 28 %; Properzi – 5 %; остальные – 17 % [19].

На рисунке 6 приведена схема технологического процесса производства катанки по технологии Southwire [20]. Медные катоды плавят в печи *1* с радиально расположенными горелками, работающими на природном газе. Расплав выпускают из нижней части шахтной печи по желобу в поворотный цилиндрический миксер *2*. Миксер также оснащен горелкой, работающей на природном газе, и служит в качестве резервуара, обеспечивающего корректировку температуры и постоянную подачу металла на литье.

Расплав подается из миксера через желоб в литейную машину *3* на водоохлаждаемую стальную ленту, которая установлена поверх полусферы литейного колеса и образует литейную полость, внутри которой расплав затвердевает, образуя заготовку трапециевидного сечения. После выпрямления литая заготовка подается через тянущее устройство в прокатный стан *4*, включающий черновые и чистовые клети. Затем полученная катанка проходит операции травления, охлаждения и нанесения воскового покрытия *5*, и поступает на бунтоукладчик *6*.

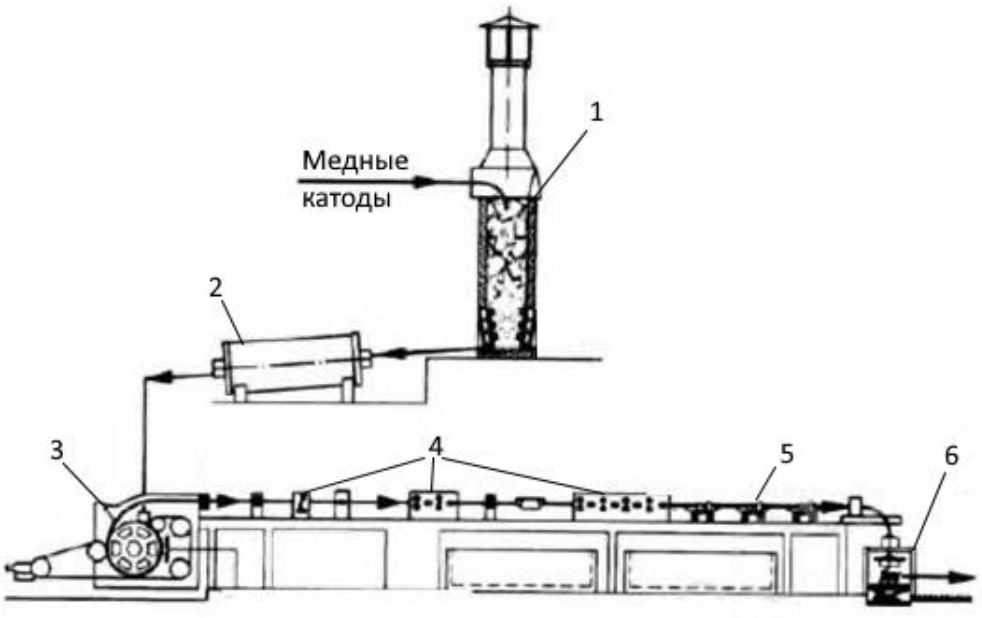


Рисунок 6 – Схема технологического процесса производства катанки Southwire

При производстве проводников из меди и сплавов на её основе, зачастую, после операций горячего прессования или прокатки, профили подвергают волочению, для получения проволоки и фасонных профилей диаметром от 7 – 8 мм до нескольких микрон. Процесс волочения заключается в протягивании заготовки через отверстие волоки меньшего, чем у заготовки, диаметра, наматывая при этом полученную проволоку на тянущий барабан. В зависимости от числа барабанов и характера работы, станы с наматыванием проволоки подразделяют на однократные и многократные, работающие со скольжением, без него и с противонатяжением. Станы многократного волочения (с последовательно установленными волоками, в количестве от 2 до 25 штук) получили преимущественное распространение, так как позволяют снизить тяговые усилия на выходе из каждой отдельной волоки и ускорить производственный процесс [11].

1.3 Развитие совмещённых и непрерывных технологических процессов производства длинномерных изделий

Описанные в предыдущей части методы производства медных длинномерных изделий из слитков, несмотря на высокий уровень развития на нынешнем этапе технического прогресса, остаются малоэффективными касаемо аспектов, связанных с затратами энергии на подготовку и нагрев заготовок перед пластической деформацией, высокой металлоемкостью прокатного и прессового оборудования, а также необходимостью наличия значительных производственных площадей и большого штата рабочего персонала. Исходя из сложившейся проблемы, можно с уверенностью сказать, что

одним из главных направлений современного развития металлургии является совмещение производственных переделов в одну непрерывную технологическую линию.

Решение данной проблемы начало привлекать внимание учёных и исследователей ещё в XIX столетии. Работы таких учёных как Г. Бессемер, Д. Проперци, Т. Авитцур, Д. Грин, а также ведущих отечественных научно-исследовательских организаций «ВНИИМетМаш», «Гипроцветметобработка», «ВИАМ» и многих других, оказали сильное влияние на развитие и положили начало внедрению в промышленность непрерывных процессов, совмещающих принципы литья, прокатки и прессования [21]. Разработка и распространение агрегатов непрерывного литья, произошедшие во второй половине XX века, послужили созданию множества способов непрерывного прессования, используемых для деформации меди и её сплавов, среди которых выделяются технологии CONFORM, extrolling, linex и совмещённая прокатка-прессование (СПП).

Процесс непрерывного прессования CONFORM (от англ. continuous forming) основывается на принципах таких процессов как скоростное прессование с содействием активных сил предельного трения (СПАТ) [22, 23] и равноканальное угловое прессование (РКУП) [24, 25]. Он был разработан Дереком Грином в лаборатории Управления атомной энергии Великобритании в 1971 году [26]. Технология CONFORM нашла применение в производстве длинномерных сплошных и полых изделий из легкодеформируемых алюминиевых и медных сплавов. Первоначальная версия предложенного Д. Грином агрегата (рисунок 7) представляла собой конструкцию с колесом *1*, с кольцевой канавкой *2* прямоугольного сечения на ободе, образующей с охватывающим колесо неподвижным башмаком *3* закрытый калибр. Вращаясь, колесо проталкивает металл вдоль калибра к упору *4*, где также располагается матрица *5*.

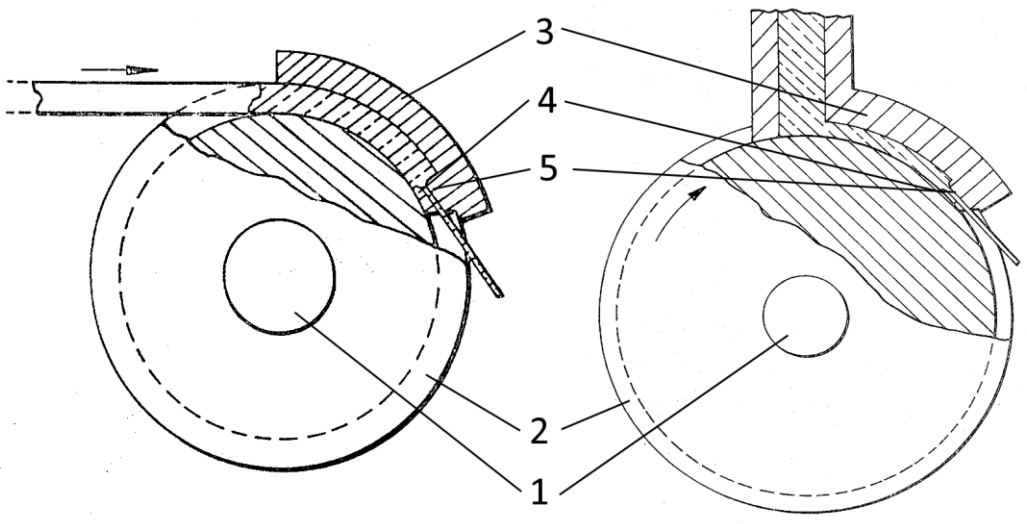


Рисунок 7 – Принципиальные схемы вариантов реализации процесса CONFORM [26]

Реализация прессования CONFORM проходит следующим образом. Прутковая заготовка подаётся в открытый зазор (канавку) между башмаком и колесом, и под воздействием сил трения на поверхности контакта с канавкой вращающегося колеса проталкивается в камеру прессования, где достигает упора и матрицы. В зоне непосредственно перед матрицей заготовка подвергается интенсивной пластической деформации и заполняет все сечение канавки, что способствует увеличению сил трения на контакте поверхностей канавки и заготовки. По мере поворота колеса сжимающие усилия, приложенные к заготовке, увеличиваются и достигается усилие, необходимое для выдавливания материала заготовки через отверстие в матрице, таким образом начинается процесс прессования. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки служит для развития давления, необходимого для пластической деформации материала и заполнения объема в зоне перед матрицей [21]. Важной особенностью прессования по технологии CONFORM является отсутствие необходимости нагрева прессуемой заготовки вследствие того, что прессуемый материал разогревается до температуры прессования сам, внутри пресс-камеры, за счёт работы сил трения и деформации [27].

Процесс extrolling (от англ. extrusion-rolling) разработан и запатентован в США в 1976 г. Бецалелем Авитцуром [28]. Принцип процесса заключается в совмещении процессов прокатки и прессования (рисунок 8). Его особенностями являются невысокие затраты энергии на преодоление сил трения при прохождении металлом очага деформации и малую продолжительность обработки, которые обычно характерны для процесса прокатки с высокими единичными обжатиями. Два вращающихся валка *1* обеспечивают постоянное движение металла *2* вперед с помощью сил контактного трения. Величина сил трения должна быть достаточной, чтобы вызвать выдавливание металла через отверстие матрицы *3*.

Несмотря на множество очевидных преимуществ данный способ не обрёл широкого распространения в промышленности, так как условия реализации процесса, а именно применение открытого калибра и вертикальное расположение матрицы, не обеспечивают устойчивое его протекание и не позволяют развить достаточного усилия для прессования металла с большой величиной вытяжки [29, 30].

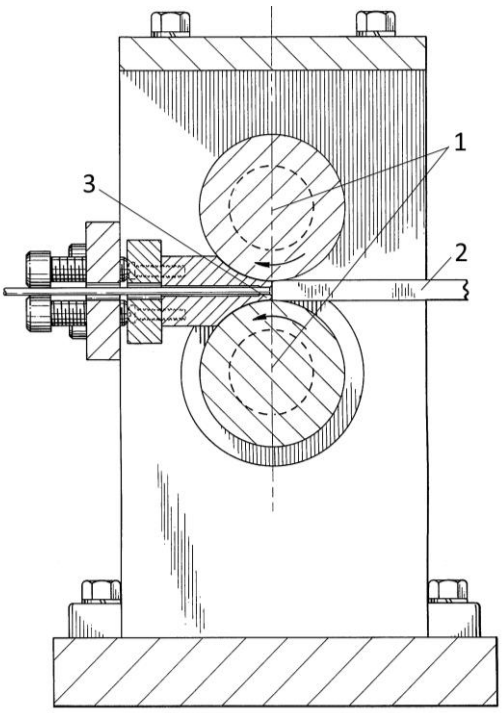


Рисунок 8 – Схема процесса extrolling [28]

Основываясь на сущности процесса extrolling, коллективом учёных и исследователей кафедры «Обработки металлов давлением» Сибирского федерального университета под руководством Н. Н. Довженко был разработан способ СПП, способный решить указанные проблемы метода extrolling [31]. Техническое решение заключается в использовании закрытого калибра, что дает возможность увеличить дугу контакта заготовки с валками и, соответственно, силу контактного трения, необходимого для создания давления прессования металла через отверстие матрицы.

Ещё один способ (linex), разработанный Вильямом Вурхесом в 1974 году [32], представляет собой процесс, в котором рабочая поверхность пресс-контейнера подвижна, что достигается за счет вращения роликов *1*, сопряжённых с плоской поверхностью звеньев бесконечных цепей *2*, захватывающих заготовку *3* прямоугольного сечения с верхней и нижней сторон (рисунок 9). Заготовка подаётся в матрицу *4*, имеющую форму вилки с криволинейной входной поверхностью, внутри которой достигается достаточное для прессования металла и получения готового изделия *5* сжимающее давление. При этом трение на контакте боковых граней заготовки с входной частью матрицы снижает давление прессования, которое зависит от разности сил трения на смазанных и не смазанных поверхностях прямоугольного прутка. Процесс производства профилей этим способом применяется на заводах фирмы «WANSKUCK» (США).

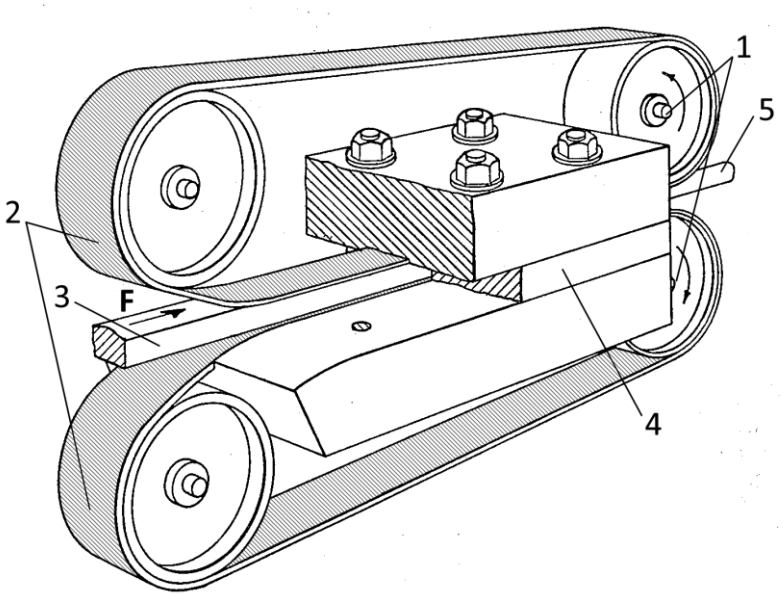


Рисунок 9 – Схема процесса linex [32]

Среди приведённых выше способов непрерывного прессования, наибольшее распространение в промышленности и производстве проводников из меди и её сплавов, за счёт своей широкой функциональности, достаточного уровня исследованности, а также перспективности, снискала технология CONFORM [33]. Особенно широкое применение данный способ получил на мини-предприятиях и микрометаллургических заводах, что объясняется его достаточно высокой производительностью (от 2 до 12 тыс. тонн прессованных изделий в год) в сочетании с компактностью и низкой металлоёмкостью [34]. Такие мини-предприятия представляют собой «миниатюрные» (до 3000 м^2) промышленные производства, основу которых составляет специализированное оборудование, зачастую работа которого организована по непрерывной схеме [14]. Возникшие в России в начале 90-х годов, и успешно продолжающие свою деятельность в наши дни, мини-предприятия, занимающиеся выпуском проводников из медных сплавов по технологии CONFORM, доказывают факт уместности и рациональности развития таких технологий в определённых нишах современной металлургической отрасли. Яркими представителями российских компаний, осуществляющих свою деятельность посредствам производства на мини-предприятиях, являются ООО "НТЦМ", ООО «Свелен», ООО "ЭЛКАТ", АО "ТРАНСКАТ" и другие.

1.4 Конструктивные и технологические особенности процесса непрерывного прессования

Так как технология CONFORM получила широкое распространение не только на родине изобретателя, в Англии, но и далеко за рубежом, особенно в Азии и России,

множеством учёных и изобретателей был сделан большой вклад в развитие и совершенствование данного процесса. В целом, все эти исследования направлены на достижение единой цели – улучшения качества и расширения марочного сортамента прессуемых изделий, а также общего повышения эффективности процесса непрерывного прессования. Однако, весь массив исследований, опубликованных за последние годы, может быть качественно разделён на три группы, определяемые по подходу к решению тех или иных задач. К ним относятся: конструктивное совершенствование узлов и механизмов установки непрерывного прессования; металлографические исследования и физические испытания как новых, так и давно зарекомендовавших себя прессуемых материалов; и, снискавшее в последние годы особую популярность, компьютерное моделирование методом конченых элементов, позволяющее с высокой точностью предопределять физические свойства материала в процессе деформации и анализировать влияние различных технологических параметров на формирование этих свойств.

В области исследований посвященных совершенствованию конструкций установок CONFORM, больших успехов достигли коллективы российских учёных. Так, в лаборатории кафедры ОМД Сибирского федерального университета были сконструированы несколько опытных установок непрерывного прессования по методу CONFORM. Разработанные установки позволили учёным отработать различные технологические режимы прессования прутков из цветных металлов и изучить влияние параметров процесса на качество прессовок [21]. Ими предложен один из возможных путей увеличения производительности процесса непрерывного прессования за счет увеличения скорости экструзии [35], который заключается в совершенствовании системы охлаждения инструмента, отличающейся от общепринятой тем, что в канавке колеса выполняются кольцевые проточки, образующие совместно с башмачной клетью по меньшей мере два кольцевых канала, по которым непрерывно пульсирует жидкость (рисунок 10).

Множество литературных данных, обобщённых в монографии [21], свидетельствуют, что качество поверхности прессуемых профилей, во многом зависит от угла установки матрицы относительно продольной оси пресс-контейнера. В связи с этим, учёными СФУ разработано несколько новых технических решений, направленных на снижение количества дефектов поверхности эктрудируемых изделий за счёт изменения угла установки матрицы. Техническое решение [36], предполагает компоновку прессового узла, в котором под углом 15 – 60° к касательной оси канавки рабочего колеса установлена матрица и упор, боковая поверхность которого образует с осью матрицы угол 50 – 60°.

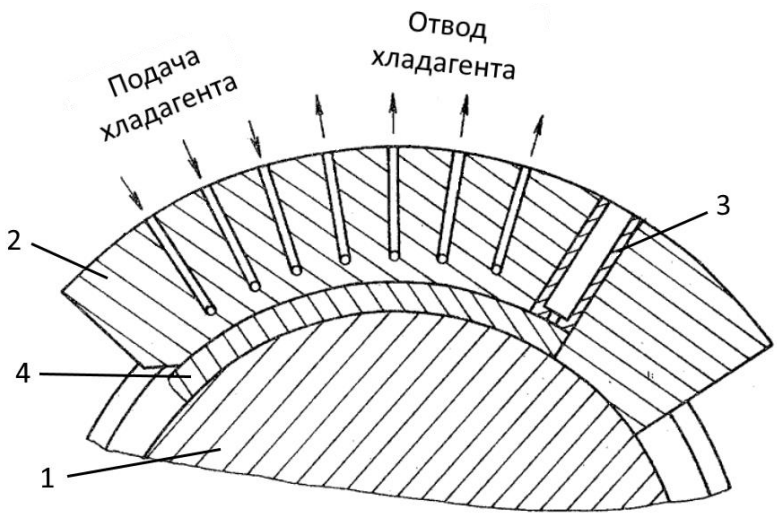


Рисунок 10 – Схема системы охлаждения рабочего колеса и башмака установки непрерывного прессования [35]:
1 – рабочее колесо, 2 – башмачная клеть, 3 – матрица, 4 – заготовка

Более совершенная и универсальная схема крепления матрицы представлена на рисунке 11. Она отличается от выше приведённой тем, что матрица имеет шарообразную форму и имеет возможность вращения, будучи установленной в крепление в башмачной клети [37]. Благодаря способности свободного движения матрицы относительно оси истечения металла, становится возможной её самоориентация вдоль линии наименьшего сопротивления течению металла. Данная конструктивная особенность может способствовать снижению неравномерности деформации по поперечному сечению пресс-изделия и, как следствие, получению изделий с однородными по сечению механическими свойствами.

В работе [38] авторами предложена новая система крепления башмака, повышающая стабильность ведения процесса непрерывного прессования металла. Вопросы регулирования расхода металла и улучшения качества поверхности экструдируемых изделий, путём изменения конфигурации очага деформации – расположения расширяющейся форкамеры и матрицы, подробно описаны в работах тех же авторов [39, 40].

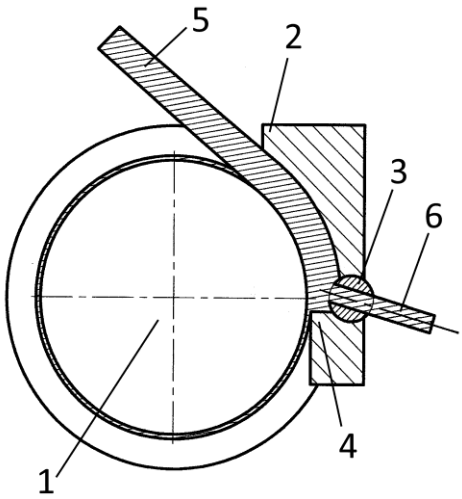


Рисунок 11 – Схема шарнирного крепления матрицы установки непрерывного прессования [37]: 1 – ручей; 2 – башмак; 3 – матрица; 4 – упор; 5 – заготовка; 6 – изделие

Другим направлением повышения эффективности процесса непрерывного прессования за счёт совершенствования конструктивных особенностей установок является уменьшение доли деформируемого металла, выдавливаемого в зазор, образуемый между канавкой рабочего колеса и упором, с образованием заусенца. Данная проблема в основном нашла решение в технических изобретениях, разнообразным образом влияющими на геометрические параметры зазора для отвода облоя [41-43].

Так же, особый интерес представляет техническое решение, разработанное сотрудниками BWE Ltd. («Babcock Wire Equipment», Великобритания) в 1983 году [44]. Изобретение заключается в модернизации установки CONFORM, позволяющей реализовать процесс нанесения покрытия с помощью экструзии, что позволяет изготавливать проводники с прочным и твёрдым сердечником. Процесс получил название conclad (от англ. continuous cladding). Схема реализации процесса устроена следующим образом (рисунок 12). Исходный материал покрытия подаётся по канавке колеса к упору. Трение между материалом покрытия и колесом, также как в процессе CONFORM, способствует развитию сил прессования. Достигая упора, материал поступает в пресс-камеру, и заполняя её, покрывает материал сердечника, после чего полученный биметалл проходит через фильеру. Таким образом достигается прочная связь материалов покрытия и сердечника. Важным аспектом такого процесса является отсутствие примесей в материале покрытия и отсутствие оксидной плёнки на поверхности сердечника, иначе не произойдёт свариваемости двух материалов между собой. Процесс conclad может быть реализован на установках с рабочим колесом, оснащённым как одной, так и двумя канавками для подачи плакирующего материала.

Также стоит отметить работы японских учёных [45, 46], посвящённые исследованию особенностей прессования на установках conclad с двумя рабочими колёсами. Результаты их исследований свидетельствуют о незначительном улучшении реологии материала покрытия в очаге деформации при использовании описанной компоновки установки, а опыты на модельном материале продемонстрировали уменьшение области «мёртвой зоны» в очаге деформации, что может способствовать увеличению качества продукции.

Исследования характера течения различных сплавов на основе меди, а также их реологических, структурных и физико-механических свойств в процессе производства длинномерных проводников по технологии CONFORM, в последние годы получили широкое освящение в публикациях, как российских, так и зарубежных учёных.

Ряд работ российских авторов [47-49] посвящён изучению характера течения металла и особенностей его реологии в очаге деформации с применением различных экспериментальных методик. Так, в работе Шимова Г.В. и других [48] для исследования реологии меди М00 в очаге деформации CONFORM применяли «метод штифтов», основанный на внедрении в заготовку сегмента из инородного металла (латуни Л63). Данный эксперимент позволил сделать вывод о природе возникновения таких дефектов прессования медных электротехнических шин как пузыри и расслоения.

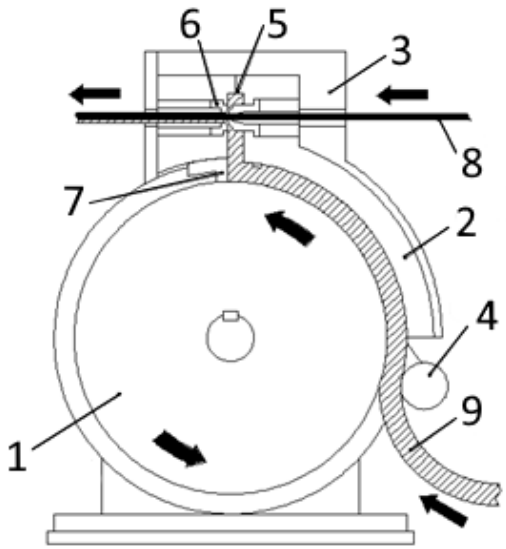


Рисунок 12 – Схема процесса conclad [44]: 1 – рабочее колесо; 2 – башмачная клеть; 3 – держатель башмака; 4 – прижимающий ролик; 5 – пресс-камера; 6 – матрица; 7 – упор; 8 – материал сердечника; 9 – материал покрытия

Подробное исследование эволюции микроструктуры технически чистой меди при различных температурных, скоростных и деформационных условиях, применительно к процессу CONFORM, были выполнены коллективом авторов из КНР [50]. На

испытательной установке Gleeble 1500 учёными был проведён ряд опытов по деформации образцов сжатием в диапазоне температур от 200 до 700 °С, скорости деформации от 0,01 $с^{-1}$ до 10,0 $с^{-1}$, и величине относительной деформации от 30 % до 90 %, по результатам которых были получены данные об изменении размера зёренной структуры в результате механического и температурного воздействия. Так установлено, что при одинаковой скорости деформации микроструктура медных шин изменяется от литого состояния до состояния рекристаллизованного зерна постепенно, с ростом температуры и степени деформации, а размер рекристаллизованного зерна напрямую зависит от температуры и увеличивается с её ростом. Полученные результаты позволили авторам дополнить математическую модель расчёта среднего размера зерна, применительно к процессу прессования технически чистой меди, описываемую формулой:

$$D = CZ^{-n_D}, \quad (1)$$

где D – средний размер зерна, мкм;

C и n_D – экспериментальные данные;

Z – параметр Зенера-Холломона, описывающий влияние температуры и скорости деформации на размер рекристаллизованного зерна [51].

На основании результатов экспериментальных измерений и расчёта математической модели размера зерна было получено уравнение регрессии (2), демонстрирующее хорошую сходимость с экспериментальными данными (рисунок 13).

$$lnD = 4{,}822 - 0{,}018lnZ. \quad (2)$$

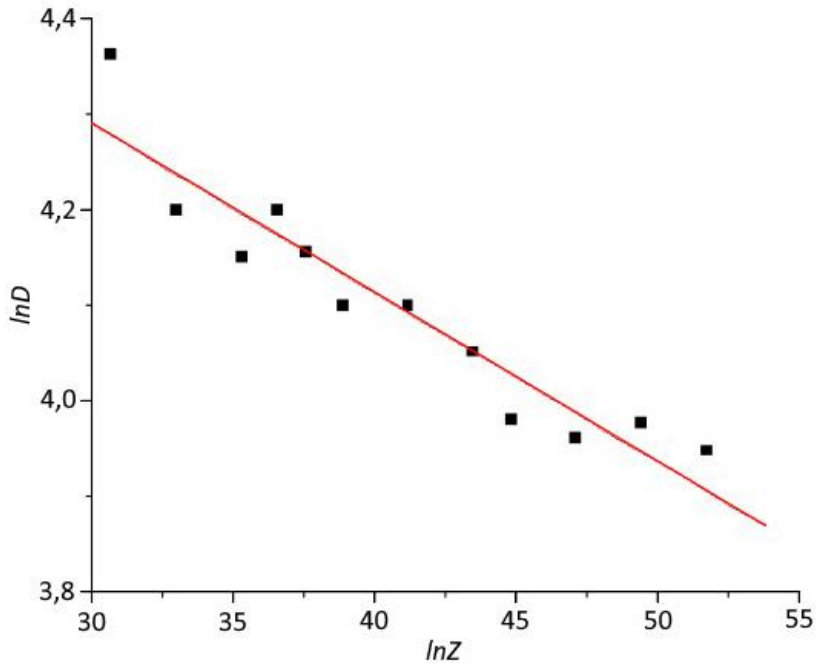
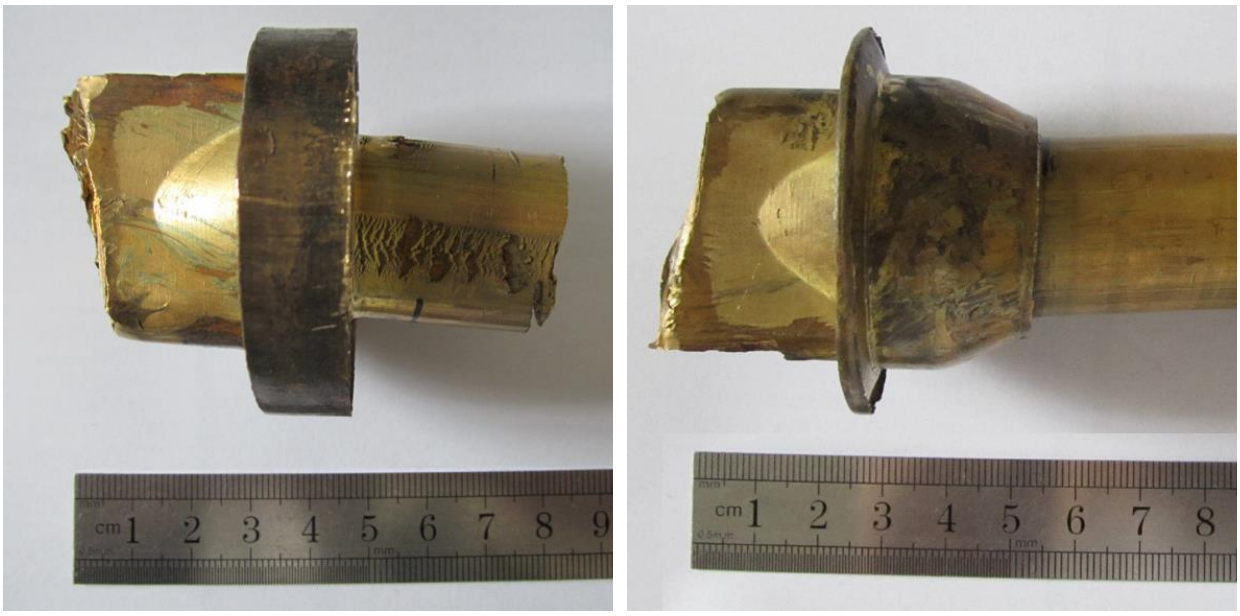


Рисунок 13 – Результаты экспериментальных измерений размера зерна (точки) и расчёта математической модели (линия)

Существующая потребность многих отраслей в электрических проводниках, обладающих не только высокой электропроводностью, но также прочностью и износостойкостью, не характерных для чистой меди, послужила причиной проведения множества исследований особенностей непрерывного прессования сплавов на основе меди.

Так, авторы работ [52, 53] провели успешный эксперимент по прессованию латуни Л62 с различной конфигурацией узла пресс-камеры (рисунок 14). В результате опыта ими получен круглый пруток диаметром 20 мм и отмечается измельчение зёрен с одновременным развитием динамической рекристаллизации сплава в процессе прессования.



а б

Рисунок 14 – Пресс-остатки от прессования сплава Л62 с использованием а) цилиндрической и б) конической пресс-камеры [53]

Изучение эволюции микроструктуры и свойств хромистых бронз в процессе прессования CONFORM нашло отражение в работах [54-57]. Yuan и др. [54] в своём исследовании провели подробное изучение эволюции микроструктуры и свойств дисперсионно-упрочненного сплава Cu-0,82Cr с помощью оптической и просвечивающей электронной микроскопии, измерения твердости и проводимости. Измерение твёрдости (рисунок 15) на разных участках очага деформации показало, что твердость материала в области канавки рабочего колеса (зона адгезии) составила около 133 HB, что более чем вдвое превышает твердость литого прутка. В зоне упора твёрдость резко увеличивается до максимального значения 148 HB, а затем опять уменьшается. Твердость в форкамере

сначала быстро снижается, а затем несколько колеблется. Экструдированный пруток характеризуется твердостью около 116 HB и электропроводностью 77,5 % IACS.

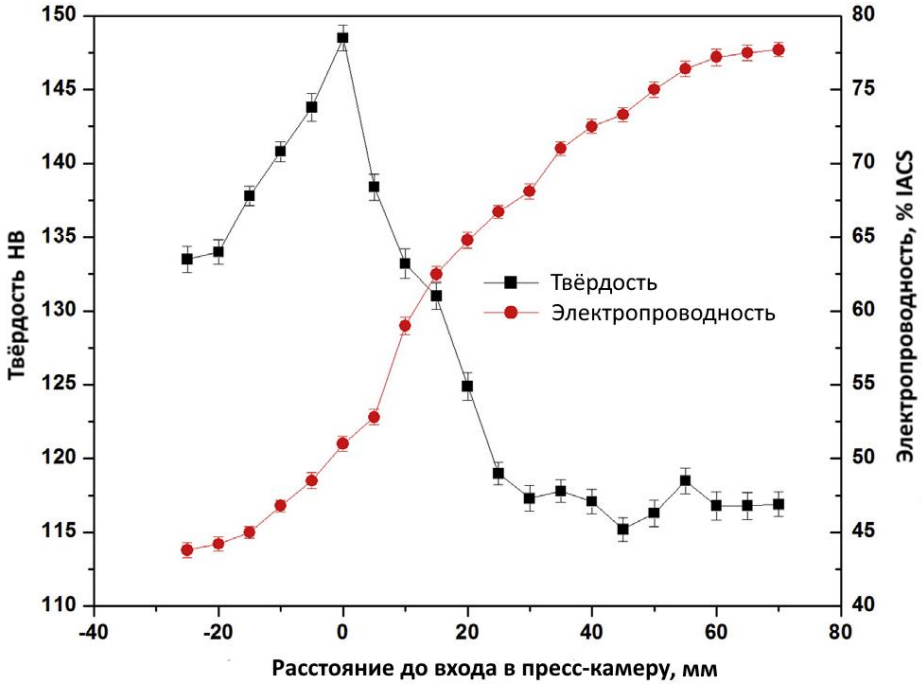


Рисунок 15 – Изменение твёрдости и электропроводности сплава Cu-Cr вдоль очага деформации по направлению экструдирования [54]

Результаты данной работы свидетельствуют о зарождении процесса рекристаллизации в зоне адгезии, с образованием субзерна. Пластинчатая структура, образованная сильными сдвиговыми деформациями, появляется в зоне изгиба (встречи материала с упором). В зоне форкамеры можно наблюдать наноразмерные частицы, которые образовались из-за действия тепла деформации, и сдерживали процесс динамической рекристаллизации во время непрерывного процесса прессования. Средний размер частиц и зёрен экструдированного сплава составил всего 15 нм и 1,5 мкм соответственно, что по мнению авторов положительно повлияло на формирование высоких механических и электрических свойств сплава.

В работах [55, 56] приведены исследования прессования и последующей термообработки сплавов системы Cu-Cr-Zr. Авторы исследования [55] отмечают, что сплав Cu-0,16Cr-0,12Zr в процессе непрерывного прессования достигает высокой прочности 590 МПа и удлинения 17,2 %, что на 40 МПа и 1,5 % соответственно выше, чем у сплава, полученного традиционными процессами обработки. Между тем, отмечается незначительное снижение электропроводности с 78,7% до 77,6% по шкале IACS. Авторы данной работы, также, как и в исследовании [54], отмечают образование сверхмелких

субзёрен (рисунок 16), полученных путем непрерывной динамической рекристаллизации в процессе прессования, которые в свою очередь ограничивают процесс динамической рекристаллизации, и также помогают сплаву достичь высокого уровня прочности.

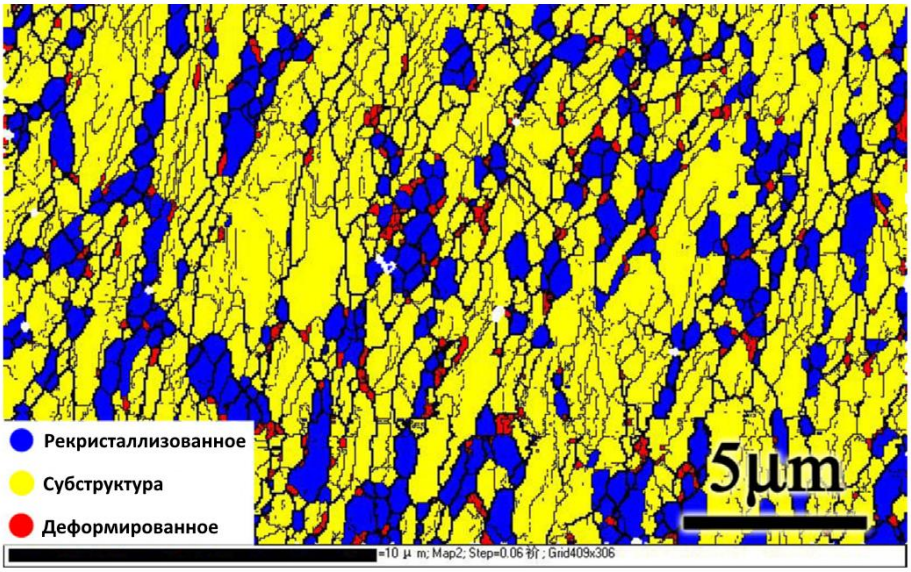


Рисунок 16 – EBSD-карта рекристаллизованной фракции экструдированного прутка Cu-0,16Cr-0,12Zr [55]

Коллективом авторов из Центрального Южного университета КНР выполнен и опубликован ряд исследовательских работ [58-60] посвящённых особенностям непрерывного прессования медномагниевых бронз. В работе [58] рассмотрена возможность прессования сплава CuMg 0,5. Авторами данной работы с применением методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии изучены аспекты микроструктурной эволюции и текстура материала. Результаты исследования подтверждают эффективность метода CONFORM для производства изделий из указанного сплава.

В публикациях [59, 60] приводится подробное исследование микроструктуры сплава CuMg 0,2 в процессе прессования CONFORM. Авторами изучено изменение размера зерна на каждом участке очага деформации CONFORM (рисунок 17) и сделаны выводы о том, что в процессе непрерывного прессования происходит непрерывная динамическая рекристаллизация и первичная рекристаллизация, а механизм фазовых превращений заключается в граничной миграции и соединении субзёрен. Данные факты могут быть полезны в качестве руководства для разработки технологии непрерывного прессования сплава CuMg и получения оптимальной микроструктуры изделий для целевого использования.

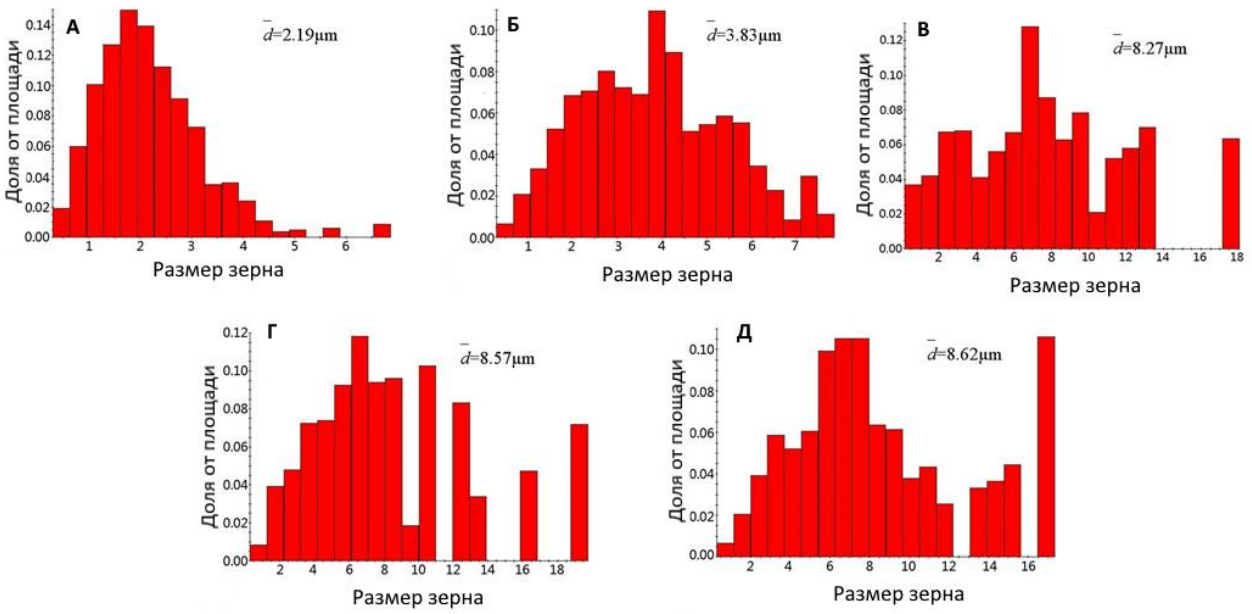


Рисунок 17 – Распределение размера зерна по площади образцов:
А) участок захвата заготовки; Б) зона адгезии; В) область упора;
Г) область пресс-камеры; Д) экструдированный пруток [59]

Особенности процесса непрерывного прессования CONFORM характеризуются многообразием физических процессов и деформационных параметров, действующих в очаге деформации, которые не всегда могут быть проанализированы в лабораторных или производственных условиях. Современное программное обеспечение для моделирования методом конечных элементов (МКЭ) позволяет подробно и достаточно точно оценить такие параметры деформации как напряженно-деформированное состояние, изменение температуры, характер формоизменения и течения металла. Ряд опубликованных работ, посвящённых исследованиям особенностей непрерывного прессования как алюминиевых сплавов [61-63], так и медных [64-71], свидетельствуют о перспективности применения КЭ-моделирования для получения теоретических знаний о технологическом процессе.

Публикация [68] затрагивает интересную тему комбинирования процесса непрерывного прессования и продольной прокатки (рисунок 18) для получения медных полос. Авторами, при помощи моделирования методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D, была определена зависимость скоростей экструдирования и прокатки от геометрических размеров полосы и степени относительной деформации, на основании которой были выведены несколько уравнений.

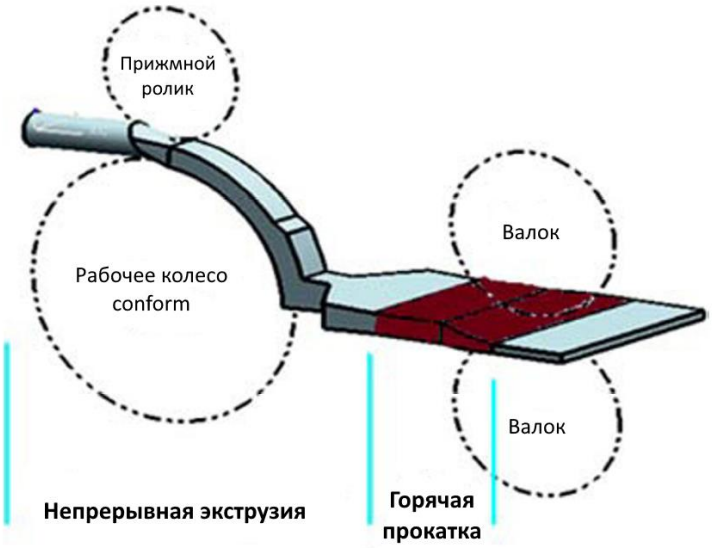


Рисунок 18 – Схема комбинирования процесса непрерывного прессования и прокатки [68]

Авторами работы [71] была продемонстрирована возможность симуляции процесса непрерывного прессования CONFORM в программном комплексе конечно-элементного моделирования QForm. На построенной модели, авторами были изучены такие характеристики процесса прессования как скорость деформации и течения металла, средние напряжения и их интенсивность.

Однако, не смотря на широкое распространение в промышленности и не менее широкое освящение результатов научных исследований в публикациях, процесс непрерывного прессования CONFORM, а в частности такие его аспекты как эволюция микроструктуры и свойств, относительно некоторых сплавов и технологических параметров, физико-механические процессы, проходящие в очаге деформации, остаются недостаточно изученными, что является причиной низкой степени контролируемости этих процессов и препятствует разработке механизма влияния на свойства прессуемых изделий.

1.5 Выводы по главе

1. Проведён обзор материалов, используемых при производстве электрических проводников. Физико-механические свойства меди и сплавов на её основе послужили обширному распространению их применения в качестве материала проводников широкого функционального ряда.

2. Рассмотрены основные технологические схемы производства длинномерных электрических проводников из меди. Представлен анализ тенденций развития современных совмещённых процессов обработки, показано что среди всех прочих наибольшее распространение в промышленности получил процесс непрерывного прессования CONFORM.

3. Отмечено, что особенности процесса CONFORM, связанные с эволюцией структуры и механических свойств, напряжённо-деформированным состоянием материала в очаге деформации и процессами рекристаллизации меди и сплавов на её основе, остаются малоизученными по настоящее время.

4. С учётом положительных характеристик процесса CONFORM и его широкого распространения во многих странах мира, включая Россию, было принято решение продолжить выполнение экспериментальных и теоретических исследований, направленных на более глубокое изучение процессов пластического течения меди и формирования комплекса служебных свойств проводников.

5. Сформулирована **цель работы**, заключающаяся в выполнении комплексного исследования процесса непрерывного прессования длинномерных изделий из сплавов на основе меди с целью усовершенствования технологии производства электрических проводников.

6. Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

- изучить реологические свойства меди марки М1 и медномагниевых бронз 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 состояния 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.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1 Методика исследования сопротивления деформации

Сопротивление металла деформации является характеристикой его прочности при пластической деформации. Параметр сопротивления деформации в теории и практике обработки давлением носит важный характер, определяющий не только механические свойства материала, но и значения энергосиловых характеристик оборудования для его обработки. Величина сопротивления деформации σ_s определяется совместным влиянием процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения и в общем виде может быть записана как уровнение:

$$\sigma_s = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi, t, p, X), \quad (3)$$

где T – температура деформации; ε - стенень деформации; ξ - скорость деформации; t – время; p – гидростатические давление; X – структурно-чувствительный параметр.

Наибольшее значение в изучении реологических свойств металлов и сплавов представляют экспериментальные работы по пластометрическим испытаниям, выполняемые на кулачковых или торсионных пластометрах. Такие установки позволяют исследовать реологические свойства деформируемых материалов не только в широком диапазоне термомеханических параметров, но и по различным законам развития деформации во времени, что дает возможность моделировать реальные процессы обработки металлов давлением (прокатку, прессование, ковку и др.).

Примером современного пластометрического комплекса является установка «Gleeble System 3800», которая позволяет выполнять множество видов испытаний, связанных с оценкой термомеханического поведения материалов в твердом или твердожидком состоянии, определением механических свойств материалов, получением дилатометрических кривых и термокинетических диаграмм в условиях высоких скоростей нагрева и охлаждения. Комплекс «Gleeble System 3800» изготавливается в модульном исполнении. К основному блоку могут быть присоединены: модуль ударной деформации Hydrawedge II, показанный на рисунке 23, модуль кручения Torsion, модуль для деформирования сжатием или растяжением Pocket Jaw. Основные характеристики комплекса «Gleeble System 3800» представлены в таблице 4.

В качестве образцов для испытаний использовали цилиндры диаметром 5 и длиной 10 мм. Перед испытанием, при помощи системы вакуумных насосов, в рабочей камере установки, создается вакуум для предотвращения окисления образцов при повышенных температурах. Нагрев образца до заданной температуры осуществляется прямым пропусканием через образец тока. Температуру образца во время испытания

контролировали с помощью предварительно присоединённой к нему хромель-алюмелевой термопарой. Испытания на сжатие проводили до достижения относительного обжатия ε = 60 %, что соответствует значению накопленной деформации $\varepsilon_N = 0{,}9$.

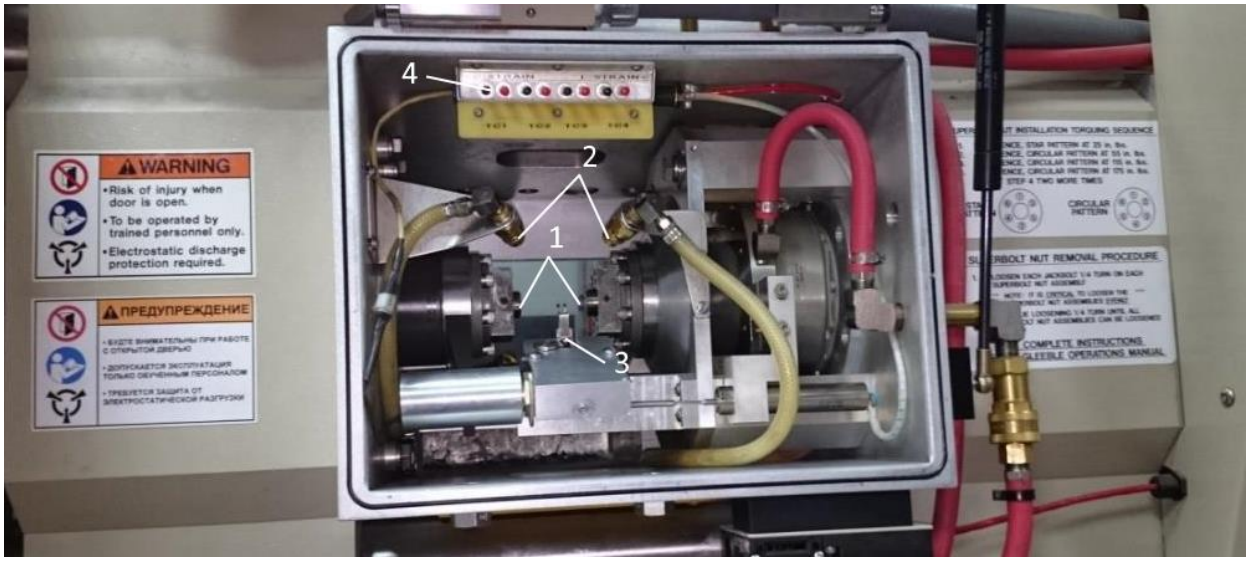


Рисунок 23 – Модуль ударной деформации «Gleeble 3800» Hydrawedge II:
1 – токопроводящие бойки; 2 – закалочные форсунки; 3 – держатель для образца; 4 – контакты для подключения контрольно-измерительной термопары

Таблица 4 – Технические характеристики «Gleeble 3800»

Параметр	Значение
Скорость нагрева, °С/с	> 10000
Скорость охлаждения, °С/с	> 1000
Линейная скорость подвижной траверсы, мм/с	≤ 2000
Усилие сжатия, кН	≤ 200
Усилие растяжения, кН	≤ 100
Крутящий момент, Н·м	≤ 1500
Скорость кручения, об/мин	≤ 1500
Температура нагрева, °С	≤ 1750
Скорость считывания данных с датчиков, кГц	≤ 50

Исследование сопротивления деформации материалов, рассматриваемых в данной работе, выполняли выборочно. Измерение временного сопротивления технически чистой меди М1 проводили для двух образцов, отлитых при разной линейной скорости вытягивания из расплава 300 и 500 мм/мин, при температуре испытания 480 °С и скорости деформирования 75 мм/сек, что соответствует условиям процесса непрерывного прессования. Изучение реологических свойств сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 проводили на литых образцах, полученных при скорости вытягивания из расплава 300 мм/мин, для

диапазонов температур и скоростей деформации (таблица 5), характерных процессам их горячей обработки давлением.

Таблица 5 – План испытаний сопротивления деформации медномагниевых сплавов

Температура испытания, °С	Скорость деформации, $с^{-1}$			
	0,01	0,1	1	10
500	эксперимент	эксперимент	эксперимент	расчёт
600	расчёт	расчёт	эксперимент	эксперимент
700	эксперимент	эксперимент	эксперимент	эксперимент
800	расчёт	расчёт	эксперимент	эксперимент
900	эксперимент	эксперимент	эксперимент	расчёт

Для упрощения эксперимента и снижения числа ресурсов необходимых для его реализации, было принято решение об уменьшении числа измерений, аппроксимации недостающих данных для уравнения кривой текучести следующего вида:

$$\sigma_s = \sigma_0 \varepsilon^n \xi^m \exp(q\varepsilon) \exp(pT), \quad (4)$$

где σ_0 – базовый предел прочности при статической деформации, МПа;

n, m, p – температурно-скоростные константы материала.

2.2 Методы структурного и текстурного анализа

Микроструктурный и текстурный анализ проводили, применяя методы оптической световой и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с приставкой для дифракции отражённых электронов (ДОЭ). В зависимости от задачи анализа, образцы, отобранные из очага деформации или экструдированного профиля, изучали в продольном (плоскость XZ) и поперечном (плоскость YZ) сечениях (рисунок 24).

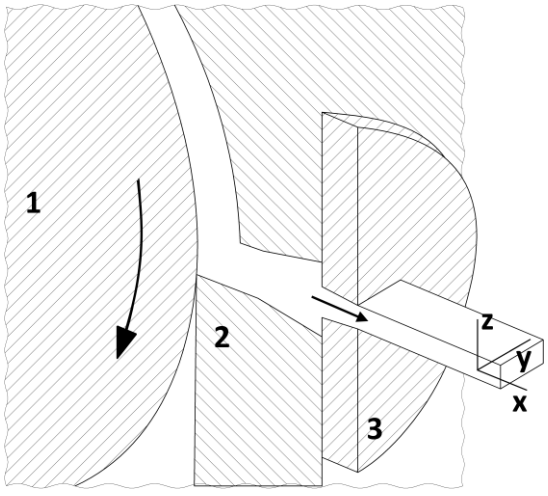


Рисунок 24 – Схема процесса прессования CONFORM с указанием ориентации плоскостей относительно образца: 1 – рабочее колесо; 2 – упор; 3 – матрица

Для исследования структуры, полученные с производства темплеты подготавливали к металлографическому анализу. На отрезном абразивном станке для влажной резки BRILLANT 250 (ATM Qness GmbH, Германия) и установке электроэрозионной резки проводили порезку темплетов на образцы. Предварительную шлифовку образцов выполняли на двухленточной шлифовальной машине JADE 700 (ATM Qness GmbH, Германия), с применением абразивных лент зернистостью Р120 и Р240. Чистовую шлифовку производили на двухдисковом шлифовально-полировальном станке SAPHIR 360 (ATM Qness GmbH, Германия), с диаметром рабочих дисков 300 мм. Применяли следующую последовательность зернистости абразивных кругов: Р600, Р1200, Р2400. Полученные образцы полировали на бархатном круге с применением водного раствора алмазной абразивной эмульсии с размером частиц 3 мкм. В результате были получены шлифы с зеркальной поверхностью. Далее осуществляли травление поверхности образцов водным раствором смеси кислот и двуххромовокислого калия (5 % HCl + 5 % H_2SO_4 + 5 % HNO_3 + 15 % $K_2Cr_2O_7$ + 70 % H_2O). Травление производили втиранием ватным тампоном травителя в поверхность шлифа. Для замедления окисления процесс проводился под слабой струёй воды. Затем выполняли осушку поверхности шлифа изопропиловым спиртом и горячим воздухом. Металлографический анализ макро- и микроструктуры образцов меди марки М1 и медных сплавов проводили по изображениям, полученным на световых микроскопах Versamet-2 («Union», Япония) и Axio Scope.A1 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия) при увеличениях до х 500.

Дополнительное исследование микроструктуры выполняли на сканирующем электронном микроскопе VEGA LMH (TESCAN, Чехия), оборудованным системой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа Oxford Instruments. Съемку поверхности образцов проводили в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочей дистанции 10 мм. Для исследования эволюции микроструктуры и процессов рекристаллизации, происходящих в очаге деформации при прессовании меди М1, проводили анализ картин ДОЭ на РЭМ JSM–35CF (JEOL Ltd., Япония). Шлифы для РЭМ готовили методом электролитической полировки, а для выявления зернёной структуры дополнительно выполняли оксидирование поверхности образцов.

2.3 Методы испытаний физико-механических свойств

Исследование механических свойств образцов меди М1 и сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 проводили с помощью испытаний на микротвёрдость по методу Виккерса. В качестве

важной физической характеристики материалов электрических проводников измеряли электропроводимость образцов.

Измерение твёрдости проводили на образцах с предварительно подготовленной поверхностью на цифровом твердомере МН-6 (Metkon Instruments Ltd., Турция) по методу Виккерса при нагрузке 1000 г и времени выдержки 10 с.

Механические испытания образцов на предел прочности выполняли на универсальной испытательной машине Instron 5900 Series (Illinois Tool Works Inc., США), скорость испытания составила 1 мм/мин. Для проведения механических испытаний использовали плоские образцы без головок.

Удельную электрическую проводимость измеряли с помощью вихретокового структуроскопа ВЭ-26НП (ЗАО "НИИИН МНПО "Спектр", Россия), который предназначен для неразрушающего контроля качества изделий из немагнитных сплавов на основе алюминия или меди.

2.4 Обоснование и методика компьютерного моделирования

К настоящему времени разработано множество теоретических и аналитических методов исследования процессов формоизменения материалов при обработке давлением. В связи с выросшими в последнее десятилетие вычислительными возможностями персональных компьютеров, огромное развитие получили методы математического и компьютерного моделирования, такие как метод конечных элементов (МКЭ), метод граничного элемента (МГЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод конечных объёмов (МКО). Каждый из методов по-разному подходит для решения тех или иных типов задач. Например, МКР наиболее часто применяется в расчётах задач механики жидкости и газа, но почти никогда не применяется в области механики твердого тела. МКЭ получил широкое распространение в решении задач линейной и нелинейной механики сплошных сред [72]. МКЭ основан на аппроксимации непрерывной функции $\varphi(e)$ (в физической интерпретации – перемещения, скорости, температуры, давления и т.п.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей и называемых конечными элементами.

Применение этого метода позволяет моделировать различные процессы обработки металлов давлением практически любой сложности, что зачастую позволяет сократить издержки на проведение испытаний и затраты времени от начала разработки до внедрения новой технологии. В настоящее время существует множество программных комплексов для математического моделирования процессов ОМД, которые можно условно разделить на

универсальные (Abaqus, ANSYS, Forge3D) и специализированные (Deform, QForm, Simufact).

Выполнение поставленных задач, а в частности изучение напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации процесса непрерывного прессования, выполняли в программе КЭ-моделирования QForm. По чертежам установки TLJ 400 была создана объемная модель инструмента (рисунок 25), состоящая из рабочего колеса *1*, прижимного ролика *2*, башмачной клети *3* и сборного пресс-контейнера, состоящего из пресс-камеры *4* с матрицей *5* и упором *6*. В качестве материала матрицы, из стандартной библиотеки программы [73] выбирали сталь 4Х5МФ1С, а для всех остальных деталей рабочего узла – сталь 40Х.

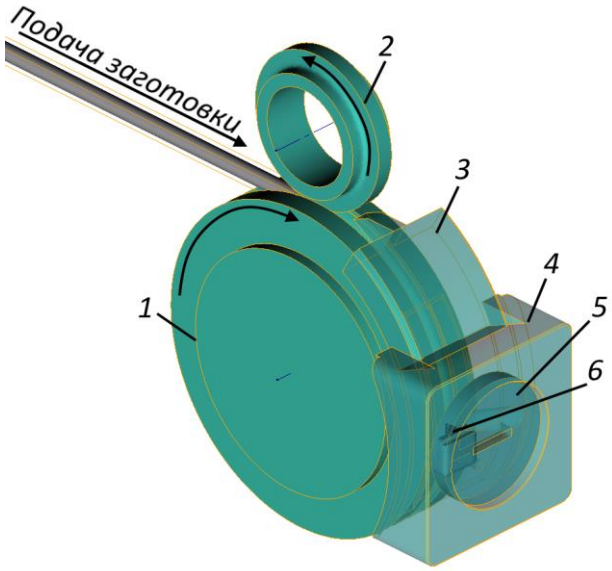


Рисунок 25 – 3D-модель рабочего узла установки непрерывного прессования

Для моделирования процесса прессования технической меди в качестве материала объекта моделирования (заготовки) выбирали медь марки Cu-ETP (ISO 197-1:1983), являющуюся наиболее близким аналогом меди марки М1 (ГОСТ 859-2014) и имеющуюся в библиотеке деформируемых материалов. Физические свойства и функции, описывающие сопротивление деформации сплава М1 представлены для диапазона температур 20 – 650 °С и скоростей деформации 1,0-10-50 $с^{-1}$ [74]. Размеры использованной для моделирования заготовки составили диаметр 20 мм, длина 1000 мм.

В разрабатываемой модели было принято условие простого теплообмена между инструментом, заготовкой и окружающей средой, которое может быть описано следующим уравнением:

$$q_n = b\alpha(T_1 - T_2), \quad (5)$$

где q_n - плотность теплового потока, Вт/м^2;

b - коэффициент паузы;

α - коэффициент теплопередачи [Вт/(м^2·°К)];

T_1 - температура заготовки, °К;

T_2 - температура инструмента, °К.

При простом условии теплообмена температура по объему инструмента не изменяется за исключением небольшого поверхностного слоя малой толщины, что позволяет многократно ускорить процесс расчёта. Температура инструмента в модели рабочего узла CONFORM принята комнатной (20 °С), а температура заготовки, непосредственно перед подачей в очаг деформации выше комнатной (150 °С при моделировании прессования меди М1 и 300 °С для сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5), что обусловлено распространённой производственной практикой подогрева переднего конца прутковой заготовки для увеличения пластичности материала на начальной стадии прессования.

Для описания трибологических характеристик материала заготовки использовали закон Зибеля, согласно которому удельная сила трения пропорциональна произведению максимального касательного напряжения при сдвиге и коэффициента пропорциональности, называемого также фактором трения. Для пары «Заготовка-Рабочее колесо» принимали фактор трения равный 1 (медь по меди), что объясняется омеднением поверхности канавки рабочего колеса для увеличения содействующих прессованию активных сил трения. Для остальных пар «Заготовка-Инструмент» принимали фактор трения равный 0,4 (медь по стали).

2.5 Общая характеристика материалов исследования

Для решения поставленных в данной работе задач, в качестве материалов для исследований были использованы следующие металлы: технически чистая медь марки М1 по ГОСТ 859-2014 и медномагниевые сплавы CuMg 0,2 и CuMg 0,5 по европейскому стандарту EN 13388-2015.

Материал для проведения производственных и лабораторных исследований процесса непрерывного прессования меди М1 был получен огневым переплавом катодного лома под слоем древесного угля на предприятии ООО «Свелен» (г. Санкт-Петербург). Химический состав материала представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Химический состав меди марки М1, масс. %

Cu, не менее	Содержание примесей, не более									
	Bi	Fe	Ni	Zn	Sn	Sb	As	Pb	S	O
99,90	0,001	0,005	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,005

На установке SL10-QL-S-B-8/20 (SDMMCo Ltd., Китай), методом непрерывного литья вверх (по технологии UPCAST®) (рисунок 19) были отлиты прутковые заготовки диаметром 20 мм.

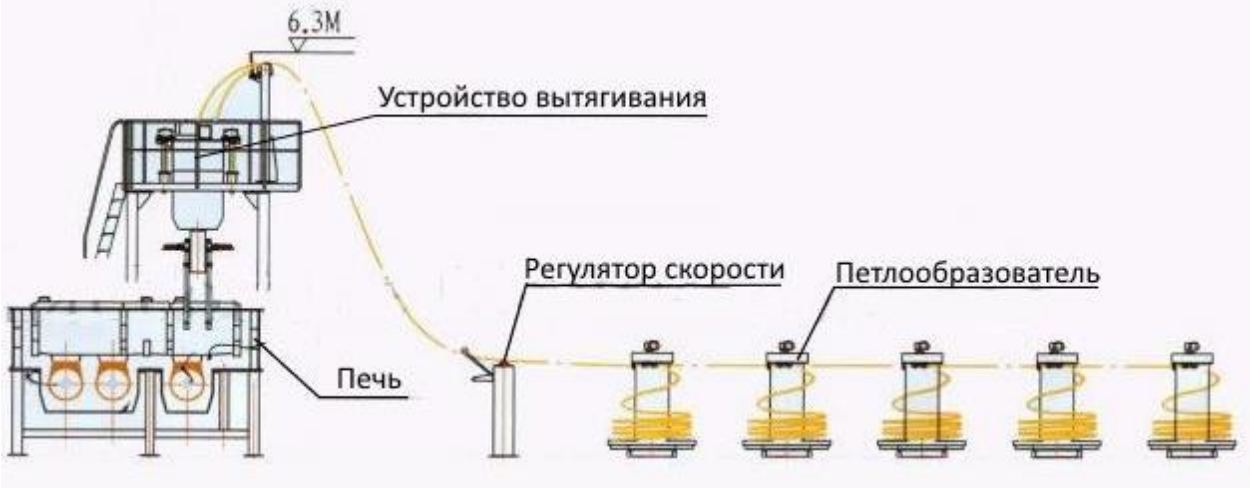
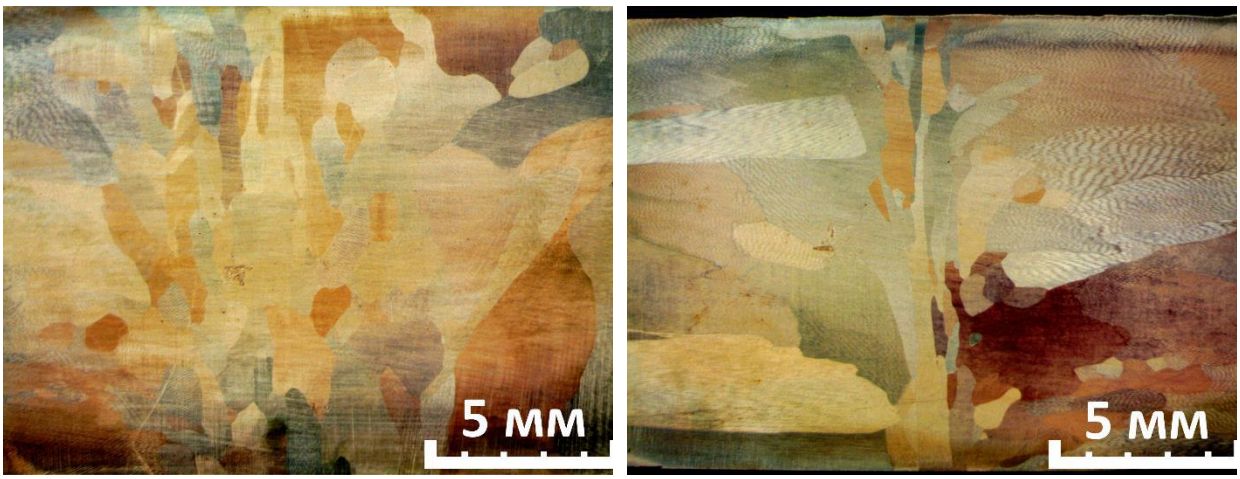


Рисунок 19 – Схема процесса непрерывного литья по технологии UPCAST®

На рисунке 20 представлены снимки макроструктуры литых прутков. Прутки, отлитые при линейной скорости вытягивания 300 мм/мин, в среднем имеют более крупную структуру нежели прутки, отлитые с большей скоростью – 500 мм/мин. Данный факт можно объяснить дискретным характером литья: вытягивание металла из расплава с шагом 4 – 5 мм; остановка для формирования фронта кристаллизации; перемещение металла в горячую зону графитового кристаллизатора; передвижение сформировавшегося прутка по холодной части графитовой трубки к выходу из кристаллизатора. Таким образом высокая скорость литья способствует уменьшению времени пребывания материала в горячей зоне, что препятствует росту зерна. Однако, стоит отметить, что при меньшей скорости вытягивания формируется более равномерная зёренная структура.

Затем литые заготовки подвергали прессованию на установке TLJ 400 (DKTC Ltd., Китай) для получения профилей круглого и прямоугольного сечений различных типоразмеров. Установка прессования CONFORM оборудована рабочим колесом диаметром 400 мм (диаметр по поверхности ручья 353 мм), приводимым во вращение главным двигателем мощностью 160 кВт. Температура металла в очаге деформации в процессе прессования составляла 450 – 465 °С.

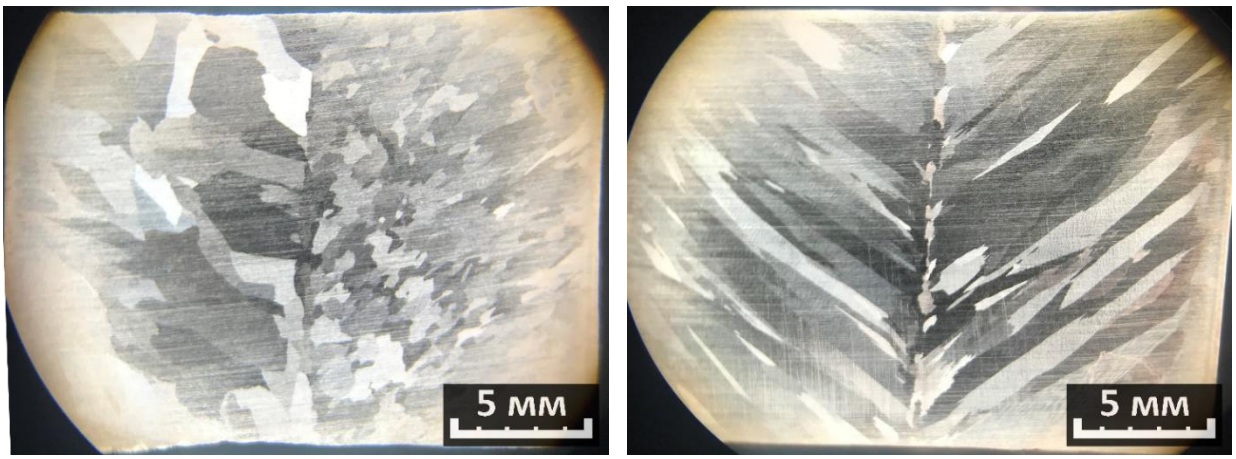


а б

Рисунок 20 – Макроструктура литых прутков меди М1 полученных при скоростях вытягивания: а) 300 мм/мин; б) 500 мм/мин

Исследование особенностей производства контактного провода из сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 выполняли на литых заготовках диаметром 20 мм, полученных также методом непрерывного литья вверх, на предприятии ГК «Москабельмет» (г. Москва). Химический состав данных сплавов (согласно стандарту EN 13388-2015) следующий: Cu – основа; Mg – 0,1-0,3 и 0,4-0,7 масс. % для CuMg 0,2 и CuMg 0,5 соответственно; P – до 0,01 масс. %; остальные примеси – до 0,1 масс. %.

От полученных литых прутков отбирали образцы для изучения макроструктуры (рисунок 21). Как и в случае непрерывного литья прутков из меди М1, макроструктура медномагниевых сплавов характеризуется строением из преимущественно крупных кристаллов, достигающих длины 7 – 8 мм. Примечательно, что структура прутка из сплава CuMg 0,2 (рисунок 21, а) состоит из зёрен, имеющих кардинально разные размеры и форму, а граница данного различия пролегает точно вдоль по центральной оси прутка. Формирование такой структуры может быть объяснено разными условиями кристаллизации металла при поступлении его в графитовый кристаллизатор, и скорее всего, неполадкой в работе системы охлаждения. Однако, стоит отметить, что подобный дефект структуры литого прутка не является критическим в отношении качества прессуемого на установках CONFORM материала по причине высокой степени дробления литой структуры в очаге деформации при непрерывном прессовании.



а б

Рисунок 21 – Макроструктура литых прутков сплавов: а) CuMg 0,2; б) CuMg 0,5

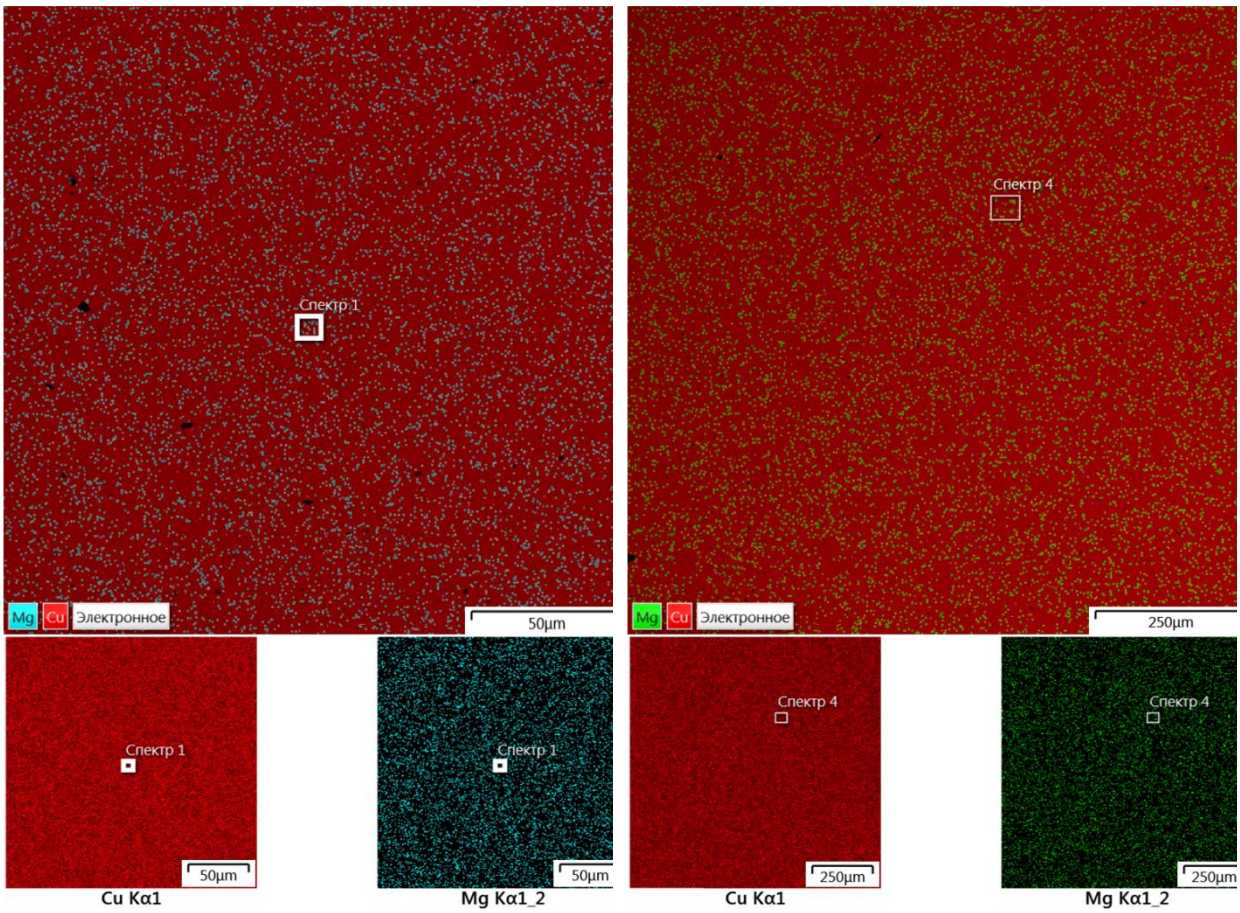
Также образцы литых прутков сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 подвергали рентгеноспектральному анализу на сканирующем электронном микроскопе. На рисунке 22 приведены картины распределения химических элементов на рассматриваемом участке образцов, а в таблице 7 сведены результаты химического анализа.

Таблица 7 – Результаты анализа химического состава сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5

Сплав	Элемент	Масс. %	Атом. %
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

Результаты анализа свидетельствуют о соответствии химического состава отлитых прутков из сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 стандарту EN 13388-2015. Также следует отметить равномерность распределения в структуре обоих сплавов содержащих магний фаз.

Как и в случае изготовления образцов из меди М1, полученные литые прутки прессовали в прутки круглого сечения диаметром 20 мм на установке CONFORM модели TLJ 400 при окружной скорости рабочего колеса 4 м/мин и температуре в очаге деформации 600 – 700 °С.



а б

Рисунок 22 – Снимки микроструктуры с картами химических элементов литых прутков сплавов: а) CuMg 0,2; б) CuMg 0,5

2.6 Выводы по главе

1. Представлена характеристика материалов исследования, система отбора темплетов и подготовки образцов для выполнения экспериментальных исследований.

2. Выполнено краткое описание принципов работы пластометрического комплекса «Gleeble System 3800». Разработана методика проведения исследований сопротивления деформации меди М1 и сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5.

3. Выбраны методы экспериментальных исследований деформированной структуры образцов, такие как рентгеноструктурный анализ, дифракция отражённых электронов, которые направлены на решение поставленных задач. Отмечено, что они являются прогрессивными методами исследований, обеспечивающими получение результатов высокой точности и информативности.

4. Обосновано сочетание экспериментальных методик с элементами математического и компьютерного моделирования МКЭ, что позволит достаточно подробно изучить особенности процесса непрерывного прессования длинномерных проводников из сплавов на основе меди.

Глава 3. Исследование реологических свойств меди и магниевых бронз

3.1 Сопротивление деформации технически чистой меди

Множество работ российских учёных и исследователей [74-76] посвящены выявлению характера влияния термомеханических параметров деформации на временное сопротивление материалов. Подробный анализ влияния температуры на сопротивление деформации меди и сплавов на её основе приведён в работах [77-79]. Большое число исследований научного коллектива под руководством Преснякова А. А. посвящены изучению пластичности меди и медных сплавов в широком диапазоне температурных и деформационных условий [80], а также прочностных характеристик, характерных для меди при различных условиях кристаллизации и термомеханической обработки [81]. Обобщая результаты данных работ можно заключить, что в медных сплавах при температуре ~400 °С протекает процесс динамической рекристаллизации, а при температурах выше 700 °С – перестаёт действовать механизм упрочнения сплавов, проявляющийся в процессе деформирования. Диапазон этих температур может варьироваться в зависимости от химического состава сплава, скорости и степени предварительной деформации, а также других условий.

Исследования сопротивления деформации технически чистой меди охватывают широкий диапазон температурно-скоростных параметров её деформации, хорошо структурированы и обобщены в многочисленных справочниках. Так, в справочнике [79] приведены результаты испытаний меди марки М1 для температур 450-600-750-950 °С, диапазона скоростей деформации от $2 \cdot 10^{-1}$ до 10^{2} $с^{-1}$ и величин степени относительной деформации 10 и 20 %. В справочнике [77] собраны и представлены результаты испытаний сопротивления деформации, охватывающие основные марки технически чистой меди. Для сплавов М0, М1, М2 представлены кривые текучести полученные при температуре деформации 20 °С, диапазона скоростей деформации $5 \cdot 10^{-3}$ – 50 $с^{-1}$ и степени деформации 0 – 0,7. Там же представлены данные относительно сопротивления деформации сплава М1 для температур 450 – 950 °С, диапазона скоростей деформации от 0,4 до 18 $с^{-1}$ и степени относительной деформации до 80 %. Наибольший интерес с точки зрения процесса непрерывного прессования меди М1 представляют данные, представленные в этом же справочнике, и описывающие сопротивление деформации меди М1 при температурах 20, 150, 250, 350, 500, 650 °С, при скоростях деформации 1, 10 и 50 $с^{-1}$, и степени деформации от 0,05 до 0,5 (рисунок 26).

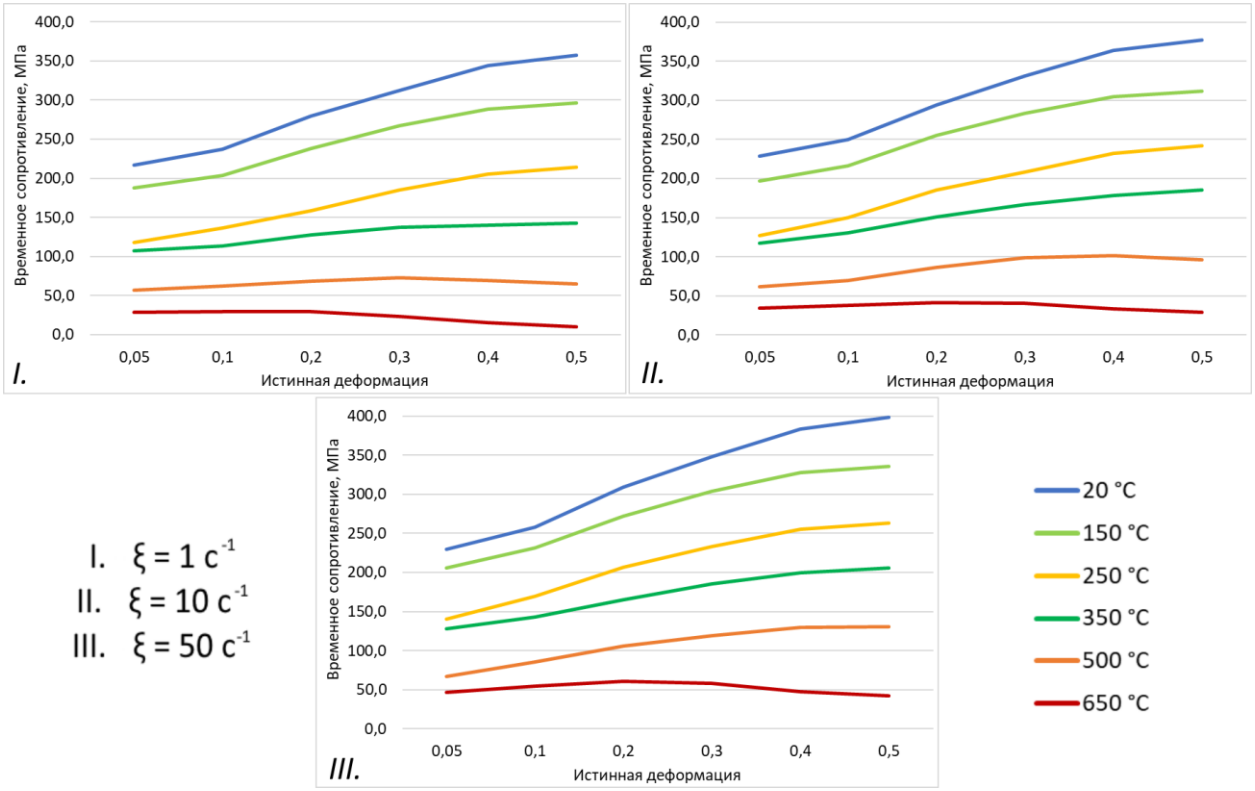


Рисунок 26 – Зависимость временного сопротивления от температуры, скорости и степени деформации меди М1 [77]

С целью проверки и возможного уточнения данных, а также оценки степени влияния технологических параметров литья медных прутков на их прочностные характеристики при дальнейшей деформации, был проведён ряд испытаний реологических свойств на литых образцах, полученных при скоростях вытягивания 300 и 500 мм/мин. Цилиндрические образцы, изготовленные согласно п. 2.2, подвергали испытанию на одноосное сжатие при температуре 480 °С и скорости деформирования 75 мм/сек. Выбранная скорость деформирования, при переводе в скорость деформации, характеризуется нелинейным характером её приращения. Так скорость деформации при испытаниях составила 8, 12 и 20 $с^{-1}$ при значениях истинной деформации 0,1, 0,5 и 1,0 соответственно. Результаты реологического исследования приведены на рисунке 27.

Полученные графики 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 можно считать, 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.

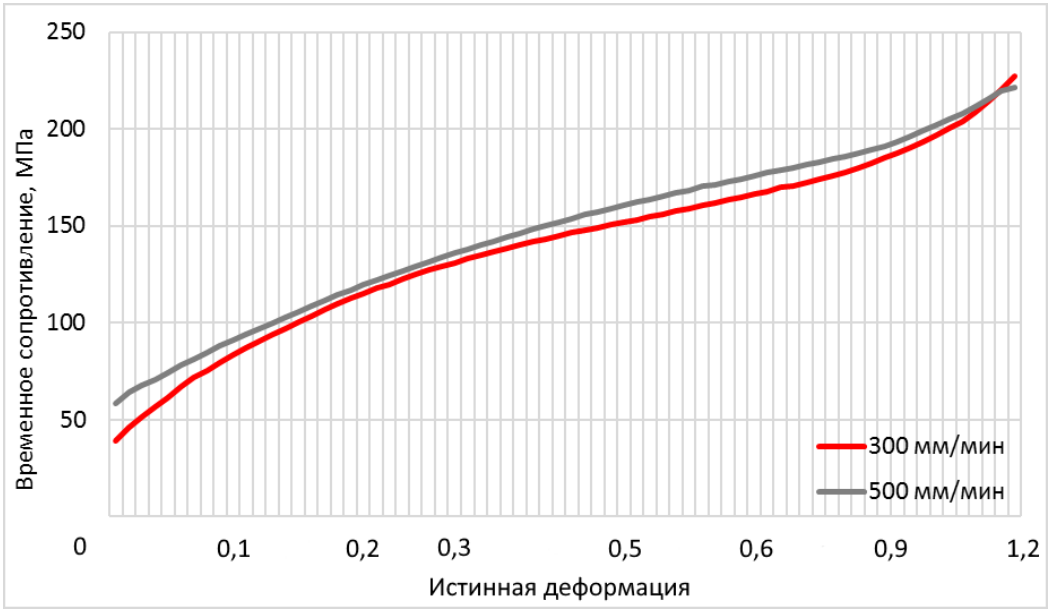


Рисунок 27 – Зависимость временного сопротивления от степени и скорости деформации меди марки М1, отлитой при скоростях вытягивания из расплава 300 и 500 мм/мин

3.2 Результаты экспериментального исследования сопротивления деформации магниевых бронз

Исследование реологических свойств медномагниевых сплавов были выполнены для интервала температур и скоростей деформации, представленных в таблице 7. На рисунках 28 и 29 приведены некоторые результаты испытаний сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5, не подвергавшиеся какой-либо математической обработке.

Полученные кривые упрочнения характеризуются постоянным ростом временного сопротивления, отсутствием ярко выраженного максимума и установившейся стадии течения. Такой тип кривых наиболее характерен для динамического нагружения в условиях теплой или горячей деформации, когда разрушение происходит раньше достижения материалом стадии установившегося течения. Литературные данные [82] свидетельствуют, что при подобном виде кривых текучести для материалов характерна низкая пластичность, что в данном случае скорее всего вызвано крупной кристаллической структурой испытываемых образцов (рисунок 21). Подобный характер кривых встречается в высокотемпературных испытаниях некоторых бронз, а также сплавов никеля и хрома [77].

Анализируя полученные экспериментальные значения сопротивления деформации сплава CuMg 0,2 (рисунок 28), можно отметить значительное упрочнение, которое проявляется наиболее заметно при низких температурах и высоких скоростях деформации. Увеличение температуры деформации приводит к снижению временного сопротивления. Так при увеличении температуры деформации с 400 °С до 700 °С сопротивление деформации снижается в 1,75 раза, а при увеличении до 900 °С – в 4 раза.

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.

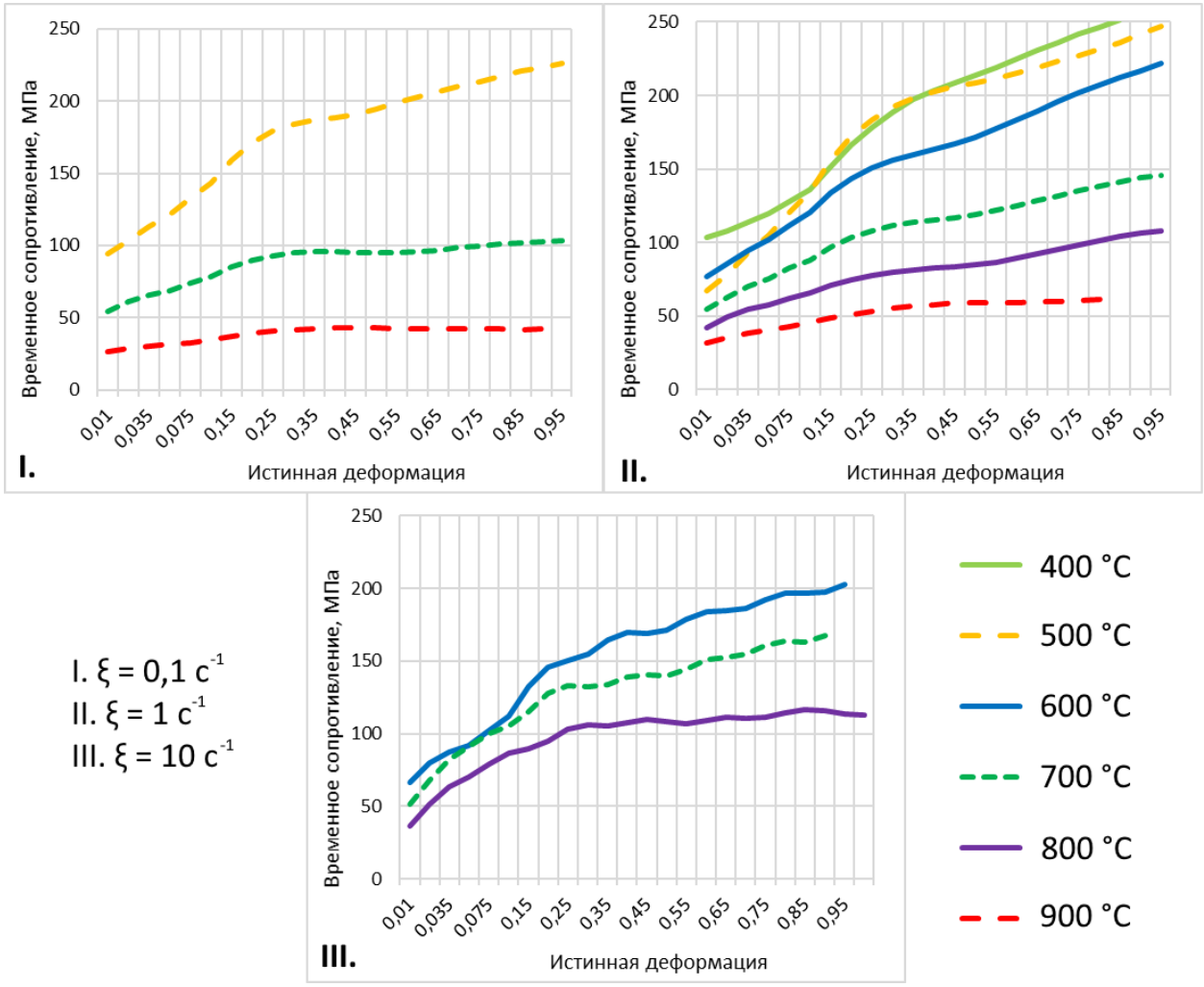


Рисунок 28 – Зависимость временного сопротивления от температуры, скорости и степени деформации сплава CuMg 0,2

Тенденции развития величины временного сопротивления при деформации сплава CuMg 0,5 (рисунок 29) в целом схожи с результатами деформации сплава CuMg 0,2. Кривые также демонстрируют постоянный рост значений временного сопротивления и характеризуются отсутствием установившейся стадии течения.

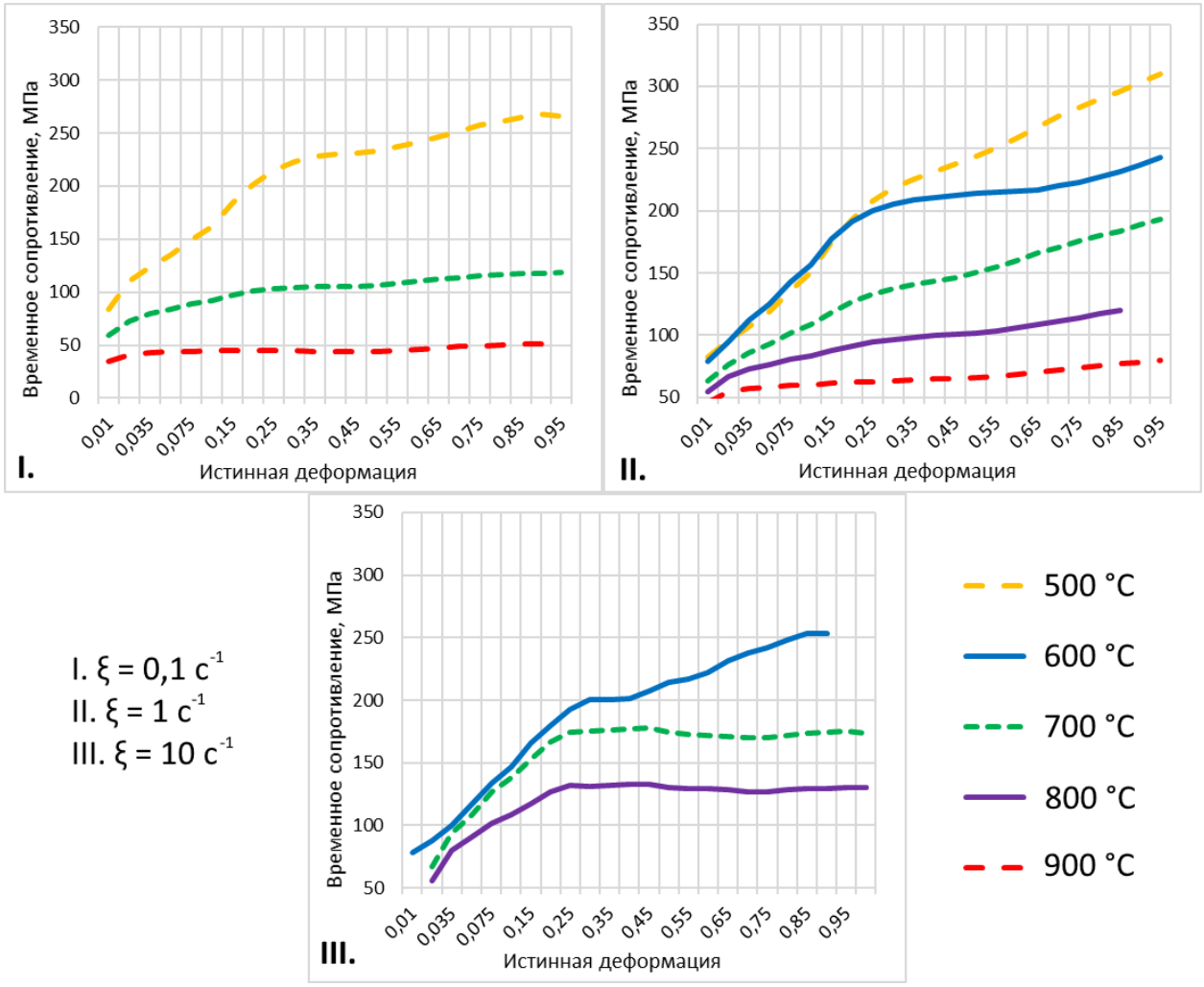


Рисунок 29 – Зависимость временного сопротивления от температуры, скорости и степени деформации сплава CuMg 0,5

В среднем, по результатам измерений, сопротивление деформации сплава CuMg 0,5 на 20 % выше, чем у сплава с 0,2 % магния. Наибольшая разность значений временного сопротивления этих сплавов проявляет себя при низкой температуре нагрева и низкой скорости деформации, а при их увеличении разница сокращается. Так, при температуре испытаний 500 °С, скорости деформации 0,1 $с^{-1}$ и степени деформации 0,95, прочность бронзы CuMg 0,5 превосходит прочность CuMg 0,2 на 40 МПа, а при температуре 800 °С, скорости деформации 10 $с^{-1}$ и той же величине накопленной деформации – на 17 МПа.

Полученные в результате выполнения эксперимента затем подвергали математической обработке для их корректировки по температурным и трибологическим условиям.

Корректировка диаграмм временного сопротивления сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 для учета влияния трения между образцом и инструментом основывается на коэффициенте трения μ. Коэффициент трения в процессе испытания принимается постоянным. Так как

при испытании на сжатие цилиндра его высота уменьшается, в то время как диаметр, а значит и площадь контакта образца с инструментом, возрастают, то влияние коэффициента трения на временное сопротивление деформации материала может быть описано формулой:

$$\sigma_{\text{расч.тр}} = \frac{\sigma_{\text{эксп}}}{1 + f \cdot \exp(3 \cdot \varepsilon/2)}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{расч.т}}$ – расчётное значение временного сопротивления с учётом влияния трения, МПа; $\sigma_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение временного сопротивления, МПа; ε – истинная деформация; f – поправочный коэффициент на трение и форму образца, рассчитываемый по формуле:

$$f = \mu \cdot (d_0/h_0/3)^{1,5}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент трения (определённый экспериментально и равный 0,25); d_0 – исходный диаметр образца, мм; h_0 – исходная высота образца, мм.

Корректировку диаграмм временного сопротивления по температуре и скорости деформации выполняли путём аппроксимации экспериментальных данных, определения трёх переменных (температуры, логарифма деформации, логарифма скорости деформации) и построения изо-деформационных срезов, позволяющих провести анализ адекватности выполненной аппроксимации.

В результате корректировки получены зависимости временного сопротивления материала от степени деформации, с учётом поправок на деформационный разогрев, с корректировкой на отклонение мгновенной скорости от заданной, и с учётом поправки на трение при осадке. Сравнение кривых упрочнения сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 до и после корректировки, построенных для температуры испытаний 600 °C и скорости деформации 1 $с^{-1}$, приведены на рисунках 30 и 31 соответственно.

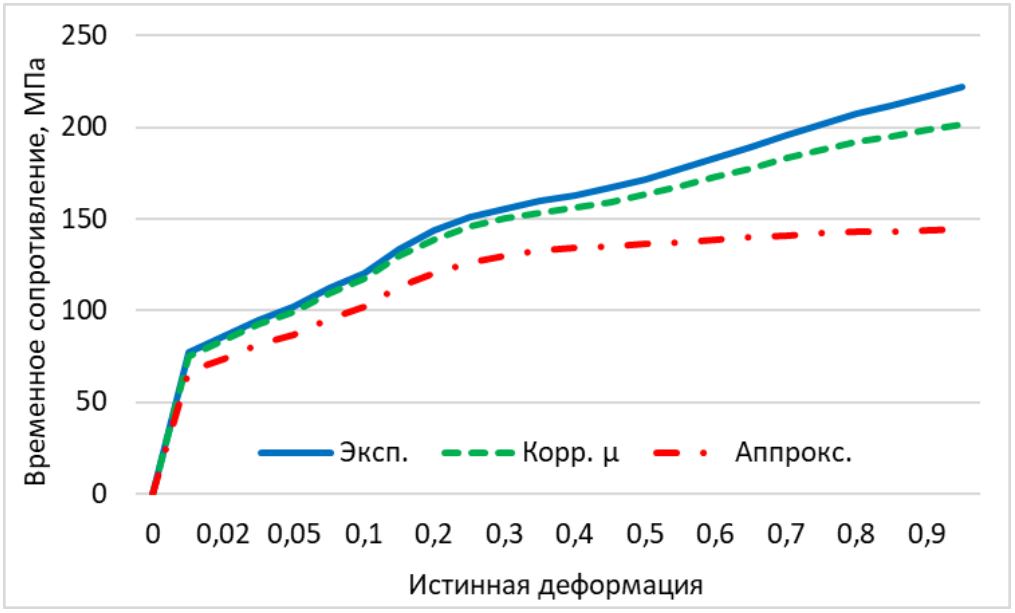


Рисунок 30 – Сравнение кривых временного сопротивления деформации сплава CuMg 0,2 до (Эксп.) и после корректировки на трение (Корр. μ) и корректировки на температуру и скорость деформации (Аппрокс.)

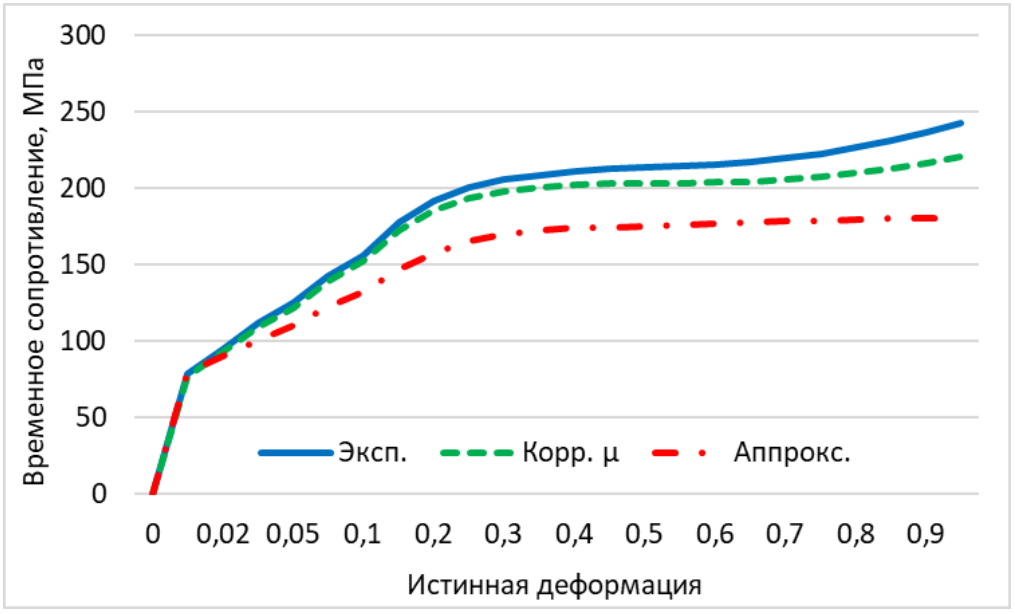


Рисунок 31 – Сравнение кривых временного сопротивления деформации сплава CuMg 0,5 до (Эксп.) и после корректировки на трение (Корр. μ) и корректировки на температуру и скорость деформации (Аппрокс.)

По итогам проведения экспериментальных и расчётных итераций было получено 119 кривых деформации для каждого из испытуемых сплавов, описывающие реологию материала в диапазоне температур 350 – 950 °C и скоростей деформации 0,00316 – 31,6 $с^{-1}$

(приложение А), а также при комнатной температуре и скоростях деформации 1 и 5 $с^{-1}$. При оценке полученных данных можно вывести следующие зависимости:

- рост временного сопротивления металла деформации сопровождается процессами упрочнения и разупрочнения. Важно отметить, что разупрочнение преобладает при низких скоростях деформации и высоких температурах степени деформации, что способствует общему снижению сопротивления деформации;

- временное сопротивление сплава CuMg 0,5 (по причине большего количества легирующего вещества в составе) выше, чем у сплава CuMg 0,2. Данная тенденция наиболее заметна при более низкой температуре испытаний и больших скорости и степени деформации;

- температура деформации в большей степени оказывает влияние на характеристику временного сопротивления материалов, чем скорость деформации, что вызвано экспоненциальным характером её воздействия.

3.3 Выводы по главе

1. Исследование реологических особенностей деформации меди М1 показало, что скоростные условия литья, не смотря на оказываемое ими влияние на формирование кристаллической структуры, не играют существенной роли в формировании прочностных характеристик материала.

2. В результате выполнения экспериментальной работы по изучению 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.

3. В результате проведения статистической обработки экспериментальных данных получены значения временного сопротивления сплавов CuMg 0,2 и CuMg 0,5 для температурно-скоростных диапазонов деформации, характерных процессу непрерывного прессования, что является важной частью задания граничных условий для получения возможности адекватного решения численной задачи путём КЭ-моделирования.

Глава 4. Исследование особенностей непрерывного прессования профилей из меди марки М1

4.1 Эволюция структуры и механических свойств шин и прутков из меди М1 в процессе непрерывного прессования

Исследование характера течения, эволюции микроструктуры и формирования механических свойств сплава М1 в очаге деформации в процессе прессования CONFORM выполняли применительно к экструдированию 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 (п. 2.5), вдоль направления литья в центральном сечении, характеризуется крупным размером зёрен (рисунок 32), величина которых достигает 800 – 1000 мкм.

Рисунок 32 – Микроструктура литого прутка М1 в центральном сечении

Для исследования непосредственно очага деформации были отобраны пресс-остатки от прессования прутков и шин (рисунок 33). Отбор пресс-остатков из пресс-камеры установки CONFORM производили в следующем порядке: остановка главного вала; перевод установки с пульта управления в режим “обслуживание”; извлечение термопары;

сброс давления в гидравлической системе; снятие ножа для срезания облоя; открытие башмачной клети; извлечение пресс-контейнера, содержащего пресс-остаток.

Рисунок 33 – Пресс-остатки от прессования прутков и шин

Образцы для дальнейшего исследования вырезали из среднего вертикального сечения темплетов, расположенного вдоль оси прессования (в плоскости XZ), а затем, после соответствующей обработки (п. 2.2) исследовали микроструктуру образцов в условных областях очага деформации: в зоне пресс-камеры (A), матрицы (B) и области отпрессованного профиля (C) согласно схеме (рисунок 34).

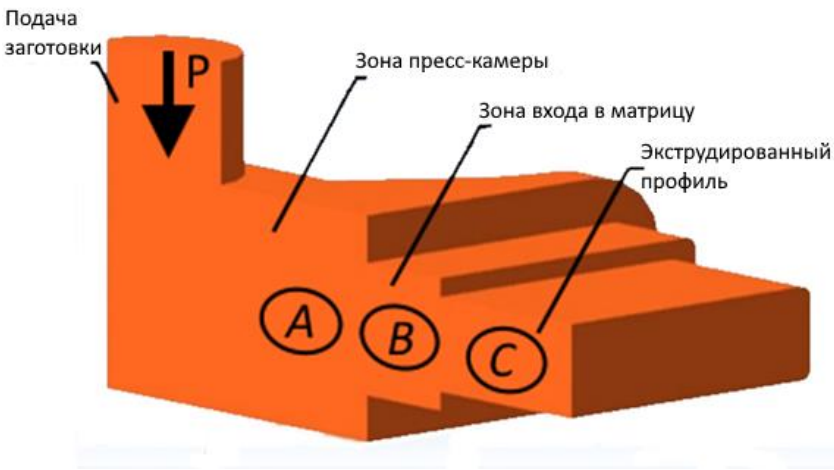


Рисунок 34 – Схема участков очага деформации процесса непрерывного прессования

Полученные снимки микроструктуры свидетельствуют о повсеместном разрушении литой структуры в пресс-камере и образовании более мелкой структуры (рисунок 35, А), с размерами зерён 35 – 40 мкм, определяемой сравнением с эталоном [83]. При продвижении металла к матрице с заданной конфигурацией и его истечения через неё, формируется определенная ориентировка зерен в направлении прессования и возникает подобие текстуры рекристаллизации, с сохранением средней величины зерна – 40 мкм (рисунок 35, В и С).

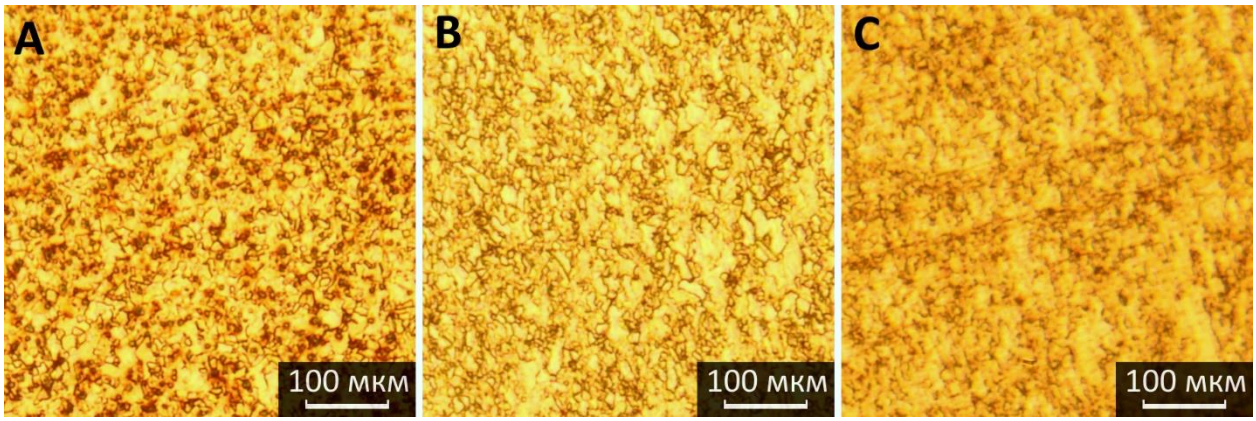


Рисунок 35 – Эволюция структуры в процессе прессования прутка диаметром 8 мм

Общая картина разрушения литой кристаллической структуры в области перед матрицей сохраняется и при прессовании прутков диаметром 24 мм с некоторым отличием в величине зерна (рисунок 36, А). Здесь проявляются небольшие области с более крупным зерном – до 50 мкм. После прохождения матрицы размер зерна существенно не изменяется (рисунок 36, В и С) и также отмечается некоторая ориентировка зерен вдоль направления истекания материала [84, 85].

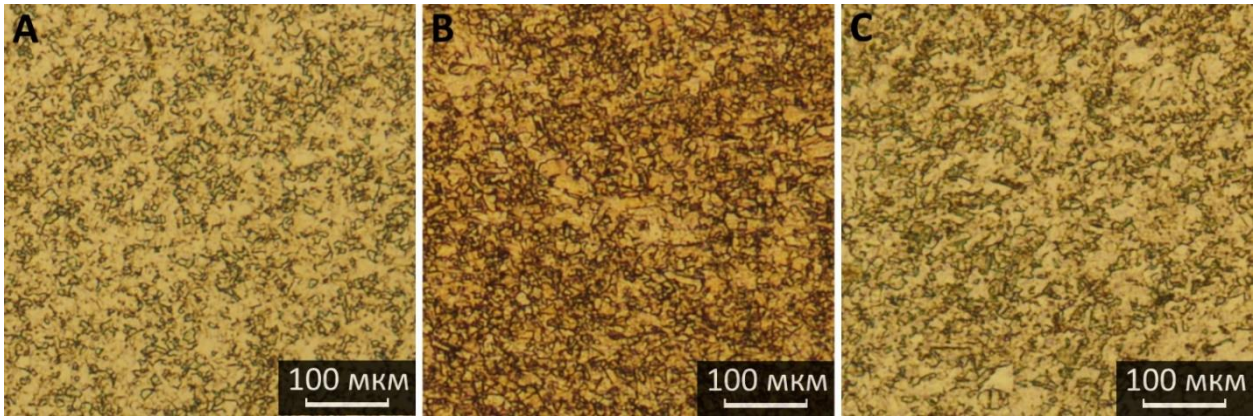


Рисунок 36 – Эволюция структуры в процессе прессования прутка диаметром 24 мм

Картина структурообразования при прессовании прутков диаметром 30 мм аналогична вышеприведённым результатам (рисунок 37).

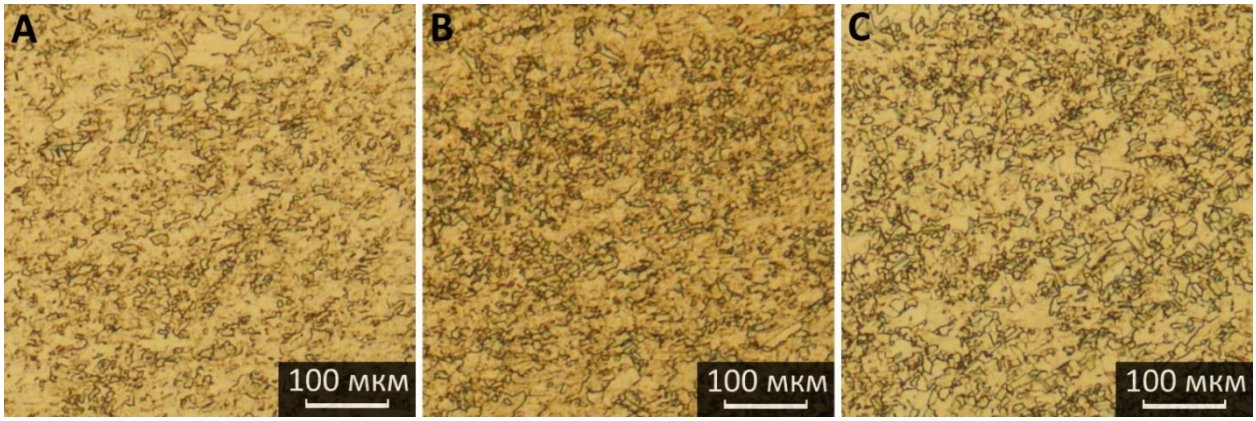


Рисунок 37 – Эволюция структуры в процессе прессования прутка диаметром 30 мм

Изучение характера изменения микроструктуры меди М1 в процессе прессования шин показало, что общие закономерности её формирования на участках перед матрицей и после неё, в общем сохраняются. На рисунке 38, А представлена микроструктура образцов шины 10×30 мм в зоне пресс-камеры. Зерна здесь несколько крупнее, чем у образцов, отобранных от прессования прутков. И после прессования здесь так же отмечается ориентированно-направленные рекристаллизованные зёрна (рисунок 38, В и С) [86].

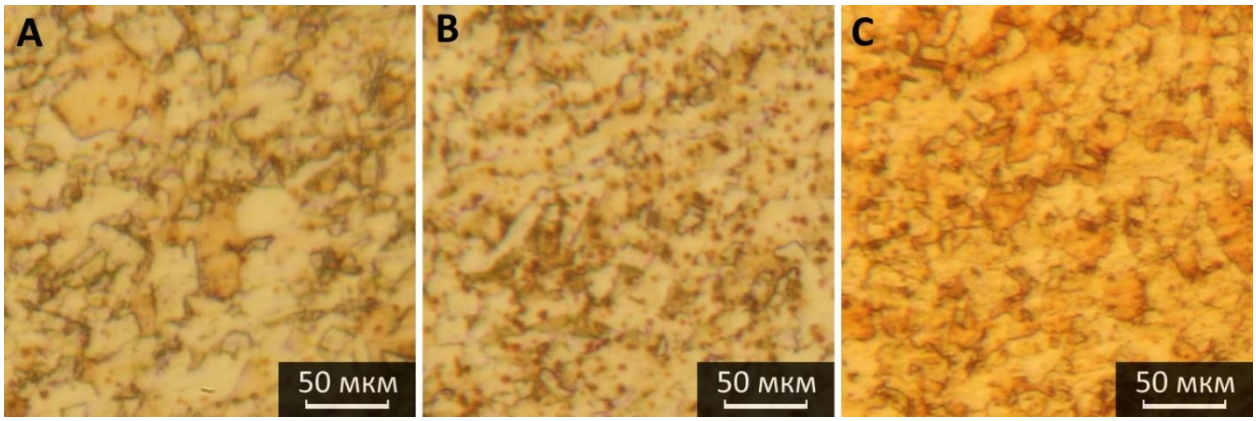


Рисунок 38 – Эволюция структуры в процессе прессования шины 10×30 мм

Следует отметить, что характер формирования микроструктуры перед матрицей, после разрушения литой структуры, не изменяется, в сравнении с ранее рассмотренными образцами, поскольку суть процесса CONFORM, его параметры, существенно не изменяются. В качестве примера приведены фотографии структуры до и после прессования шин размерами: 10×60 мм (рисунок 39); 10×80 мм (рисунок 40); 10×100 мм. (рисунок 41).

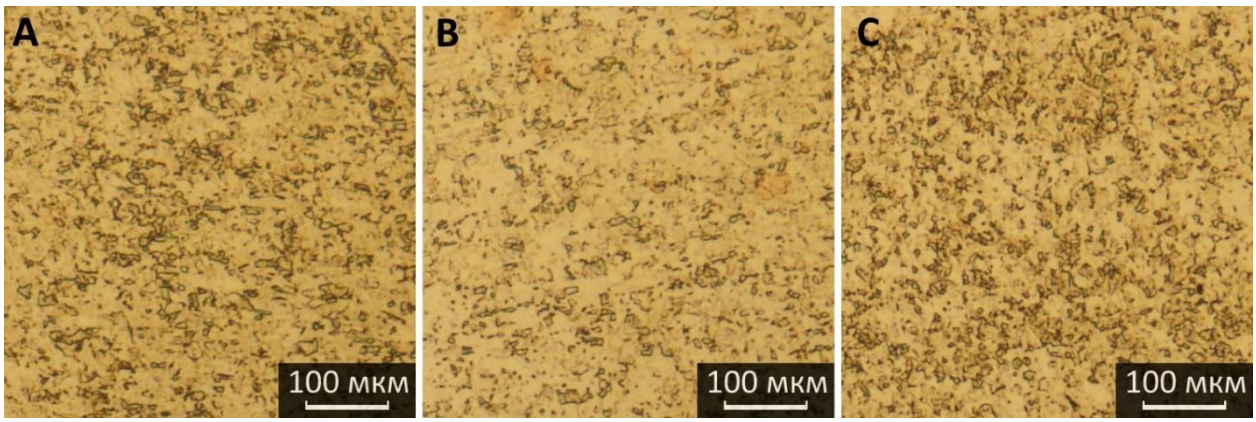


Рисунок 39 – Эволюция структуры в процессе прессования шины 10×60 мм

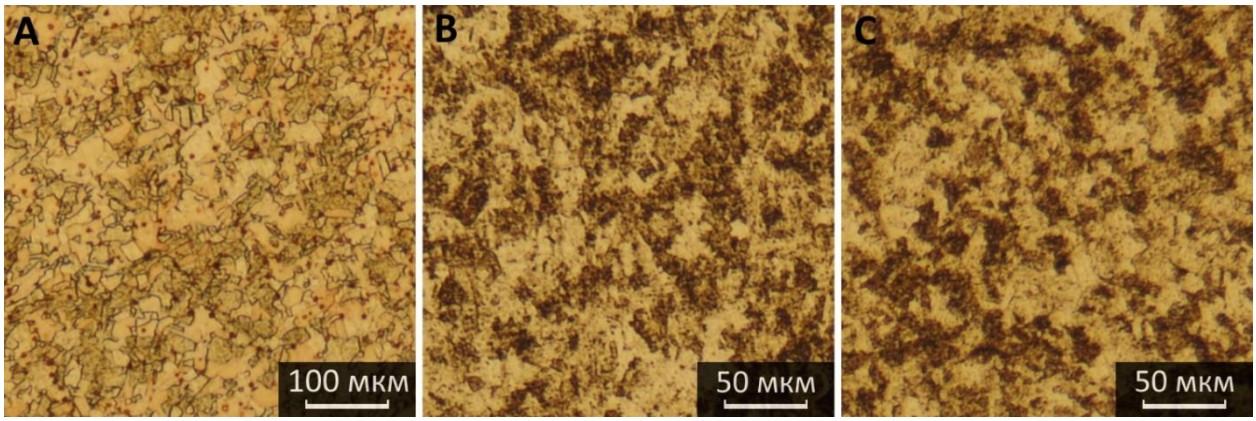


Рисунок 40 – Эволюция структуры в процессе прессования шины 10×80 мм

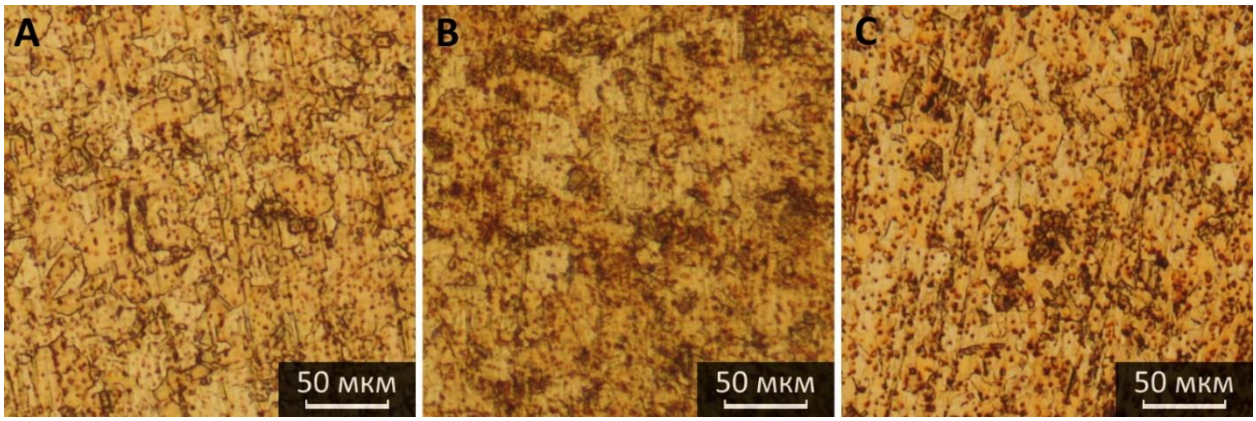


Рисунок 41 – Эволюция структуры в процессе прессования шины 10×100 мм

Следует также указать на некоторые особенности непрерывного прессования CONFORM. В процессе прессования, вследствие течения металла в технологический зазор пресс-камеры, неизбежно образуется облой. На рисунке 42 представлена микрофотография переходной зоны от тела прутка к облою. Мелкозернистая область, сформированная глобальной перестройкой литой структуры, переходит через четкую границу в крупнозернистую область, в которой объемные деформации значительно меньше,

поскольку металл утекает в свободное пространство, образованное зазором, и зёрна при этом не подвергаются дальнейшей деформации, а продолжают расти под действием высокой температуры основной массы металла в пресс-камере.

Рисунок 42 – Структура переходной зоны прессуемого материала из очага деформации в облой

На рисунке 43 представлено изменение твёрдости вдоль линии центрального сечения в направлении прессования прутков диаметром 8, 24 и 30 мм от наполнительной камеры вплоть до выхода из матрицы. По оси ординат указаны значения величины микротвёрдости, по оси абсцисс расстояние в миллиметрах от начала измерения в пресс-камере и до выхода из матрицы.

Перед поступлением в пресс-камеру твёрдость литого прутка диаметром 20 мм составляет 56,8 HV, что отвечает мягкому состоянию меди марки М1. 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 [27], и выделения при этом деформационного тепла, металл разогревается и его твёрдость снижается до 90,8 HV (рисунок 43).

У прутка диаметром 24 мм обнаруживаются схожие закономерности изменения микротвёрдости вдоль очага деформации. Перед поступлением металла к матрице его твёрдость в накопительной камере возрастает с 78,6 до 105,3 HV непосредственно перед матрицей. Но по причине развития процессов динамической рекристаллизации твердость, как и в случае прессования прутка диаметром 8 мм, снижается до 97,4 HV. В обоих этих рассматриваемых случаях максимум на кривых соответствует моменту входа металла в матрицу.

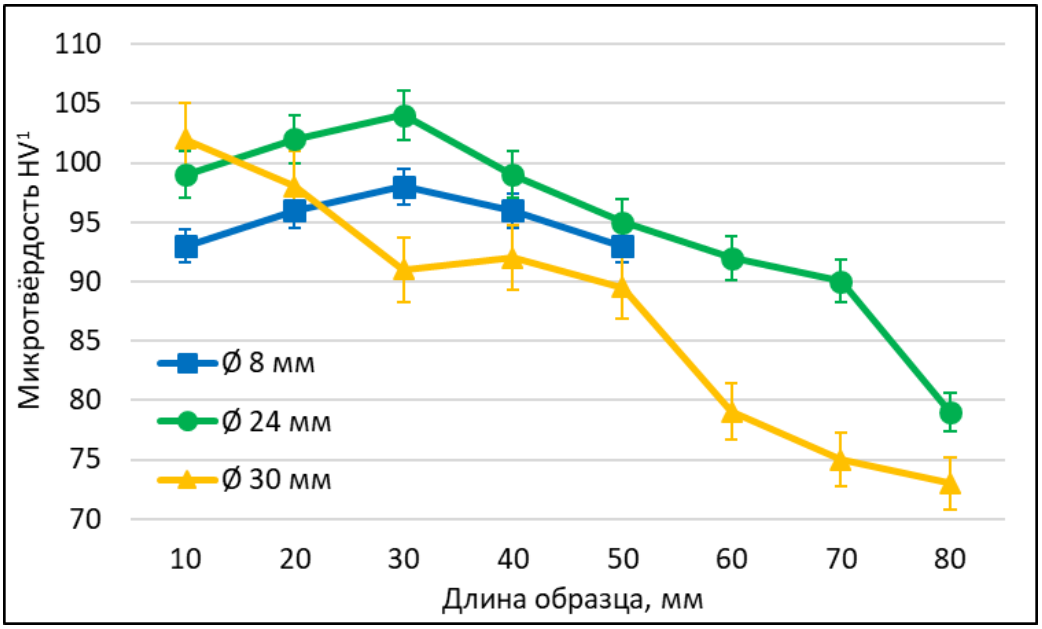


Рисунок 43 – Изменение микротвёрдости вдоль очага деформации при прессовании медных прутков

При прессовании прутка диаметром 30 мм максимум значений твёрдости на кривой (рисунок 43) не выявляется, но заметно падение её значений с 102 HV в накопительной камере до 76,9 HV в области за матрицей. Такой, отличный от других, ход кривой вероятно обусловлен значительно большим объёмом металла, находящимся в накопительной камере и соответственно иными условиями деформационного разогрева.

Схема измерений микротвёрдости вдоль линии центрального сечения прессованных шин размерами 10×30, 10×60, 10×80 и 10×100 мм аналогична схеме использованной при измерении твёрдости прутков. Результаты измерений приведены на рисунке 44. В случае непрерывного прессования шин размерного ряда 10×30 – 10×80 мм картина изменения твёрдости вдоль очага деформации имеет схожий вид с изменением твёрдости прутков. Так, перед входом в матрицу обнаруживается небольшой максимум её значений, который затем, по мере прохождения матрицы, снижается.

Однако при прессовании шины размером 10×100 мм закономерности изменения микротвёрдости существенно отличаются. Это связано со значительным объёмом металла, находящимся в пресс-камере в данном случае. По мере накопления металла в пресс-камере, в условиях непрерывности процесса CONFORM, и повышения его температуры, твёрдость непосредственно перед матрицей снижается с 81,2 до 59,1 HV. После прохождения матрицы шина сразу контактирует своей достаточно большой поверхностью с охлаждающей средой, в результате чего происходит рост твёрдости материала до 77 HV.

Можно утверждать, что в данном случае процесс рекристаллизации развивается менее динамично.

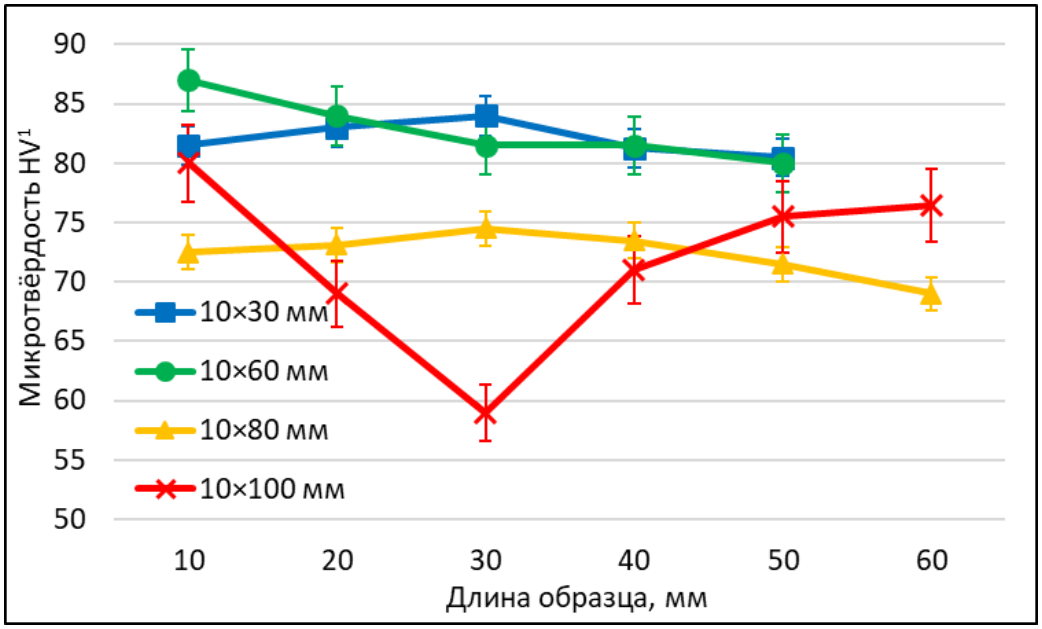


Рисунок 44 – Изменение микротвердости вдоль очага деформации при прессовании медных шин

В настоящее время принято считать [87], что медные прямоугольные шины, производимые по технологии непрерывного прессования CONFORM, отвечают мягкому состоянию. Согласно приведённым выше данным измерений данный факт не подтверждается, поскольку значения твёрдости полученных изделий составляют более 65 HV, что может соответствовать лишь полутвёрдому состоянию.

4.2 Компьютерное моделирование и анализ НДС в очаге деформации процесса CONFORM

Наиболее подробное изучение характера эволюции микроструктуры, формирования механических свойств, а также исследование напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации проводили для процесса прессования прессования прямоугольной электротехнической шины размером 10×60 мм. По аналогии с методикой выполнения исследования, описанного в п. 4.1, из рабочего узла инструмента, после остановки процесса прессования извлекали пресс-остаток, который затем резали вдоль центрального вертикального сечения (рисунок 45), чтобы затем изготовить из него образцы для исследования параметров по длине очага деформации и ширине с шагом 10 мм.

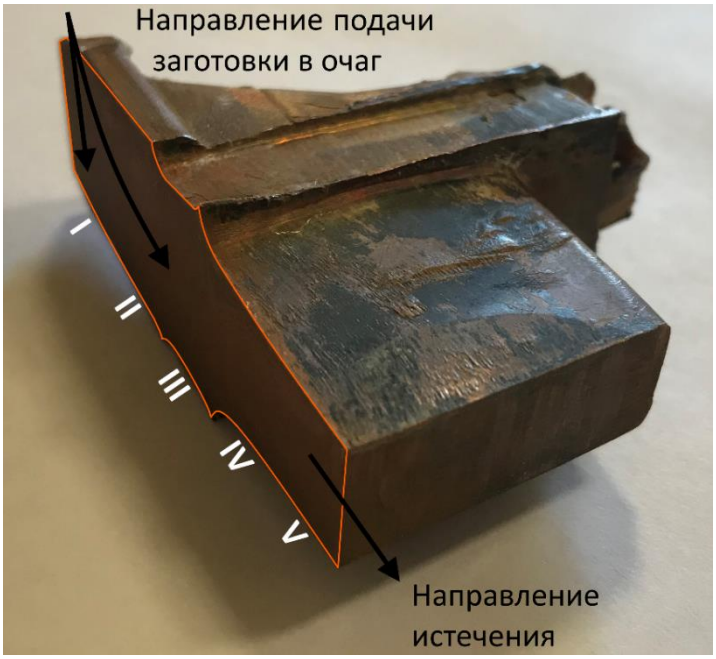


Рисунок 45 – Снимок половины темплета с указанием зон очага деформации вдоль центрального сечения: I – область упора; II – пресс-камера; III – форкамера; IV – область матрицы; V – истечение из матрицы

Результаты компьютерного моделирования

Физико-механические процессы, происходящие и развивающиеся непосредственно в очаге деформации при прессовании, оказывают существенное влияние как на сам технологический процесс прессования, так и на формирование функциональных свойств изделий.

На рисунке 46 отображено изменение во времени процесса прессования расчётных момента на рабочем колесе и усилия, действующего на матрицу. При вхождении прутка в зазор между рабочим колесом и прижимным роликом значения вращающего момента на колесе и усилия близки к нулю и мало изменяются вплоть до достижения заготовкой упора. В этот момент происходит резкий рост величины момента до 66 кН·м и сохраняется до момента контакта металла с матрицей. При этом усилие, оказываемое на матрицу, монотонно возрастает по мере заполнения пресс-камеры. С увеличением объема её заполнения рост значений момента и усилия ускоряется и продолжается до полного заполнения пространства форкамеры и начала истечения металла через отверстие матрицы. Максимальные значения момента и усилия при этом достигают 122,6 кН·м и 1,54 МН соответственно. Далее, по мере выравнивания температуры в очаге деформации, происходит постепенное снижение значений момента вращения рабочего колеса и усилия на матрицу до 15 % от максимальных. Также стоит отметить колебания момента вращения, возникающие на установившемся этапе прессования (с 11ой секунды). Так как реализация

процесса CONFORM происходит полностью за счёт сил трения между прутком и канавкой рабочего колеса, то важно минимизировать скольжение между ними для обеспечения стабильности процесса прессования. Результаты расчёта показывают, что крутящий момент колеблется в небольшом диапазоне (± 2 %), что свидетельствует о низком уровне проскальзывания заготовки.

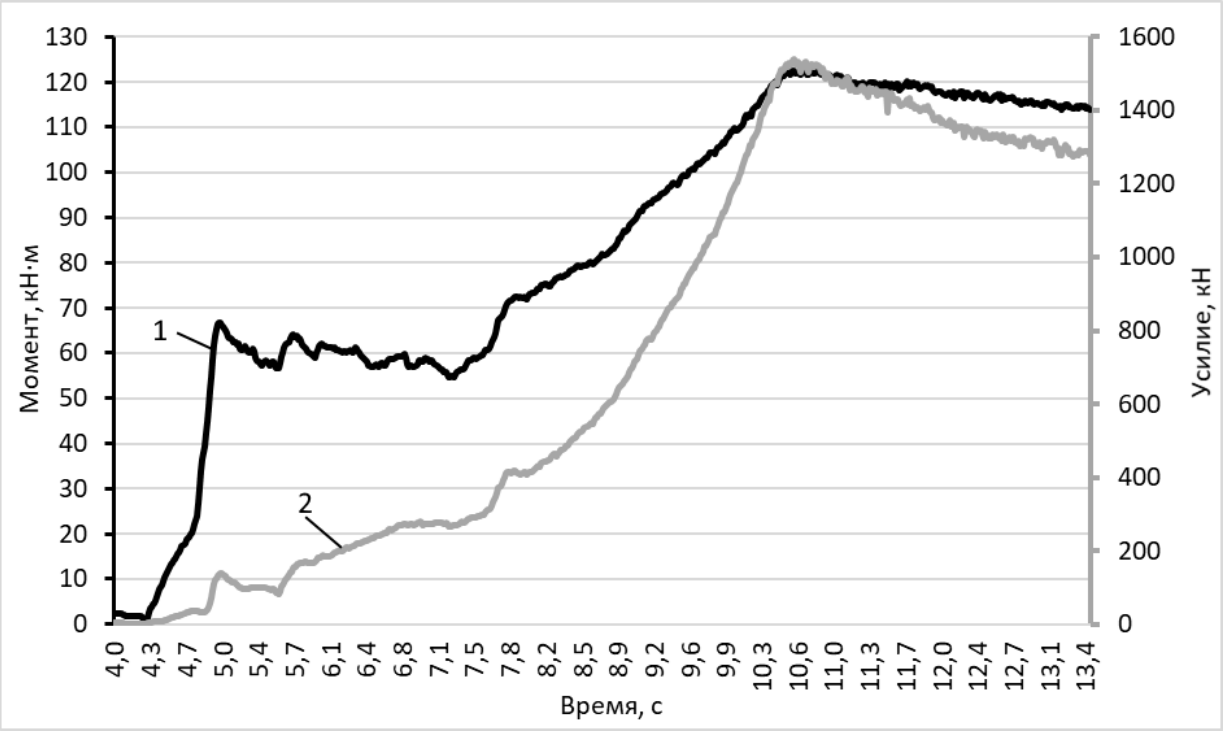


Рисунок 46 – Изменение момента на рабочем колесе (1) и усилия на матрицу (2) от времени процесса прессования шины

Для обработки результатов расчёта температурной модели процесса непрерывного прессования выполняли трассировку точек, расположенных вдоль центральной оси заготовки. На рисунке 39 приведён график изменения температуры для трёх точек – Р1, Р2 и Р3, которые удалены от переднего конца заготовки на расстояние 25, 250 и 400 мм соответственно. Шкала времени не регулярна, что является следствием изменения в ходе расчёта величины шага моделирования. Выбор расстояния обусловлен стадиями процесса прессования, которые отчётливо видны на графиках (рисунки 46 и 47): так, точка Р1 характеризует температуру металла на стадиях заполнения канавки рабочего колеса и его вхождения в очаг деформации; Р2 – стадии заполнения металлом пресс-камеры и начала истечения через отверстие матрицы; Р3 – стадию установившегося процесса непрерывного прессования.

На этапе продвижения металла вдоль башмачной клети температура металла не изменяется, однако по достижении им упора происходит выделение большого количества тепла, разогревающего его до 300 °С (рисунок 47, Р1). Далее, по мере накопления металла в форкамере, температура в первой точке растёт незначительно, только лишь за счёт теплообмена с поступающими объемами материала. Кривая Р2 свидетельствует о двух этапах разогрева рассматриваемого участка заготовки – сперва небольшое количество тепла выделяется в уже заполненном канале рабочего колеса, в зоне входа в пресс-контейнер (участок распрессовки), затем точка достигает области упора, где вследствие сдвиговых деформаций металл разогревается до 400 °С. На стадии установившегося процесса прессования (рисунок 47, Р3) разогрев металла в канавке не выражен так ярко, как на предыдущей стадии, и происходит по мере прохождения точкой участка близ упора. В результате моделирования максимальная температура наблюдается на контакте материала прутка с упором и на последней стадии процесса составляет 457 °С, что не нашло отражения на кривых (рисунок 47) по причине небольшой отдалённости отслеживаемых точек от эпицентра температурного роста. Дальнейшее продвижение металла вдоль очага деформации и его истечение через матрицу сопровождаются снижением его температуры, о чем свидетельствуют кривые Р2 и Р3.

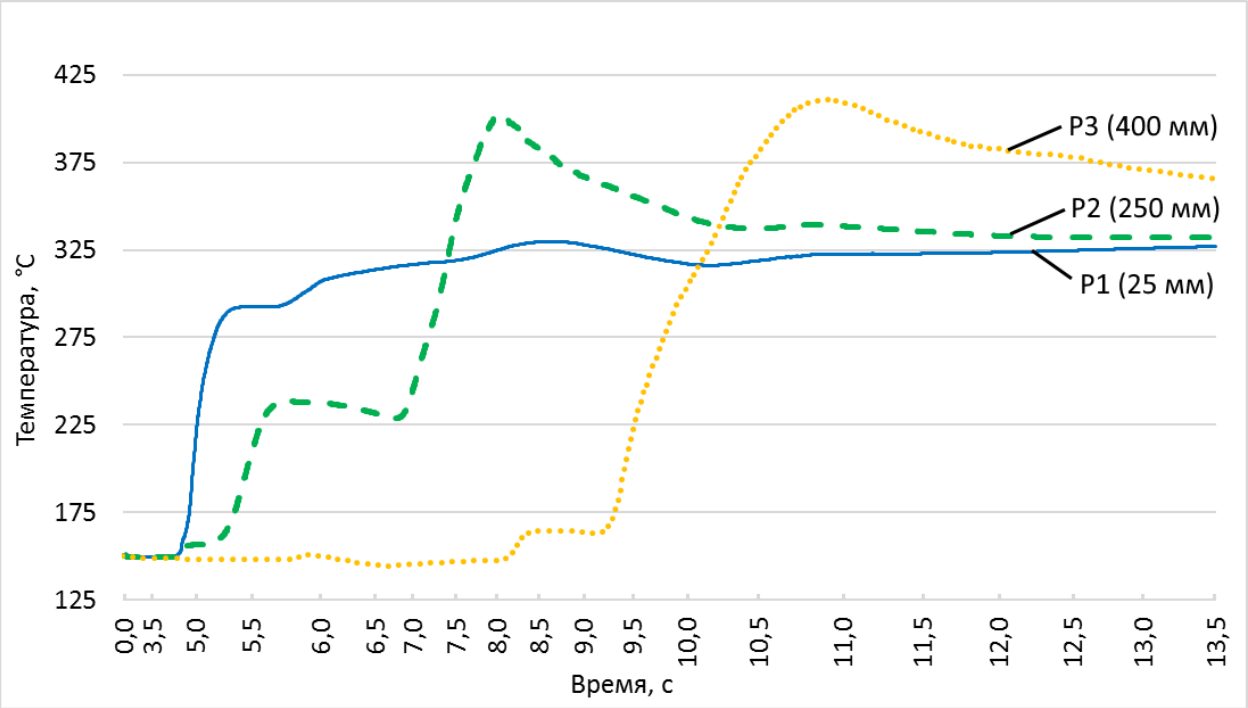


Рисунок 47 – График изменения температуры заготовки от времени процесса прессования

На рисунках 48 и 49 приведены поля распределения накопленной деформации, интенсивности скоростей деформации [88] и среднего напряжения, в вертикальном и

горизонтальном центральных сечениях очага деформации на стадии установившегося процесса прессования. Как известно [89], накопленная деформация и компонента сдвиговой деформации в определённой степени оказывают влияние на изменение размера зерна в процессе пластической деформации. На стадии заполнения металлом канавки колеса степень накопленной деформации составляет всего 0,5 – 1 (рисунок 48), однако по достижении им упора её величина резко возрастает до средних значений 50 – 100, при максимуме 300 – 350, который обнаруживает себя непосредственно на участке контакта заготовки и упора (рисунок 48, а).

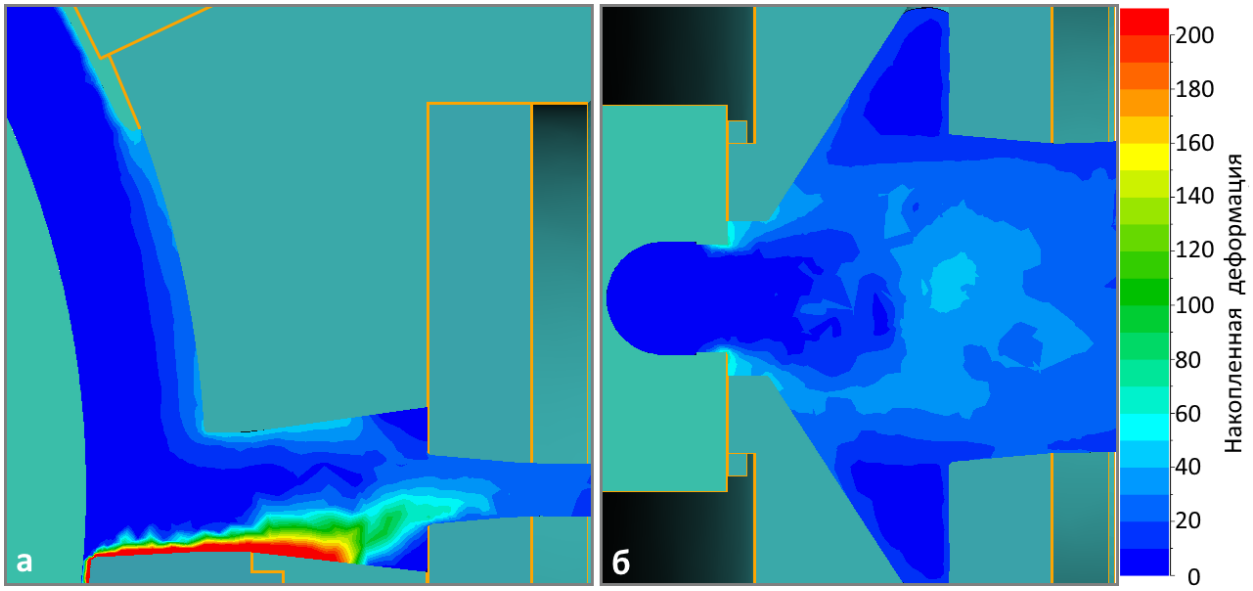


Рисунок 48 – Распределение накопленной деформации в вертикальном (а) и горизонтальном (б) центральных сечениях очага деформации

Далее, в соответствии с особенностями течения металла в процессе непрерывного прессования происходит заполнение металлом расширяющихся частей форкамеры и мёртвых зон пресс-камеры, где степень накопленной деформации сохраняет низкие значения. Проистекающий через матрицу материал характеризуется высокой накопленной деформацией в сердцевине шины, колеблющейся в пределах значений от 40 до 70, и образованной там в ходе перемещения объема металла от упора. Средние значения накопленной деформации на периферийных участках шины составляют 20 – 30, что достигается за счёт работы деформации на входе в матрицу, которая прослеживается на полях распределения интенсивности скоростей деформации (рисунок 49, а).

Результаты расчёта распределения интенсивности скоростей деформации (рисунок 49, а) также отчётливо свидетельствует о том, что деформация металла происходит не только в области упора и входа в матрицу, но также и на входе в пресс-камеру. Данная

область очага деформации, определяемая авторами монографии [21] как «зона полного контакта металла по сечению контейнера в результате распрессовки заготовки осаживанием», характеризуется замедлением течения металла, вызванным его контактным трением с поверхностью неподвижного пресс-контейнера и башмачной клети, что и приводит к развитию деформации сдвига в указанной области.

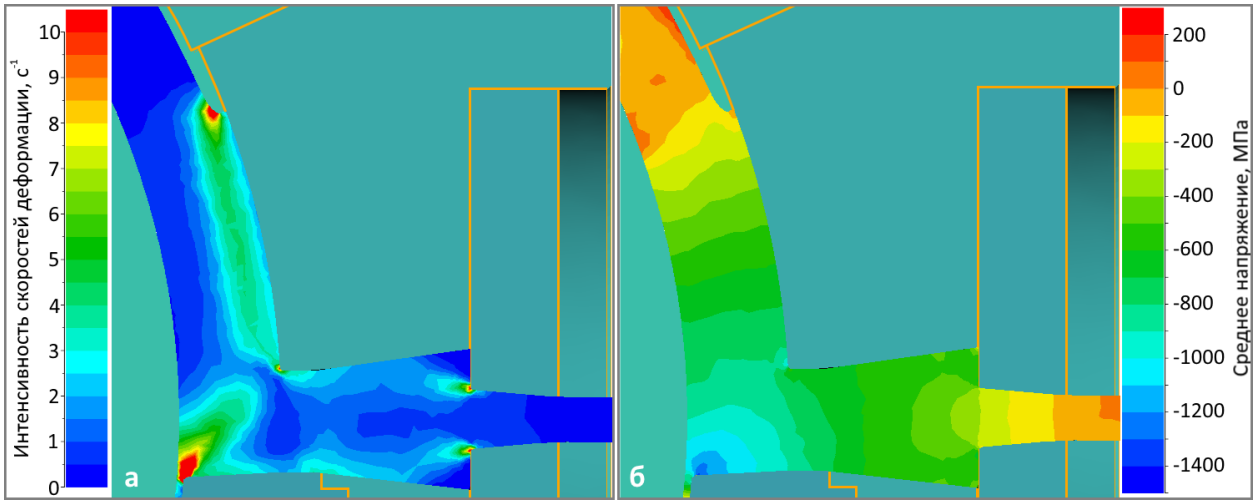


Рисунок 49 – Распределение интенсивности скоростей деформации (а) и среднего напряжения (б) в вертикальном центральном сечении очага деформации процесса непрерывного прессования

На рисунке 49, б приведено поле распределения по очагу деформации средних напряжений σ_m, определяемых как треть суммы напряжений, расположенных на главной диагонали тензора напряжений:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \text{ [МПа]}. \quad (8)$$

Исходя из полученных результатов моделирования можно сказать, что интенсивный рост средних напряжений сжатия (характеризуемых знаком «–») происходит при заполнении металлом зоны входа в пресс-камеру, и продолжает стремительно расти вплоть до изменения направления течения отслеживаемой области в сторону матрицы. В точке, расположенной на контакте с упором, рядом с местом отвода облоя, наблюдается максимум напряжений сжатия, достигающий 1419 МПа, что является причиной возникновения очага температурного роста, отмечаемого на рисунке 47 (кривые Р2 и Р3) [90].

Результаты экспериментального исследования

Структура литого прутка меди М1 диаметром 20 мм, использованного в качестве заготовки для эксперимента по непрерывному прессованию, характеризуется достаточно

крупными зёрнами, которые отчётливо видны даже при рассмотрении без использования средств микроскопии (рисунок 32).

На рисунке 42 приведены макроснимок образца, отобранного из центрального сечения пресс-остатка и снимки его микроструктуры в разных зонах очага деформации. В зоне А (рисунок 50) отмечается наличие уже измельчённой структуры с размером зёрен 10 – 15 мкм, что несколько меньше, чем в остальных рассматриваемых участках образца (рисунок 42, зоны Б и В). Это объясняется тем, что в указанной части очага деформации действует наибольший уровень напряжений сжатия, а также гораздо интенсивнее развивается процесс деформации (рисунок 49). Для зоны Б характерно наличие более крупных зёрен (40 – 50 мкм), что скорее всего вызвано снижением уровня действующих в металле напряжений, а также развитием рекристаллизационных процессов, обусловленных повышением температуры материала при его прохождении через область в близи упора. После прохождения металлом матрицы его структура приобретает заметную ориентировку (рисунок 42, зона В), характерную для процессов прокатки или прессования. Размеры кристаллической структуры также претерпевают изменения – зерно в среднем измельчается до 25 – 30 мкм за счёт деформации материала на входе в матрицу (рисунок 41, а), отмеченной ранее.

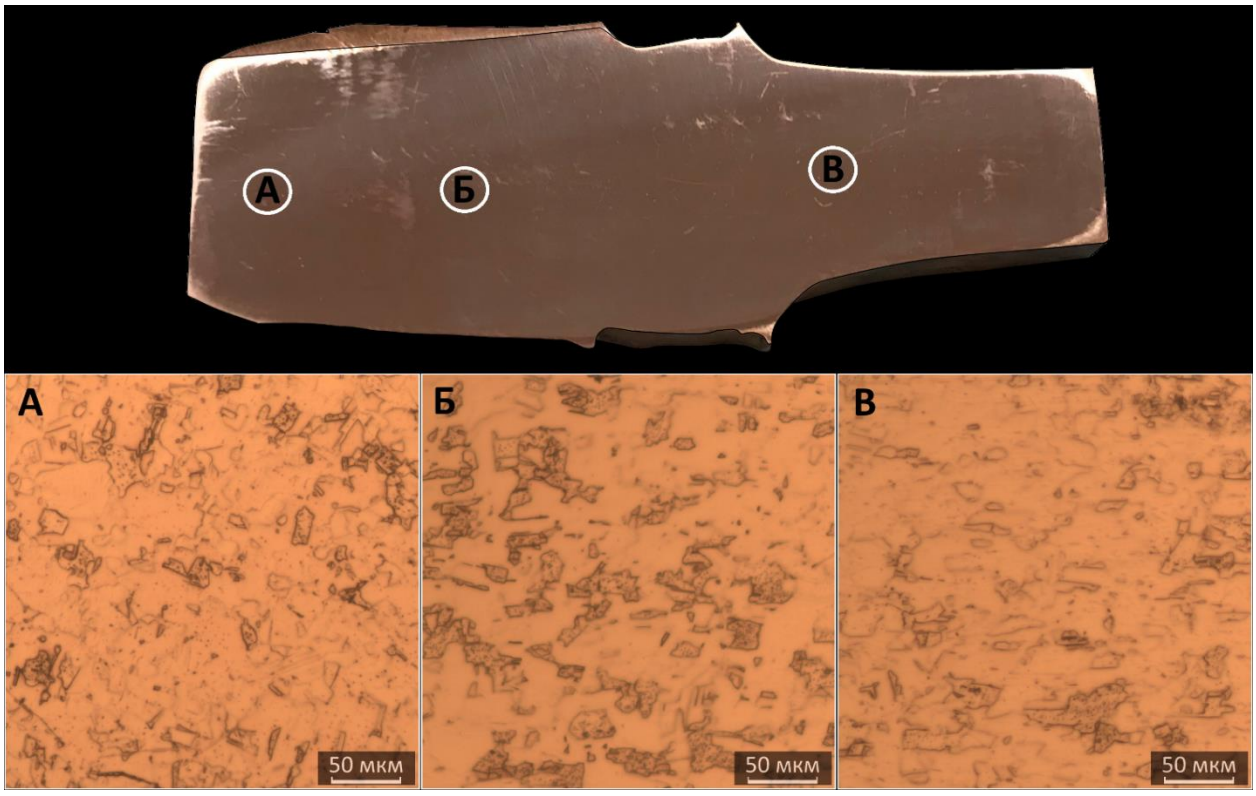


Рисунок 50 – Снимок образца центрального сечения пресс-остатка и его микроструктура в зонах поступления в пресс-камеру (А), форкамеры (Б) и матрицы (В)

Для более подробного изучения процессов эволюции микроструктуры в очаге деформации непрерывного прессования CONFORM выполняли EBSD-анализ структуры образца, отобранного из центрального сечения пресс-остатка и разбитого на участки упора, начала пресс-камеры, расширяющейся форкамеры и матрицы, согласно рисунку 45.

На рисунке 51 приведены снимки микроструктуры в упомянутых зонах очага деформации и обратные полюсные фигуры, которые позволяют количественно определить доли разных компонент текстуры и оценить их рассеяние. В процессе прохождения прессуемым материалом области упора происходит наиболее интенсивное дробление его литой структуры (рисунок 51, а-I), средний размер зерна здесь в основном не превышает 10 мкм. На последующих участках, вследствие действия высокой температуры, отмечается общее увеличение среднего размера зёренной структуры. Так, в области пресс-камеры (рисунок 51, а-II) происходит наиболее ярко выраженное её укрупнение и средний размер зерна здесь уже составляет 38 мкм. В ходе продвижения металла вдоль очага деформации его микроструктура вновь частично измельчается и средний размер кристаллов составляет 18 и 23 мкм на участках III и IV соответственно (рисунок 51, а). Важно отметить, что диапазон размеров зёрен при прохождении медью М1 форкамеры и матрицы монотонно увеличивается, что является следствием неравномерности распределения деформации по очагу, что может быть отмечено по результатам моделирования (рисунки 48 и 49), а также фактом продолжения развития динамической рекристаллизации в локальных точках очага деформации.

Анализ текстур демонстрирует, в целом, формирование неоднородной разнонаправленной текстуры на протяжении всего очага деформации. На участках I – III (рисунок 51, б) сложно выявить преобладание какой-либо из ориентировок кристаллов, поскольку характер течения металла в указанных зонах носит крайне неупорядоченный характер. Только лишь в зоне IV (рисунок 51, б) возможно выделить возникновение неярко выраженного превалирования текстуры <211>, именуемой текстурой прокатки и сформированной в ходе прохождения прессуемого металла через матрицу.

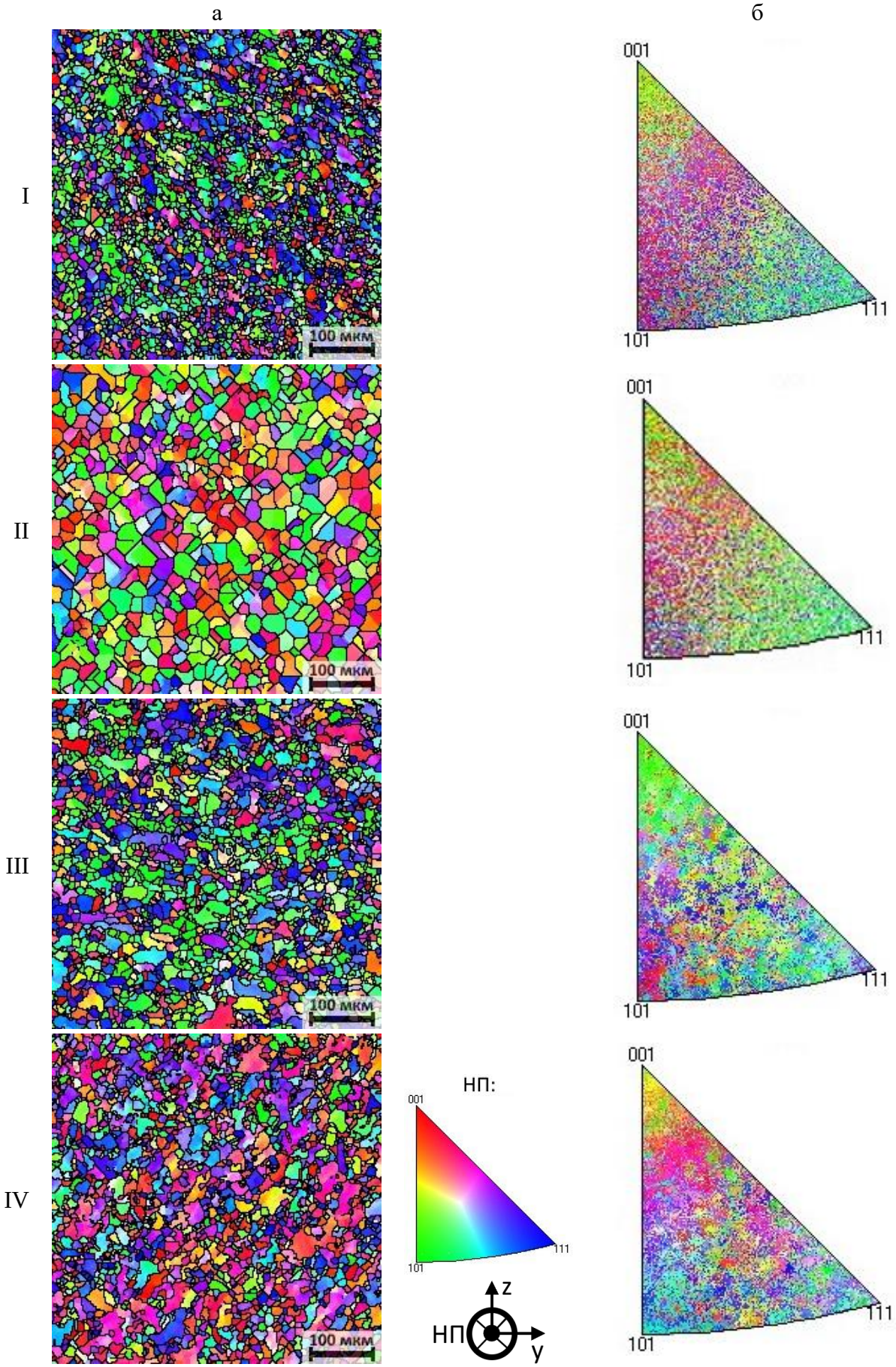


Рисунок 51 – EBSD-снимки микроструктуры (а) и обратные полюсные фигуры (б) в зонах очага деформации, обозначенных согласно рисунку 37

Рисунок 52 отображает результаты анализа деформированного и рекристаллизованного состояния материала, выполненного также посредством ДОЭ-микроскопии. В зоне I (рисунок 52, а, б) структура материала в большей мере (на 77,7 %) состоит из деформированного зерна. По доле рекристаллизованной структуры можно сказать, что процессы рекристаллизации здесь только начинают своё развитие. Далее, в ходе продвижения металла в пресс-камеру (рисунок 52, а, б – II), роста его температуры (рисунок 47) и снижения действующих на него сжимающих напряжений (рисунок 49, б) происходит обширная рекристаллизация, сопровождаемая ростом зёрен, отмеченным ранее. На участке III (рисунок 52, а, б) наблюдается сохранение количества деформированной фракции и увеличение фракции субструктуры, характеризуемой как структура перехода от рекристаллизованного состояния в деформированное. Данный тип структуры может быть назван как частично рекристаллизованная структура, когда отдельные рекристаллизованные кристаллиты развиваются внутри исходных зёрен. При прохождении прессуемого материала матрицы и формировании у него определённой, характерной процессам ОМД, текстуры, происходит вполне закономерный рост числа зёрен, находящихся в деформированном состоянии (до 65,7 %) и соответствующее снижение доли рекристаллизованной и частично рекристаллизованной структуры.

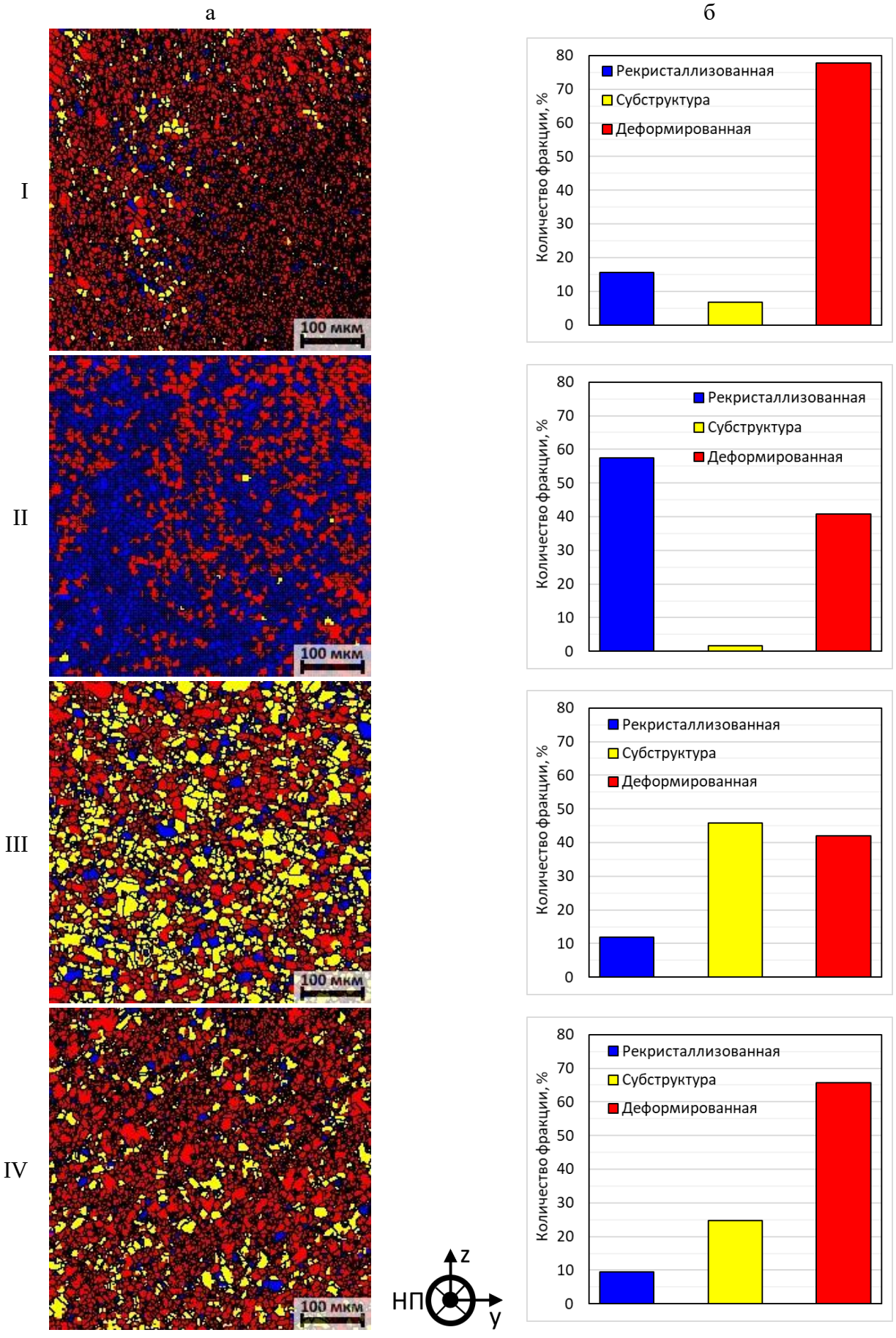


Рисунок 52 – Карты рекристаллизации (а) и диаграммы рекристаллизованой фракции (б) в зонах очага деформации, обозначенных согласно рисунку 37

Рассмотрим изменение твердости меди М1 вдоль центрального сечения очага деформации (рисунок 53, кривая С0). При поступлении материала заготовки в пресс-камеру, происходит выделение значительного количества тепла (450 °С), что сопровождается падением твердости с 93 до 67 HV. По мере накопления материала в форкамере и его продвижения к матрице твердость повышается до 79 HV за счёт деформации, и как следствие измельчения рекристаллизованной структуры (рисунок 53, II и III). При прохождении через матрицу, в материале продолжают развиваться запущенные на входе в очаг деформации процессы рекристаллизации и твёрдость вновь снижается до 74 HV. На выходе из калибровочного пояска матрицы шина контактирует с охлаждающим раствором, что приводит к повторному росту твердости металла практически до исходных значений.

Сложное изменение твердости материала на пути его прохождения через очаг деформации процесса CONFORM коррелирует с изменением величины зерна на соответствующих стадиях (рисунки 50 и 51). На равноудаленных от центрального сечения линиях измерения твердости (рисунок 53, С1 – С2) закономерности её формирования сохраняются с небольшой разницей максимальных и минимальных значений, связанной с высокой теплопроводностью меди и контактными условиями, практически не поддающимся контролю.

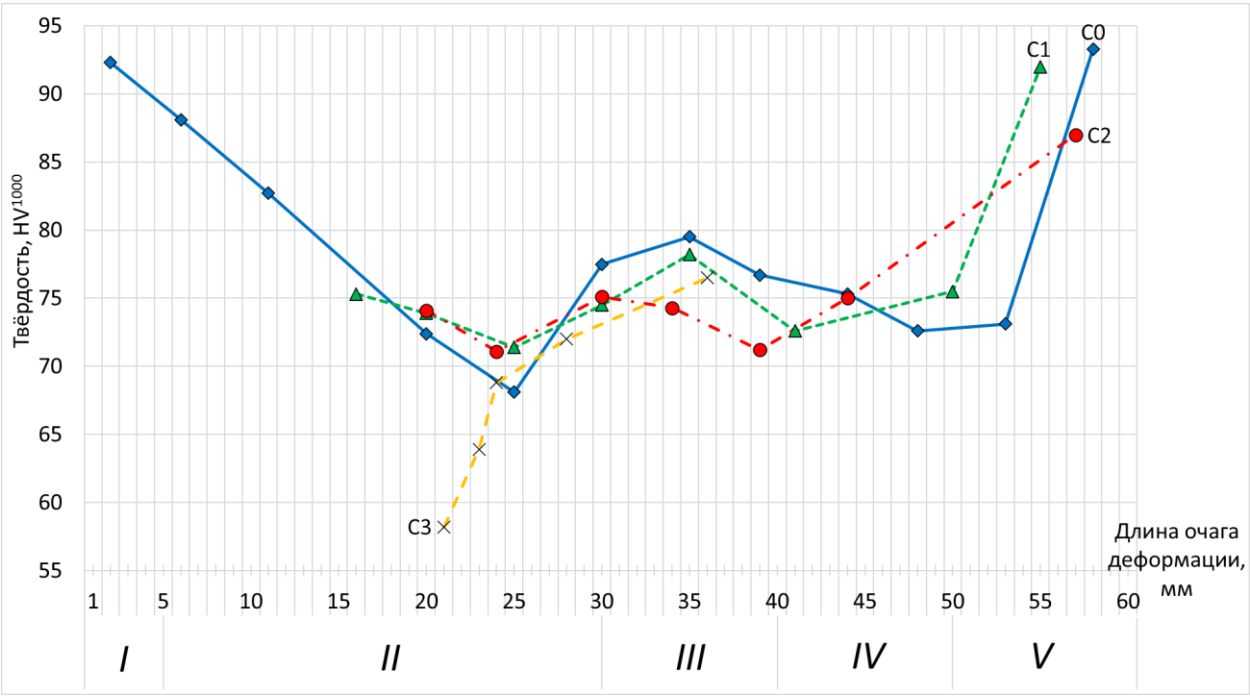


Рисунок 53 – Распределение твёрдости вдоль сечений очага деформации в процессе непрерывного прессования: I – область упора; II – пресс-камера; III – форкамера; IV – область матрицы; V – истечение из матрицы

Кривая С3, описывающая изменение микротвёрдости вдоль образца, отобранного на расстоянии 30 мм по ширине пресс-остатка от его центрального сечения, показывает отличающийся характер изменения параметра твёрдости. На длине очага деформации 20 – 24 мм прослеживается нехарактерный для других сечений (рисунок 53, С0 – С2) рост твёрдости с 57 до 68 HV, что объясняется крупной структурой зерна в этой области (рисунок 54, зона А). На снимке макроструктуры отчётливо видна граница между объемом металла подверженного течению в процессе прессования, характеризуемым мелкими зёрнами размером 30 – 40 мкм (рисунок 54, зона Б) и объемом, располагающегося вдоль стенок форкамеры (мёртвых зон), который не подвержен деформации, что подтверждает результаты моделирования (рисунок 48, б). Здесь размер кристаллов возрастает вследствие действия высокой температуры до 300 – 400 мкм.

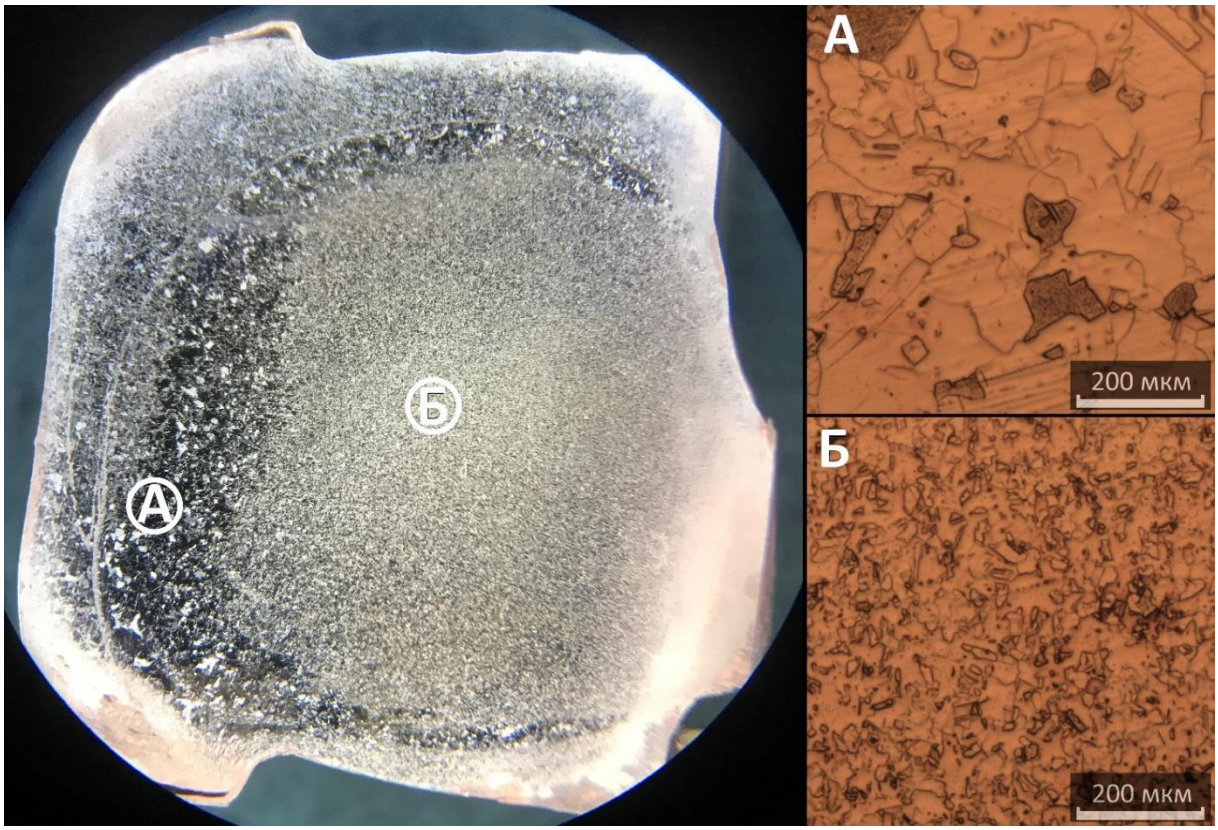


Рисунок 54 – Макро- и микроструктура образца в сечении С3 в мёртвой зоне очага деформации (А) и зоне течения металла (Б)

Таким образом, в результате проведённого исследования получены подробные данные о физико-механических процессах и структурных превращениях, происходящих в очаге деформации процесса непрерывного прессования медных электротехнических шин.

4.3 Влияние технологических параметров непрерывного прессования на формирование свойств медных шин

На основании проведённых исследований эволюции свойств и структуры в очаге деформации прессования CONFORM было решено провести опытную работу по изучению возможности управления физико-механическими процессами, возникающими при прессовании технически чистой меди. Решение поставленной задачи носит комплексный характер и включает экспериментальное исследование и компьютерное моделирование, направленные на изучение влияния варьирования температурно-скоростных параметров прессования на формирование микроструктуры и свойств медных прямоугольных шин.

Результаты компьютерного моделирования

В процессе моделирования реализовано заполнение материалом пресс-камеры и его истекание через матрицу с получением прямоугольной шины заданных размеров и длиной 100 мм. Время моделирования процесса CONFORM составило 13,5 и 8,4 с для скоростей прессования 4,5 и 6 м/мин соответственно.

В результате моделирования получены картины распределения температуры металла вдоль очага деформации. На рисунке 55 приведены поля температурного градиента вдоль вертикального центрального сечения. Из обоих картин видно, что очагом роста температуры является участок контакта металла заготовки с упором. При экструдировании со скоростью 4 м/мин температурный максимум располагается в пределах 430 – 450 °С, что соответствует среднему диапазону температур реализации процесса CONFORM для меди М1. С повышением скорости прессования температурный максимум возрастает до 470 – 490 °С, что не превышает верхнего предела диапазона рабочей температуры прессования. В обоих случаях при продвижении металла к матрице происходит постепенное снижение его температуры на 20 – 40 °С.

Дополнительно, на полученных моделях, было изучено и сопоставлено изменение температуры вдоль центрального горизонтального сечения осесимметричных частей очага деформации (рисунок 56). Из рисунков отчетливо видна идентичность характера формирования и распространения температурного градиента от точки взаимодействия металла с упором в направлении матрицы, с небольшой разницей температур (20 – 30 °С) при изменении скорости. Примечательно, что температура в мёртвых зонах пресс-камеры и в месте отвода облоя, в области контакта заготовки и поверхности канавки рабочего колеса, одинаковы для двух полученных моделей.

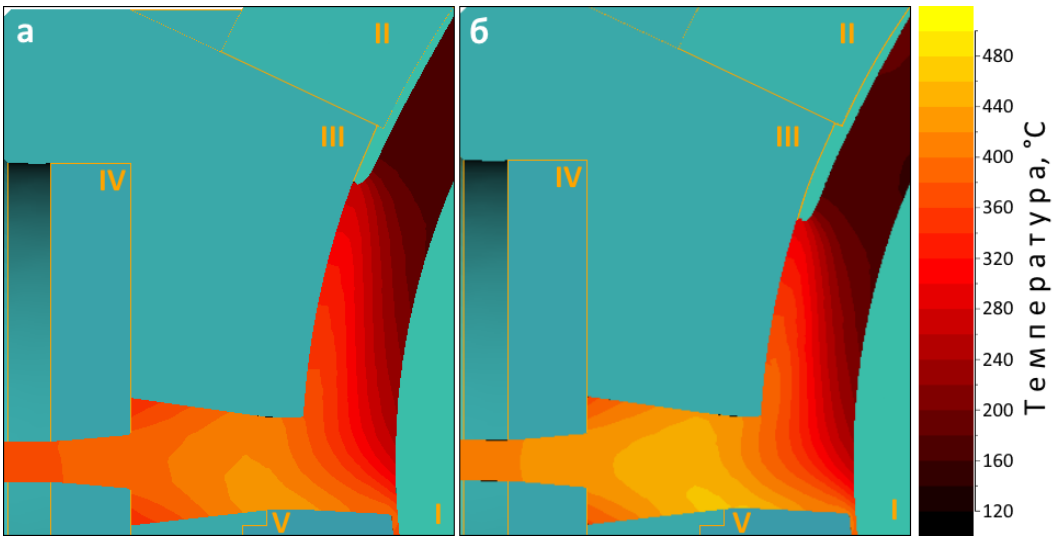


Рисунок 55 – Температурное поле заготовки в центральном вертикальном сечении очага деформации для скоростей прессования ($v_п$): а) 4 м/мин; б) 6 м/мин.
I – рабочее колесо; II – башмак; III – пресс-контейнер; IV – матрица; V – упор

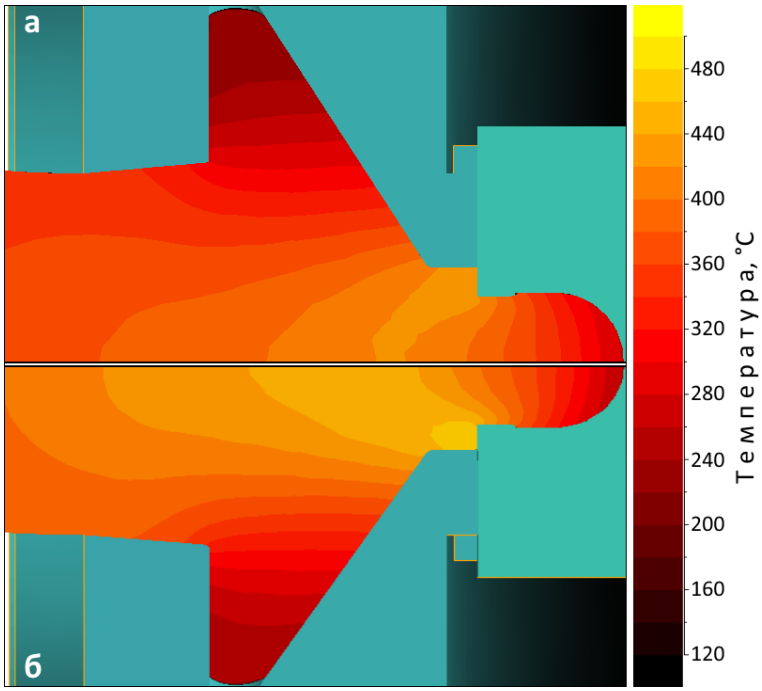


Рисунок 56 – Сопоставление температурных полей заготовки в центральном горизонтальном сечении очага деформации для скоростей прессования ($v_п$):
а) 4 м/мин; б) 6 м/мин

На рисунках 57 и 58 приведены графики изменения уровня сжимающих напряжений в последовательно расположенных точках заготовки во время процесса прессования. Как известно сжимающие напряжения (нормализованное среднее нормальное напряжение), считаемые инвариантом гидростатического давления (напряжения), часто используются

для оценки пластических свойств материалов и прогнозирования возможности их разрушения, и рассчитываются как отношение среднего нормального напряжения к интенсивности напряжений (эффективных напряжений):

$$\eta = \sigma_m/\bar{\sigma}, \tag{9}$$

где σ_m – среднее напряжение, формула (6), МПа:

$\bar{\sigma}$ – эффективные напряжения, МПа:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}. \tag{10}$$

Из графиков (рисунки 57 и 58) видно, что уровень напряжений на начальных этапах прессования относительно невысок и его пики, отчетливо заметные на каждой из кривых, отражают соприкосновение металла с упором и изменение направления движения металла к области истечения. Показательными здесь являются кривые, описывающие уровень напряжений в области отдалённой от начала заготовки на 400 мм (Р5), которые демонстрируют интенсивный рост напряжений сжатия при достижении металла зоны входа в пресс-камеру. При этом уровень сжимающих напряжений при скорости подачи заготовки 4 м/мин на порядок выше, чем у той же области, но при скорости 6 м/мин. Для более понятного представления можно привести разность величин среднего напряжения в рассматриваемых точках (пиках), которая составляет ~ 200 МПа. Данный факт объясняется достижением температурного максимума на этих временных участках процесса прессования для рассматриваемых точек. Соответственно, при скорости подачи заготовки 6 м/мин величина возникающих сжимающих напряжений ниже, чем при 4 м/мин, что вызвано более интенсивным разогревом металла в очаге деформации.

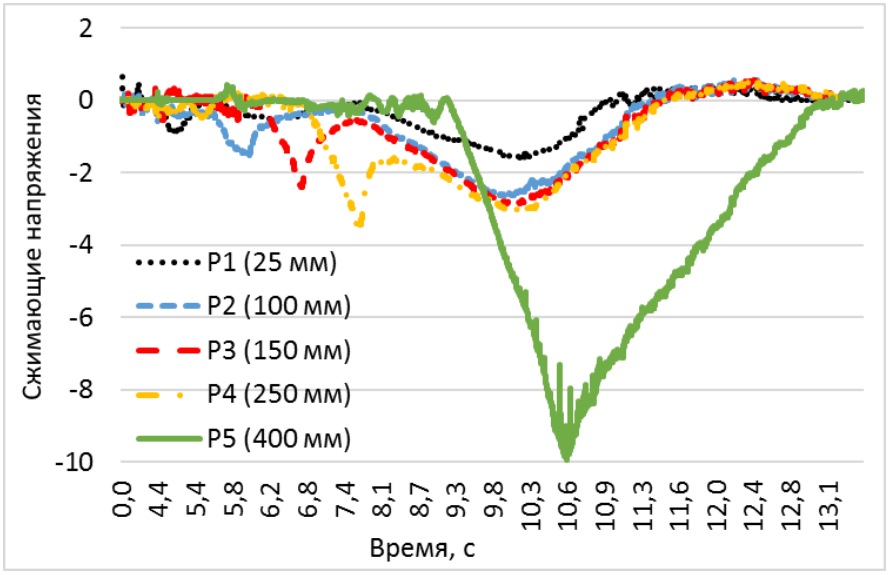


Рисунок 57 – Сжимающие напряжения в трассируемых точках при $\nu_п$ = 4 м/мин

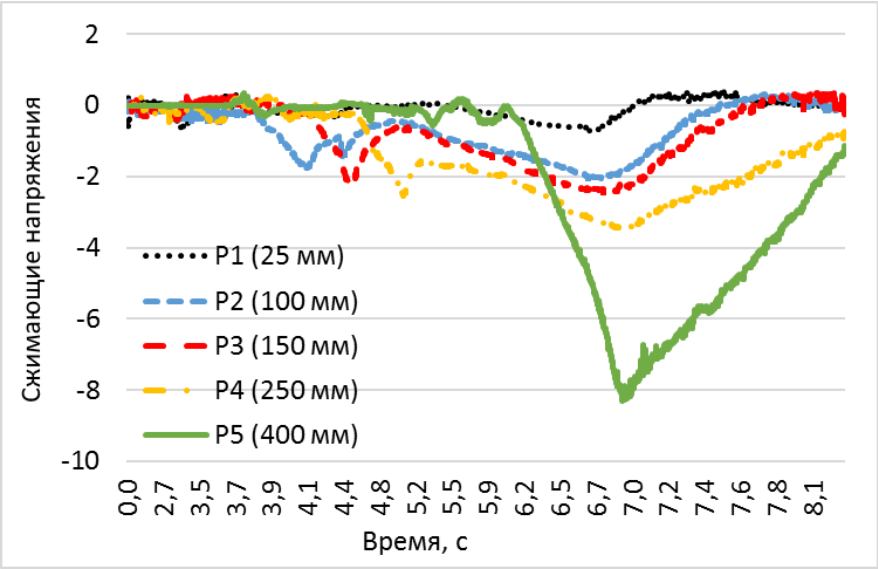


Рисунок 58 – Сжимающие напряжения в трассируемых точках при $\nu_п$ = 6 м/мин

Результаты экспериментального исследования

Литые прутки, полученные при скоростях вытягивания ($\nu_в$) 300 и 500 мм/мин, получение которых описано в пункте 2.5, прессовали при скоростях подачи заготовки в очаг деформации ($\nu_п$) 4 и 6 м/мин на установке CONFORM MFCCE 350 в прямоугольные шины размерами 10×60 мм, от которых отбирали образцы для изучения микроструктуры и твёрдости. На рисунке 59 приведены снимки микроструктуры прессованных шин, сделанные в их центральной части.

Существенного влияния как скорости литья, так и скорости прессования на формирование микроструктуры не наблюдается. Размер зерна в образцах колеблется в пределах 15 – 30 мкм. Отсутствие явного влияния скоростных параметров литья и прессования на структуру можно объяснить обширным разрушением литой структуры и динамической рекристаллизацией, развивающейся в очаге деформации под действием высокой температуры. Таким образом, рассматриваемые скоростные режимы работы оборудования, находящиеся в пределах технологических возможностей, следует считать сопоставимыми в части оказываемого влияния на формирование структуры материала [91].

Измерение твёрдости образцов шин проводили с шагом 7,5 мм вдоль их поперечного сечения (рисунок 24, плоскость YZ). Результаты измерений (рисунок 60) демонстрируют незначительные тенденции к росту твёрдости на краях шины для всех рассмотренных вариантов скоростных режимов, что можно объяснить деформацией и более интенсивным охлаждением металла, происходящими при контакте с матрицей, поскольку у края шины площадь контакта с инструментом больше, чем в ее центре.

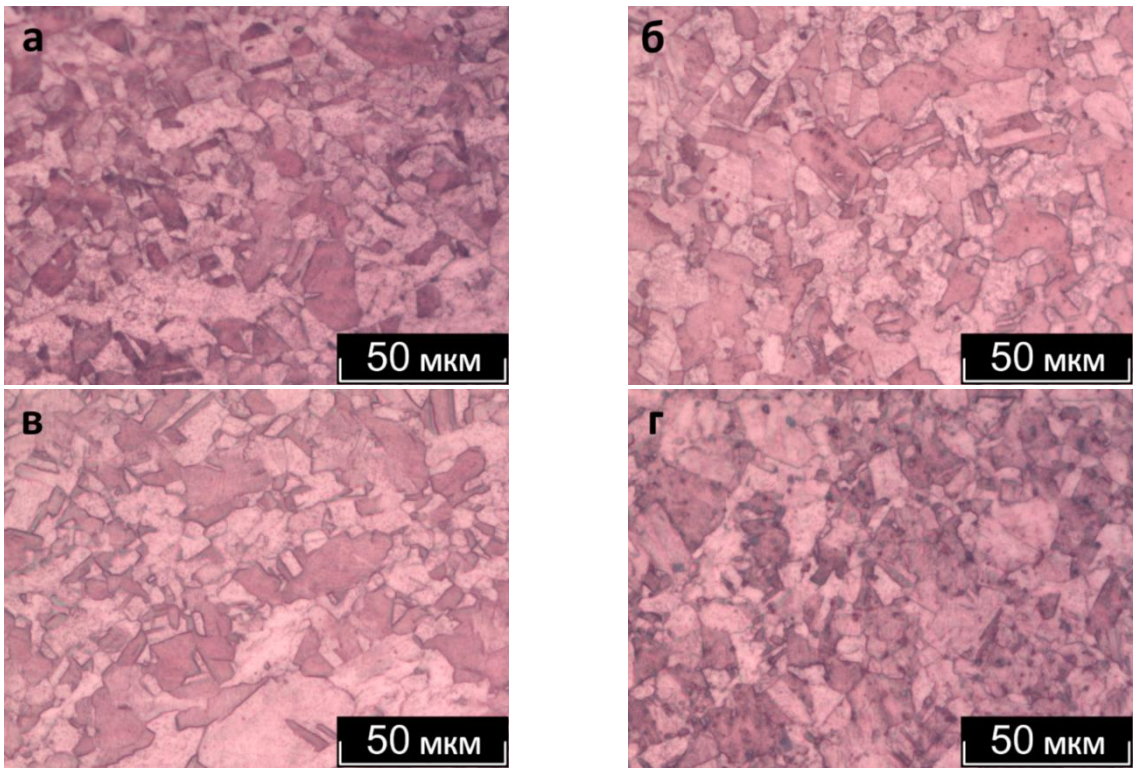


Рисунок 59– Микроструктура шин в центральном продольном сечении при следующих скоростях литья ($v_в$) – прессования ($v_п$): а) 300 мм/мин – 4,5 м/мин; б) 300 мм/мин – 6 м/мин; в) 500 мм/мин – 4,5 м/мин; г) 500 мм/мин – 6 м/мин

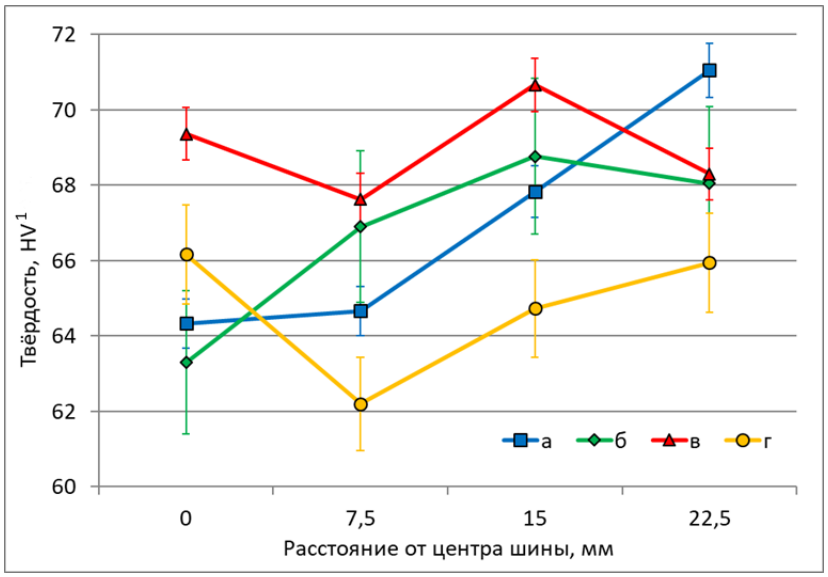


Рисунок 60 – Распределение твёрдости по ширине медных шин, произведённых со следующими скоростями литья ($v_в$) – прессования ($v_п$): а) 300 мм/мин – 4,5 м/мин; б) 300 мм/мин – 6 м/мин; в) 500 мм/мин – 4,5 м/мин; г) 500 мм/мин – 6 м/мин

Данные эксперимента согласуются с результатами моделирования. Средняя твёрдость шин составила 66 – 68 HV, при увеличении скорости прессования можно отметить её незначительное снижение, в среднем на 1 – 2 единицы.

Измерение электропроводности образцов также показало схожие результаты (таблица 8). Так, вне зависимости от скорости литья и прессования электропроводность литых образцов составила 93 % IACS (International Annealed Copper Standard), а образцов, прессованных на установке CONFORM 96 % IACS. Максимальный разброс полученных значений не превышает 1 % IACS, что вероятно является погрешностью прибора и не может быть рассмотрено как влияние технологических режимов.

Таблица 8 – Электропроводность образцов литых прутков и прессованных шин из меди марки М1, произведенных по разным скоростным режимам

Изделие	Электропроводность, МСм/м	% IACS
Литой пруток, $\nu_в$ 300 мм/мин	53,92	93
Литой пруток, $\nu_в$ 500 мм/мин	54,44	94
Прессованная шина ($\nu_в$ 300 мм/мин и $\nu_п$ 4 м/мин)	55,68	96
Прессованная шина ($\nu_в$ 300 мм/мин и $\nu_п$ 6 м/мин)	55,36	95
Прессованная шина ($\nu_в$ 500 мм/мин и $\nu_п$ 4 м/мин)	55,60	96
Прессованная шина ($\nu_в$ 500 мм/мин и $\nu_п$ 6 м/мин)	55,76	96

4.4 Выводы по главе

1. Выполнено комплексное исследование и проанализированы особенности формирования структуры и механических свойств в очаге деформации процесса непрерывного прессования прямоугольных шин и прутков, а также напряженно-деформированного состояния и условий рекристаллизации меди М1.

2. Микроструктурный и текстурный анализ материала в очаге деформации процесса CONFORM свидетельствует о многократном дроблении зёренной структуры и невозможности получения полноценной рекристаллизованной структуры материала после прессования при рассмотренных температурно-скоростных параметрах процесса.

3. Изучение напряжённо-деформированного состояния, за счёт использования КЭ-моделирования, позволило объяснить природу возникновения рекристаллизации на входе в пресс-камеру и выделить три участка с наиболее интенсивной деформацией структуры, располагающихся в областях расспрессовки заготовки, упора и матрицы.

4. Выполнена оценка возможности управления механическими свойствами длинномерных проводников из меди М1 в процессе непрерывного прессования. Экспериментально и теоретически доказано, что влияние технологических параметров в рассмотренном температурно-скоростном диапазоне прессования на физико-механические свойства готовых изделий минимально.

Глава 5. Исследование особенностей формирования структуры и свойств контактного провода из магниевой бронзы

5.1 КЭ-моделирование процессов производства контактного провода из сплава CuMg 0,2

Традиционно фасонный контактный провод производят путём волочения заготовки – прессованного прутка. Прессование прутка выполняют на гидравлических прессах с прямым истечением, а в последние годы получило распространение использование для этих целей установок непрерывного прессования CONFORM. Волочение производят по многократной схеме и число необходимых этапов волочения определяется исходя из расчёта максимально допустимого коэффициента вытяжки за один проход. В случае использования в качестве заготовки прутка диаметром 20 мм применяют пятикратное волочение по маршруту представленного на рисунке 61 [92].

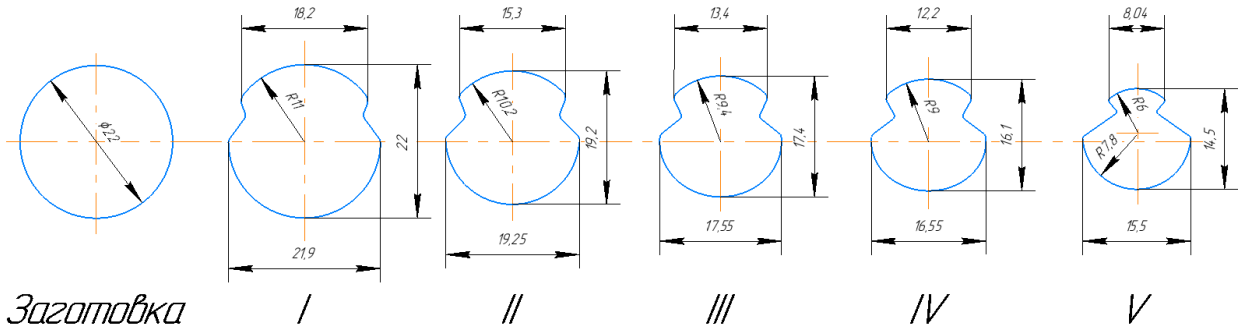


Рисунок 61 – Маршрут волочения контактного провода 150 мм^2 из круглой заготовки

Для получения возможности проведения качественной и количественной оценки различий традиционной технологии производства контактного провода и технологии, основанной на процессе непрерывного прессования, выполняли моделирование процессов горячего прессования и волочения контактного провода. В результате моделирования традиционной технологии изготовления контактного провода были получены картины распределения накопленной деформации на этапах прямого прессования заготовки диаметром 20 мм из литого круглого слитка диаметром 60 мм и пятикратного волочения. Полученные данные (рисунок 62, а и б) демонстрируют, что в результате комбинации указанных технологических операций в центральной части провода и волочения достигается низкий уровень накопленной пластической деформации, что в реальных условиях может стать причиной невысокой степени измельчения зёренной структуры.

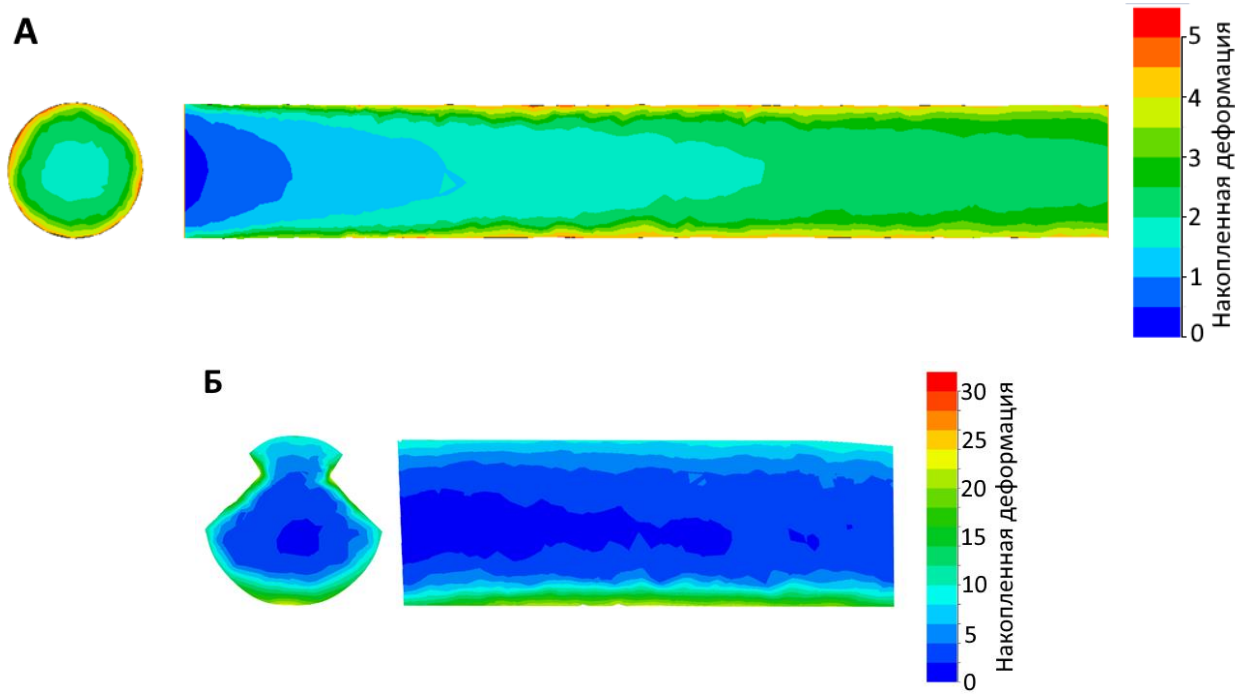


Рисунок 62 – Распределение накопленной деформации в поперечном и продольном сечениях при моделировании: а) горячего прессования; б) волочения

Значения накопленной деформации в центральной части сечения контактного провода в среднем составляют 2,1. Максимум обнаруживается в области основания ножки контактного провода и равняется 22. Такая разница значений, достигаемых в ходе холодной деформации, может стать причиной развития как внутренних, так и поверхностных дефектов продукции. Наиболее часто встречающийся вид дефектов, возникающих при волочении контактного провода, как раз вызван исчерпанием ресурса пластичности материала при холодной обработке и проявляется в образовании складок и растрескиваний на поверхности ножки провода (рисунок 63).

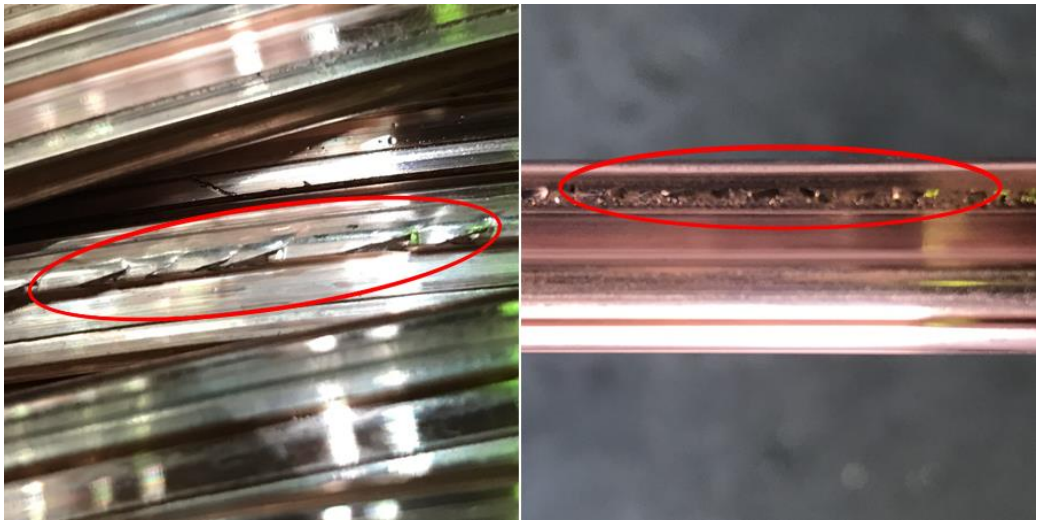


Рисунок 63 – Дефекты контактного провода после волочения

На следующем шаге расчётов было выполнено моделирование непрерывного прессования прутковой заготовки диаметром 20 мм в готовый фасонный провод сечением 150 мм^2 на длину 100 мм, при этом достигнуто состояние установившегося процесса прессования, характеризуемое заполнением материалом заготовки всего пространства пресс-камеры. По результатам моделирования изучали поля распределения температуры и напряжений в очаге деформации, а также анализировали степень деформации материала после прессования.

На рисунке 64, а приведены поля температурного градиента вдоль вертикального центрального сечения очага деформации. Из картины видно, что очагом роста температуры, как и в случае прессования медных шин и прутков, является участок контакта металла заготовки с упором. Температурный градиент распределён равномерно, а температура материала в очаге деформации находится в диапазоне 600 – 700 °С, что является допустимой температуры горячей обработки для сплава CuMg 0,2.

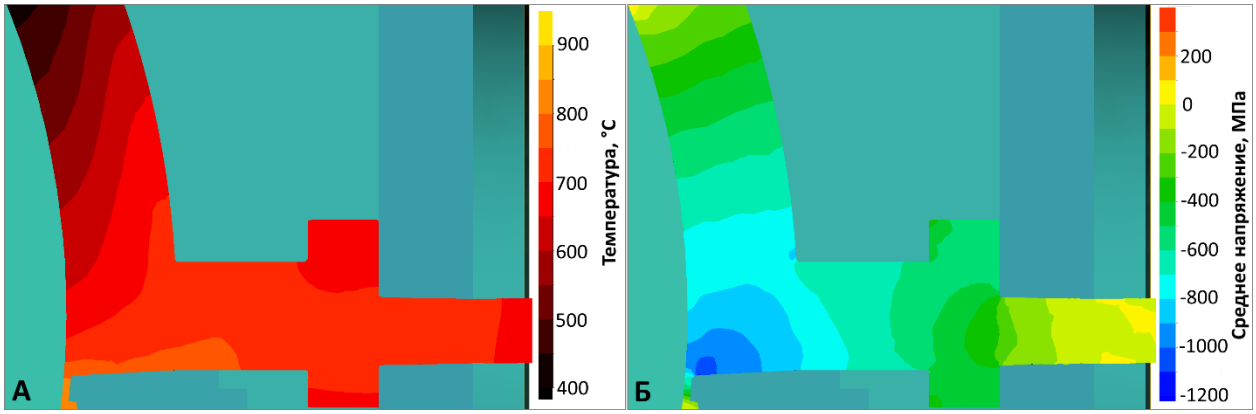


Рисунок 64 – Распределение (а) температуры и (б) средних напряжений в центральном вертикальном сечении очага деформации

Интенсивный рост средних напряжений (рисунок 64, б) происходит при заполнении металлом пресс-камеры, и продолжается вплоть до изменения направления течения материала к матрице. В точке, расположенной на контакте с упором, рядом с местом отвода облоя, наблюдается максимум напряжений сжатия, достигающий 1221 МПа.

Картина распределения накопленной деформации (рисунок 65) в контактном проводе, полученного в ходе моделирования процесса непрерывного прессования, свидетельствует о гораздо большей пластической деформации и наибольшей её однородности распределения по сечению провода, в сравнении с результатами полученными при моделирования традиционной технологии.

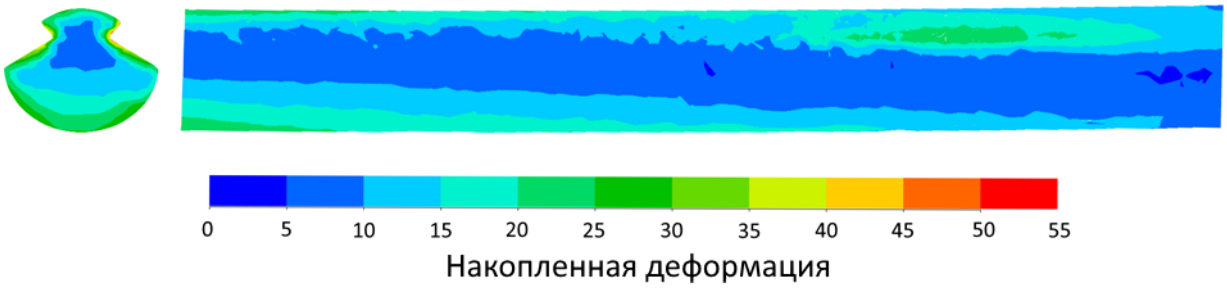


Рисунок 65 – Распределение накопленной деформации в поперечном и продольном сечениях контактного провода

Характер распределения накопленной деформации и её средние значения, полученные в результате моделирования процесса непрерывного прессования, положительно отличаются от результатов, полученных при моделировании традиционной схемы обработки контактного провода из сплава CuMg 0,2. Так, среднее медианное значение накопленной деформации в сечении контактного провода, полученного непрерывным прессованием, составляет 15,77, а стандартное отклонение – 5,79, в то время как эти же значения при моделировании процесса прямого прессования и волочения составляют 4,86 и 4,39 соответственно. Данный факт свидетельствует в пользу технологии CONFORM для получения изделий с более однородной структурой и, соответственно, однородным распределением их свойств.

5.2 Формирование функциональных свойств сплава CuMg 0,2 в процессе непрерывного прессования и волочения

После КЭ-моделирования, для определения особенностей формирования микроструктуры и функциональных свойств контактного провода из сплава CuMg 0,2 в процессе прессования CONFORM, был проведён ряд опытных работ для получения образцов указанного сплава.

В первую очередь из непрерывно литого прутка диаметром 20 мм, на установке непрерывного прессования был изготовлен пруток диаметром 20 мм. Микроструктура прутка в поперечном сечении представлена на рисунке 66. Структура характеризуется в основном равноосными зёрнами размером 20 – 25 мкм.

Затем выполняли пятикратное волочение прессованного прутка в контактный провод сечением 150 мм^2, по указанному ранее маршруту (рисунок 61). От полученного провода отбирали образцы для изучения микроструктуры и механических свойств. Изучение микроструктуры показало (рисунок 67), что в результате холодной деформации структура материала провода измельчается, с образованием зёрен размерами от 5 до 20 мкм.

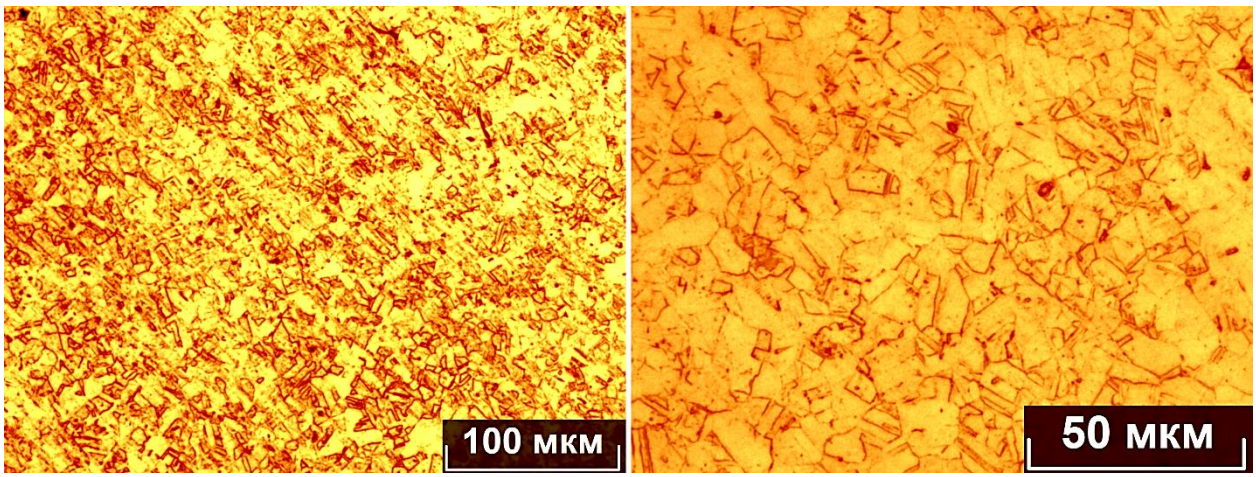


Рисунок 66 – Микроструктура прутка из сплава CuMg 0,2 диаметром 20 мм в поперечном сечении после непрерывного прессования

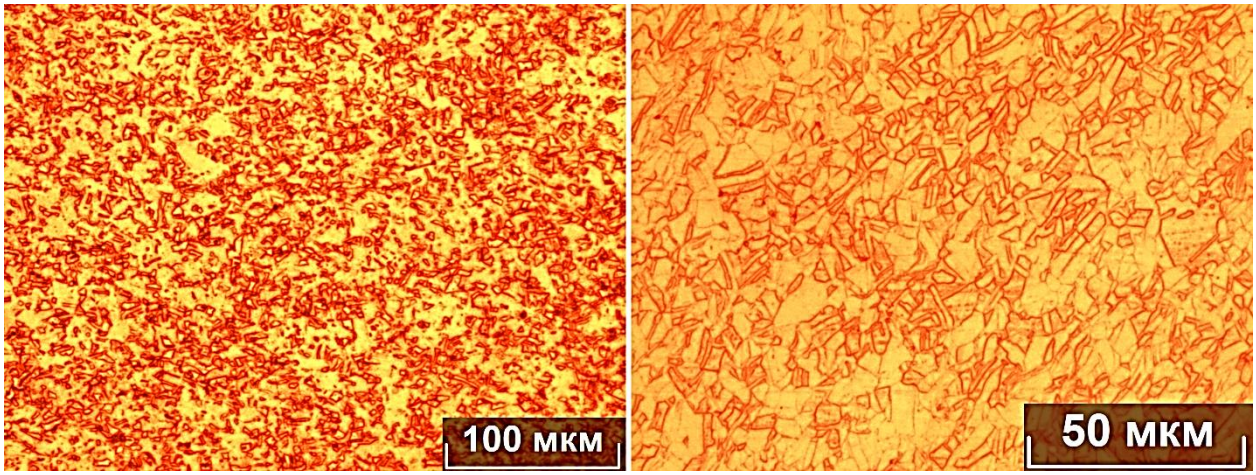


Рисунок 67 – Микроструктура контактного провода из сплава CuMg 0,2 в поперечном сечении после непрерывного прессования и волочения

Наиболее ярко влияние холодной деформации (волочения) на микроструктуру сплава CuMg 0,2 демонстрируют снимки, сделанные в продольном сечении образцов (рисунок 68). На них отчётливо видна разница в характере формирования структуры материала, которая проявляется в вытягивании и утончении зёрен.

Полученные образцы после непрерывного прессования и волочения подвергали испытаниям на твёрдость и временное сопротивление разрушению (рисунок 69), а также электропроводность (рисунок 70).

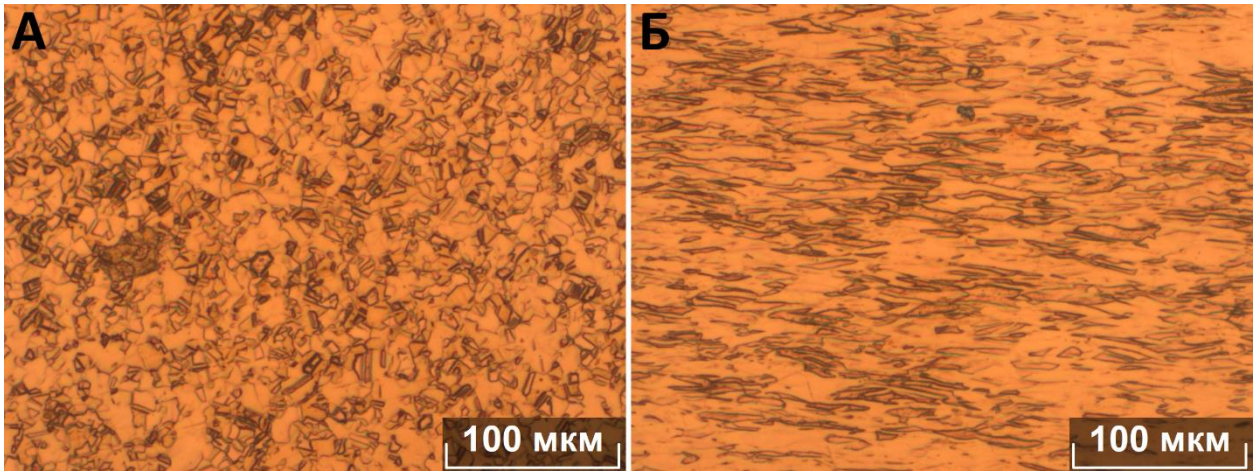


Рисунок 68 – Микроструктура сплава CuMg 0,2 в продольном сечении (а) прутка диаметром 20 мм после непрерывного прессования и (б) контактного провода после непрерывного прессования и волочения

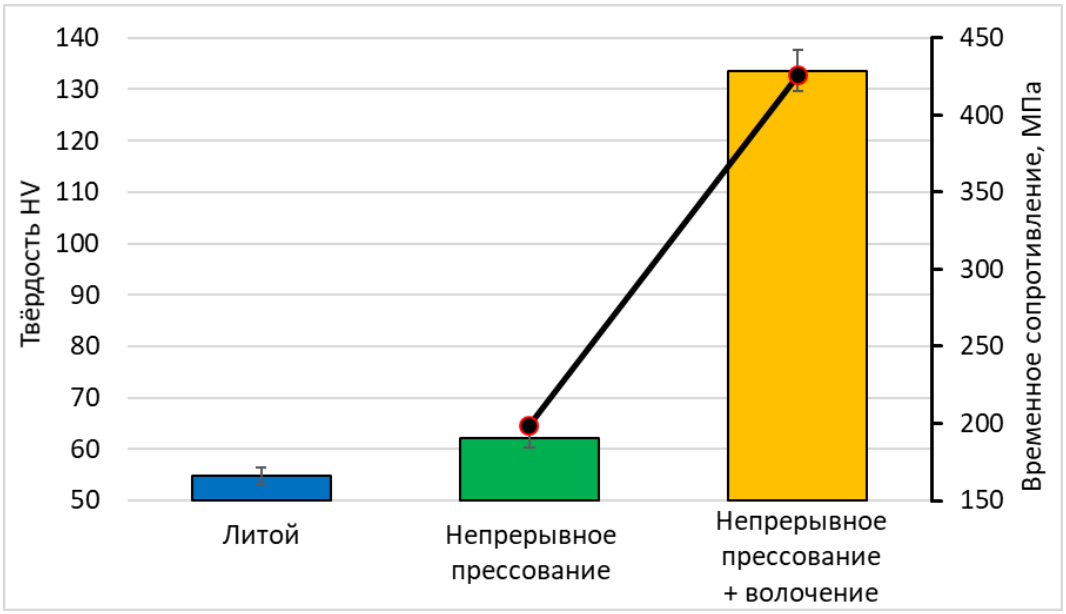


Рисунок 69 – Микротвёрдость (линия) и временное сопротивление (столбцы) образцов сплава CuMg 0,2 в литом и деформированном состоянии

Результаты измерений механических свойств показали, что после непрерывного прессования, несмотря на общее дробление литой структуры, упрочнение материала не происходит. Это легко объясняется заключениями, выведенными в п. 4.2 настоящей работы, и свидетельствующими о масштабной рекристаллизации сплава в очаге деформации. В то же время холодная деформация способствовала многократному росту прочностных характеристик материала, что позволило увеличить временное сопротивление материала с 198,5 МПа до 426 МПа.

Измерение электропроводности также дало ожидаемые результаты. Электропроводность непрерывно прессованного прутка мало отличается от электропроводности литого и составляет 86,9 % IACS. Холодная деформация прутка способствовала снижению электропроводности до 83,3 % IACS, что, однако, вполне удовлетворяет имеющимся требованиям стандарта для контактных проводов из низколегированных бронз [9].

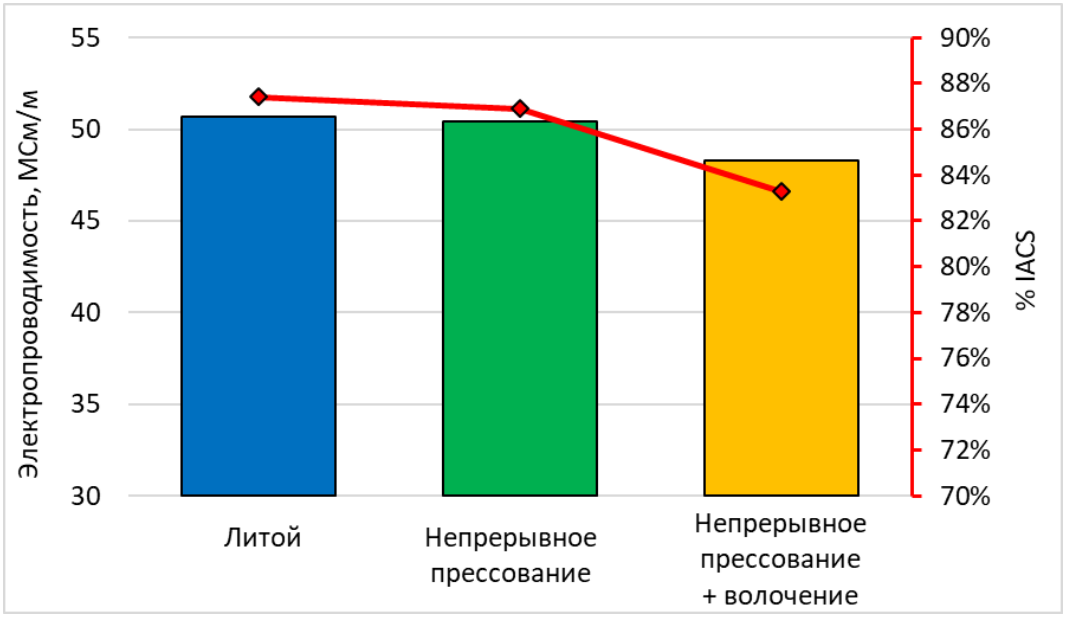


Рисунок 70 – Электропроводимость (столбцы – [МСм/м], линия – % IACS) образцов сплава CuMg 0,2 в литом и деформированном состоянии

5.3 Исследование влияния холодной деформации на формирование микроструктуры и свойств сплава CuMg 0,2

При всех описанных преимуществах технологии CONFORM, она не лишена недостатков, которые проявляются у изделий непосредственно после операции непрерывного прессования. Прессование готового профиля контактного провода, избегая процесса холодной деформации (например волочением), невозможно по следующим причинам. Во-первых, вследствие неравномерного течения металла по очагу деформации вероятно возникновение несплошностей в области основания ножки контактного провода, вызванное наличием в матрице узких мест, где течение металла затруднено. Во-вторых, процесс рекристаллизации металла, имеющий место в очаге деформации, приводит к значительному снижению твёрдости и прочности изделия, особенно в центральной части его сечения. Решение данных проблем возможно за счёт изучения и дальнейшей корректировки деформационного режима, а также доработки рабочих узлов инструмента линий CONFORM, что позволит получить возможность исключения низкоэффективной

операции пятикратного волочения из технологической схемы производства контактного провода ВСМ.

Для решения этой задачи проводили эксперимент по моделированию процесса волочения, заключающийся в продольной прокатке в закрытом калибре квадратных образцов, вырезанных из непрерывно прессованного прутка (рисунок 71, а). В качестве граничных условий эксперимента были заданы значения относительной деформации образцов на 10, 20, 30 и 40 % и, соответственно, вырезаны квадраты разных размеров для прокатки в квадрат со стороной 7 мм. Таким образом, размеры сторон квадратов поперечного сечения вырезанных образцов составили 7,4, 7,85, 8,4 и 9 мм, при длине образцов 60 мм. Снимки, прокатанных при комнатной температуре и с разной степенью деформации образцов, приведены на рисунке 71, б. У полученных таким образом образцов изучали микроструктуру в поперечном (рисунок 71) и продольном (рисунок 72) сечениях.

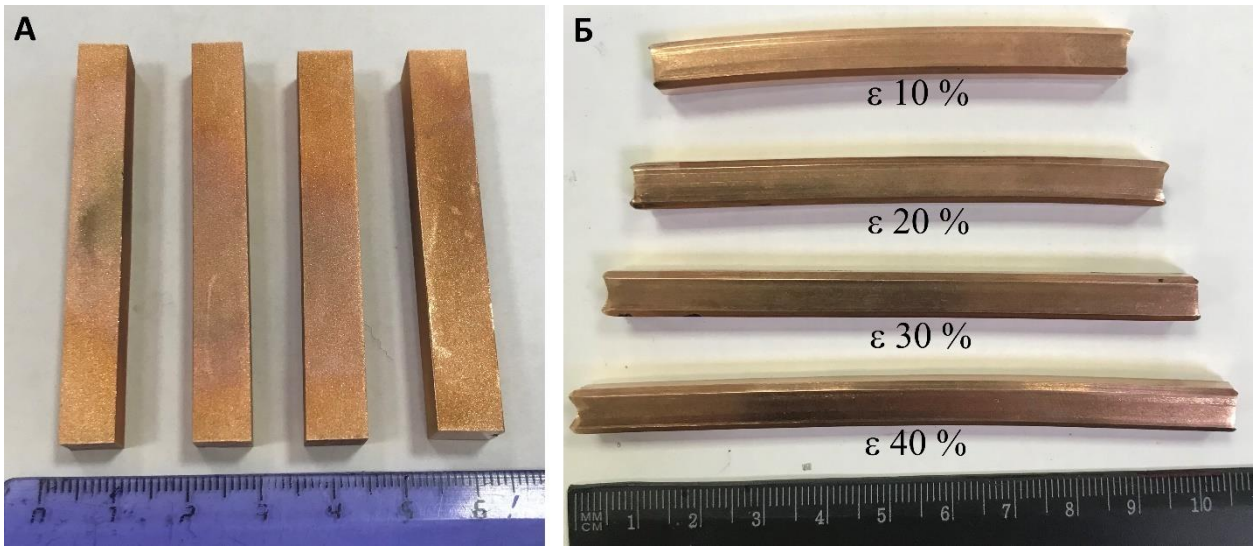


Рисунок 71 – Образцы для моделирования волочения до деформации (а) и после прокатки с разной степенью относительной деформации (б)

Снимки микроструктуры демонстрируют, что измельчение и вытягивание зёрен происходит постепенно, по мере накопления деформации. При относительной деформации 10 % структура образца сплава мало отличается от структуры прессованного прутка и представлена равновесными округлыми зёрнами. Уже при достижении относительной деформации 30 % происходит заметная ориентация структуры в направлении прокатки за счёт вытягивания зёрен (рисунок 73, в). Прокатка с обжатием 40 % немного видоизменяет структуру, однако не так явно, как при достижении $\varepsilon_{отн}$ = 30 %.

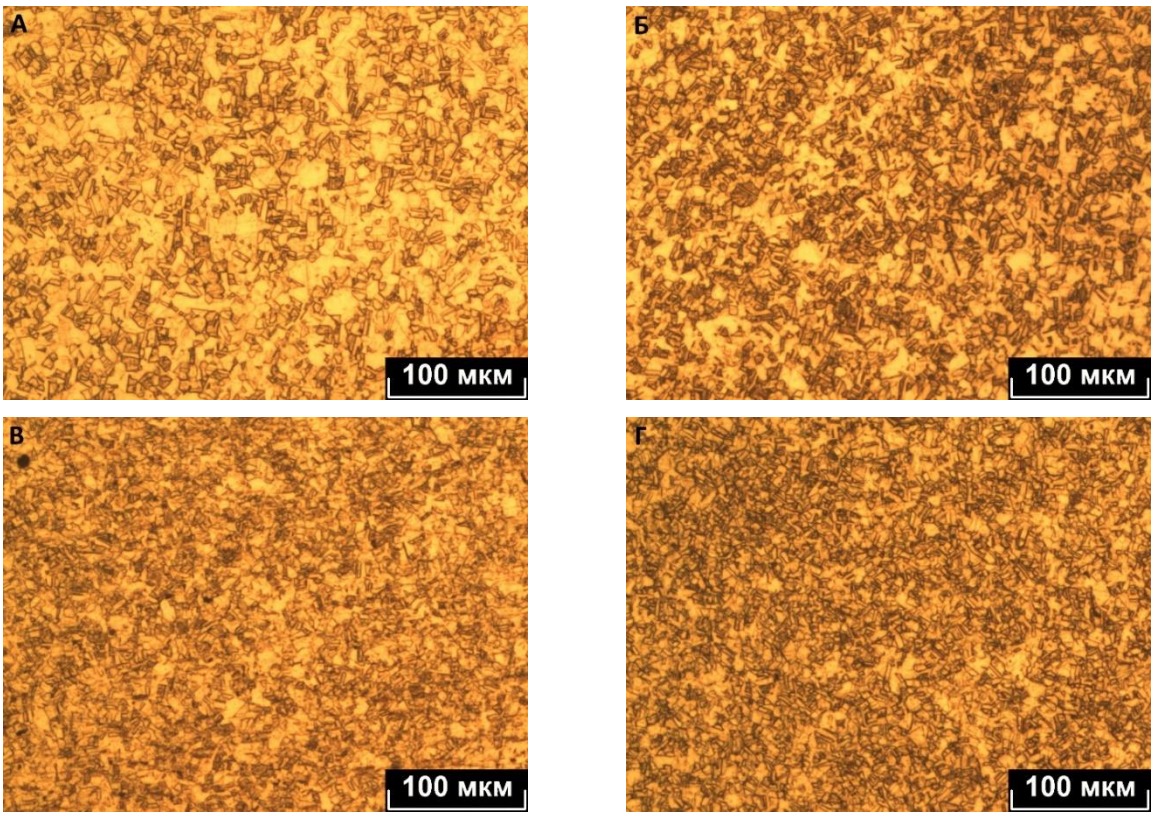


Рисунок 72 – Микроструктура в поперечном сечении образцов после относительной деформации на: а – 10 %; б – 20 %; в – 30 %; г – 40 %

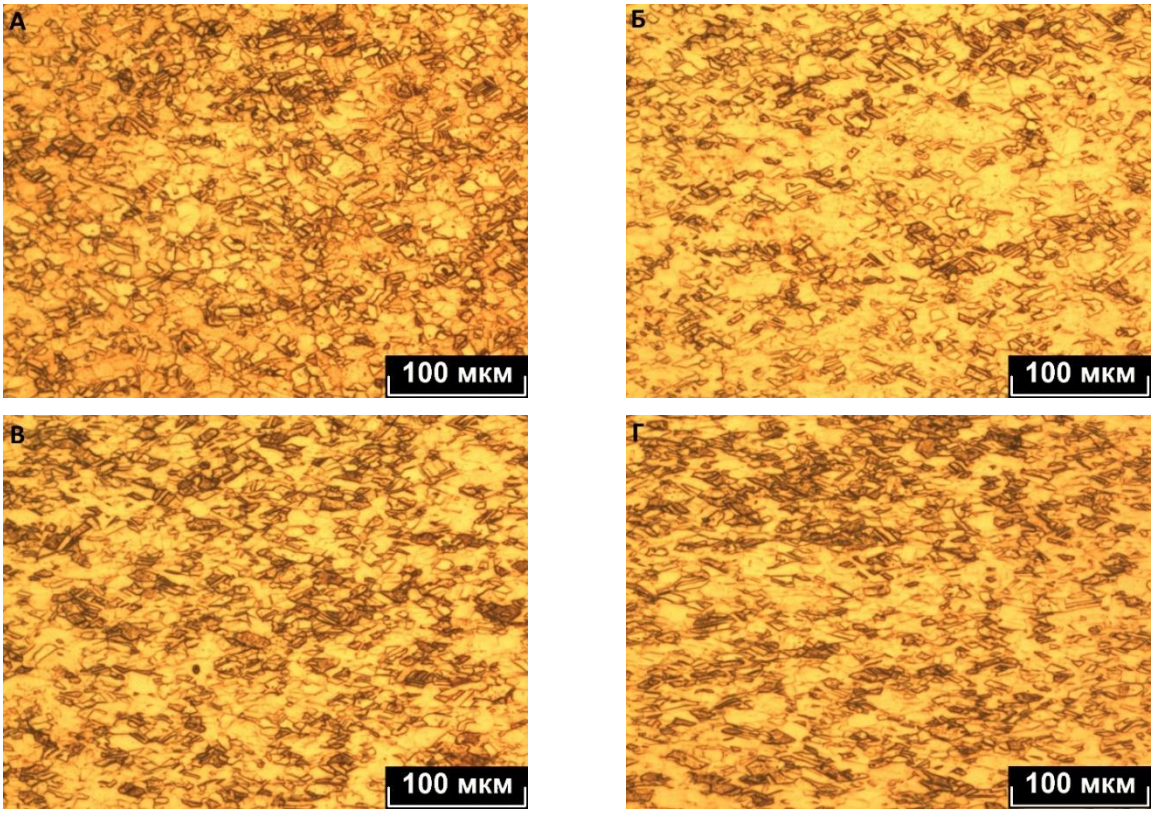


Рисунок 73 – Микроструктура в центральном продольном сечении образцов после относительной деформации на: а – 10 %; б – 20 %; в – 30 %; г – 40 %

Результаты измерения твёрдости и временного сопротивления полученных образцов (рисунок 74) свидетельствуют о значительном (почти в 2 раза) упрочнении сплава CuMg 0,2 уже при достижении относительной деформации 10 %, по сравнению с прессованным состоянием материала. Далее, с повышением величины деформации, рост прочности замедляется и временное сопротивление материала при относительной деформации 30 и 40 % составляет 421,5 и 425,5 МПа. Следует отметить, что достигнутый уровень прочностных характеристик удовлетворяет требования ГОСТа [9] для контактных проводов из исследуемого сплава.

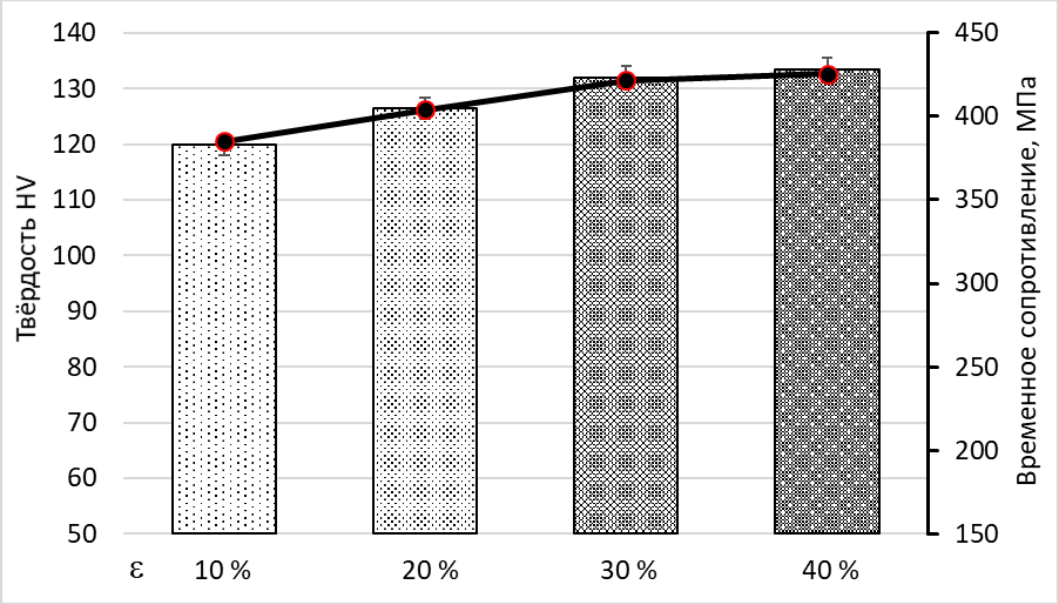


Рисунок 74 – Микротвёрдость (линия) и временное сопротивление (столбцы) образцов сплава CuMg 0,2 после холодной деформации

Изучение электропроводности образцов так же показало удовлетворительные результаты. Исходя из требований стандарта, варианты относительной деформации материала на 30 или 40 % обеспечивают электропроводность 85 и 84,3 % IACS соответственно (рисунок 75), что также не выходит за рамки требований ГОСТа.

Таким образом, можно заключить, что холодная деформация сплава CuMg 0,2 на величину $\varepsilon_{отн}$ = 30 – 40 %, является достаточной для придания изделиям из него требуемого уровня прочностных характеристик и сохранения электропроводности.

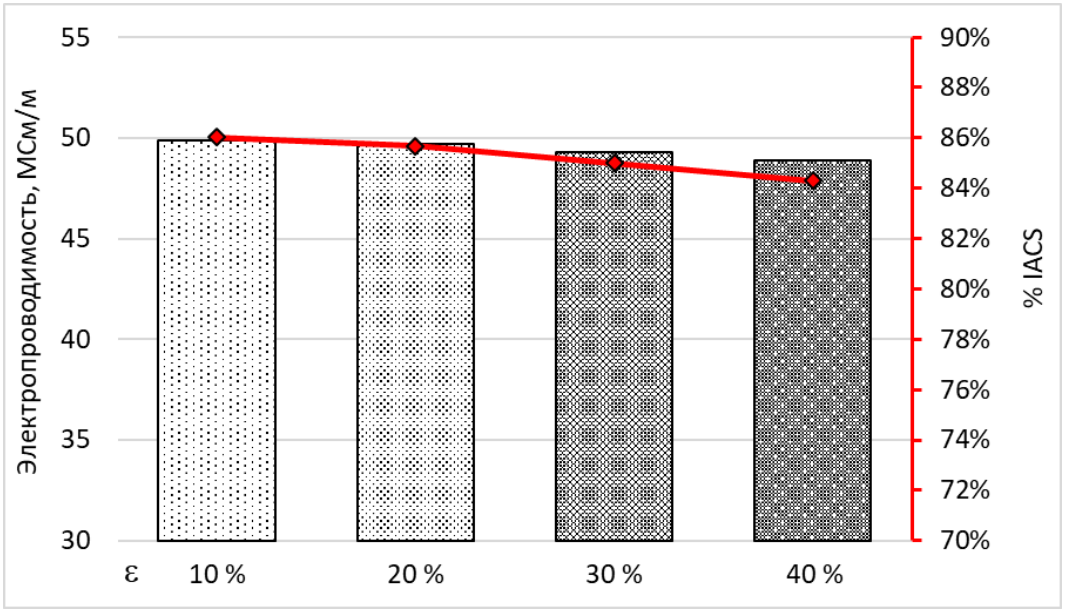


Рисунок 75 – Электропроводимость (столбцы – [МСм/м], линия – % IACS) образцов сплава CuMg 0,2 после холодной деформации

5.4 Выводы по главе

1. По результатам КЭ-моделирования установлены преимущества непрерывного прессования над традиционной технологией производства контактного провода, которые заключаются в формировании более гомогенной структуры материала, равномерному распределению накопленной деформации по телу прессуемого изделия и, соответственно, снижении вероятности возникновения дефектов, проявляющихся при его дальнейшей холодной деформации.

2. Исследование микроструктуры и механических свойств сплава CuMg 0,2 после непрерывного прессования и волочения показало, что в результате прессования формируется преимущественно рекристаллизованная структура, что является причиной низкой прочности материала ($\sigma_в$ = 198,5 МПа). После пятикратного волочения структура материала приобретает характерное деформированное состояние, его временное сопротивление разрушению при этом многократно увеличивается до 426 МПа.

3. Исходя из результатов эксперимента по моделированию холодной деформации прессованных образцов сплава CuMg 0,2, можно утверждать о достаточности величины относительной деформации заготовки контактного провода на 30 – 40 % при комнатной температуре для придания готовому изделию требуемого уровня физико-механических свойств.

Глава 6. Разработка рекомендаций и практическое использование результатов исследований

6.1 Анализ и разработка рекомендаций по совершенствованию процесса непрерывного прессования профилей из меди марки М1

Исходя из результатов проведённых исследований (глава 4) следует, что получаемые в процессе непрерывного прессования длинномерные изделия из меди М1 соответствуют лишь полутвёрдому состоянию, регламентируемому требованиями ГОСТа 1535-2006 [93] (таблица 9). В случае необходимости производства медных шин и прутков в твёрдом состоянии на предприятиях используется дополнительная обработка, путём волочения на гидравлических волочильных станах. Однако при реализации потребителю изделий в мягком состоянии их дополнительная обработка зачастую не производится и полуфабрикаты отпускаются в несоответствующем, требованиям стандарта, состоянии.

Таблица 9 – Требования к механическим свойства длинномерных изделий из меди М1 площадью поперечного сечения от 150 мм^2 и более

Состояние материала	Временное сопротивление, МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Твёрдость HV	
			мин.	макс.
Мягкое	200	40	40	65
Полутвёрдое	240	15	70	95
Твёрдое	270	8	90	115

Приведённые в пункте 4.3 настоящей работы результаты исследования влияния параметров прессования на формирование свойств длинномерных проводников из меди свидетельствуют о невозможности получения изделий в мягком состоянии непосредственно после прессования, путём варьирования температурно-скоростного режима процесса прессования CONFORM. В таком случае единственно-верным решением остаётся совершенствование процесса производства длинномерных проводников из меди путём дополнения ряда технологического оборудования линий непрерывного прессования отжиговой печью для проведения рекристаллизационного отжига изделий.

Для снятия внутренних напряжений, снижения прочности и твёрдости, а также создания равноосной структуры, медь подвергают рекристаллизационному отжигу при температурах 400 – 500 °С и времени выдержки, зависящему от размера садки [7].

Отжиг меди и сплавов на её основе в зависимости от вида изделия выполняют в протяжных, колпаковых, методических и индукционных печах. В связи с тем, что длинномерная продукция линий CONFORM по завершению процесса непрерывного прессования сворачивается в бунты массой до 3 тонн рационален выбор колпакового типа печи. Данный выбор также подкрепляется необходимостью соблюдения условия компактности оборудования для его размещения на небольшой производственной площади мини-предприятия. На рисунке 76 приведена типовая схема колпаковой печи.

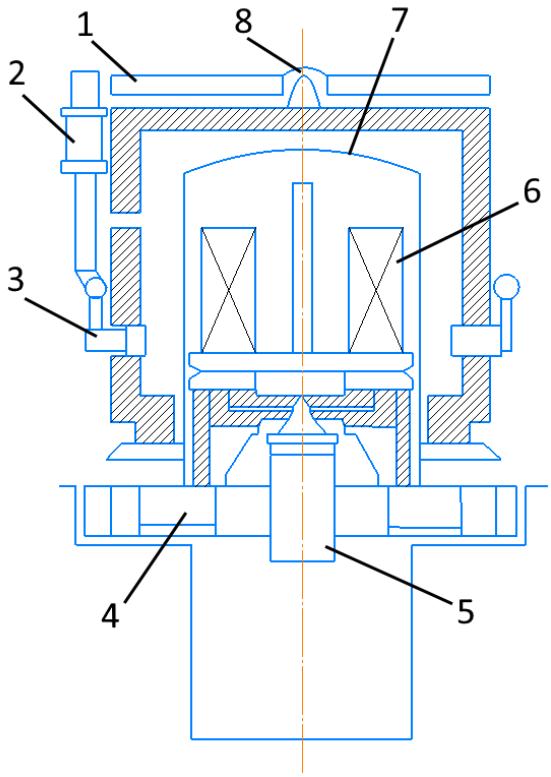


Рисунок 76 – Разрез колпаковой печи для светлого отжига меди и её сплавов:
1 – колпак печи; 2 – регулятор; 3 – плоскопламенная горелка; 4 – поддон;
5 – вентилятор рециркуляции газа; 6 – бунт обрабатываемого материала;
7 – внутренний колпак; 8 – транспортировочный крюк

С целью предотвращения окисления и сопутствующего возникновения внутренних и поверхностных дефектов изделий из меди, отжиг в колпаковых печах проводится в защитной среде водорода или азота, а также смеси этих газов. Данные печи обладают следующими особенностями:

- Выполняется откачивание воздуха из рабочей камеры печи и заполнение ее газом защитной среды перед началом работы;

- Возможно применение защитной газовой среды с высоким содержанием водорода (от 25 до 100 %), низкой точкой росы (ниже -60 °С) и низким кислородным следом (менее 1 ppm);

- Используется интенсивное перемешивание газовых масс защитной атмосферы с помощью циркуляционного вентилятора, что обеспечивает увеличение теплопередачи за счет конвекции и равномерность температуры садки в узком диапазоне (± 3 °С).

Режимы отжига технически чистой меди известны из литературных источников (рисунок 77) [2], однако в качестве рекомендаций, выносимых к практическому использованию на предприятиях, рационально ограничится в предложении диапазонов температур и времени отжига. Такой шаг объясняется крайне непостоянным уровнем влияния параметров отжига на процессы рекристаллизации и разупрочнения технически чистой меди, что обусловлено её чувствительностью к таким факторам как химический состав и наличие загрязнений в защитной среде отжига, специфика конструкции и работы отдельных узлов колпаковой печи. Рекомендуемый режим отжига для бунтов с длинномерными медными проводниками приведён в таблице 10. Дальнейшее использование данного режима на производстве должно быть подвергнуто адаптации конкретным производственным условиям путём проведения контрольных отжигов и отслеживания тенденции материала готовых изделий к разупрочнению.

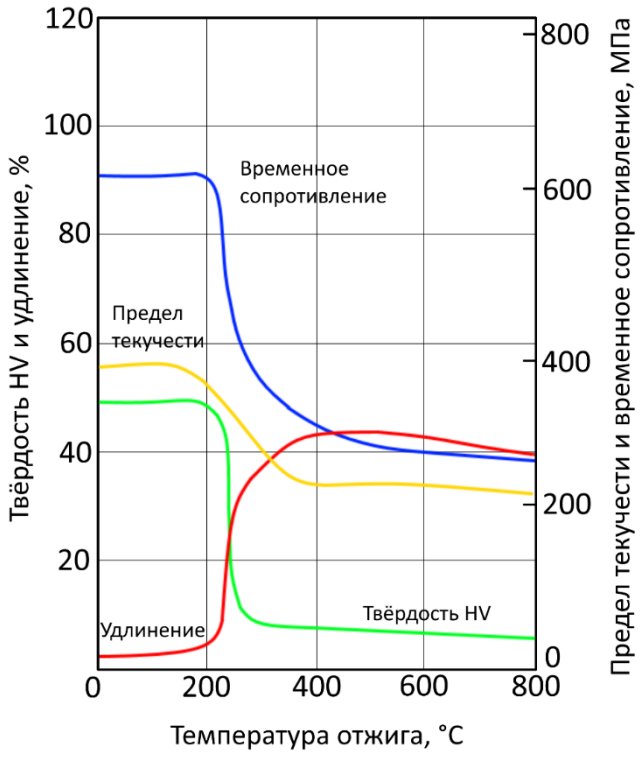


Рисунок 77 – Влияние температуры отжига на механические свойства меди М1 (при времени выдержки 1 час и предварительной $\varepsilon_{отн}$ = 50 %)

Таблица 10 – Рекомендуемый режим отжига бунтов с длинномерными проводниками из меди марки М1 в колпаковых печах

Размер садки, тонн	Защитная среда	Температура, °С	Время выдержки, час
1	H_2	450 – 500	1 – 3
3	H_2	450 – 500	2 – 3

На примере цехов непрерывного прессования таких мини-предприятий, как ООО «НМТ» (г. Кольчугино), ООО «НТЦМ» (г. Ногинск), ООО «Свелен» (г. Колпино), ставших в своём сегменте типовыми, была разработана компановка оборудования (рисунок 78). Данная схема расположения оборудования предполагает наличие участка складирования литых прутков *1*; линии CONFORM, состоящей из устройства размотки *2*, установки правки заготовки *3*, машины непрерывного прессования *4*, резервуара с охлаждающей жидкостью и гидро-насосной станции *5*, измерительного устройства *6*, моталки *7*; места складирования бунтов прессованных изделий *8*; линии волочения, включающей моталку *9* и установку гидравлического волочения и резки на мерные длины *10*; места складирования мерных волочённых изделий *11*; и одну колпаковую печь *12* габаритными размерами диаметр 2 м, высота 3 м, с возможностью одновременной садки одного бунта массой до 3 т.

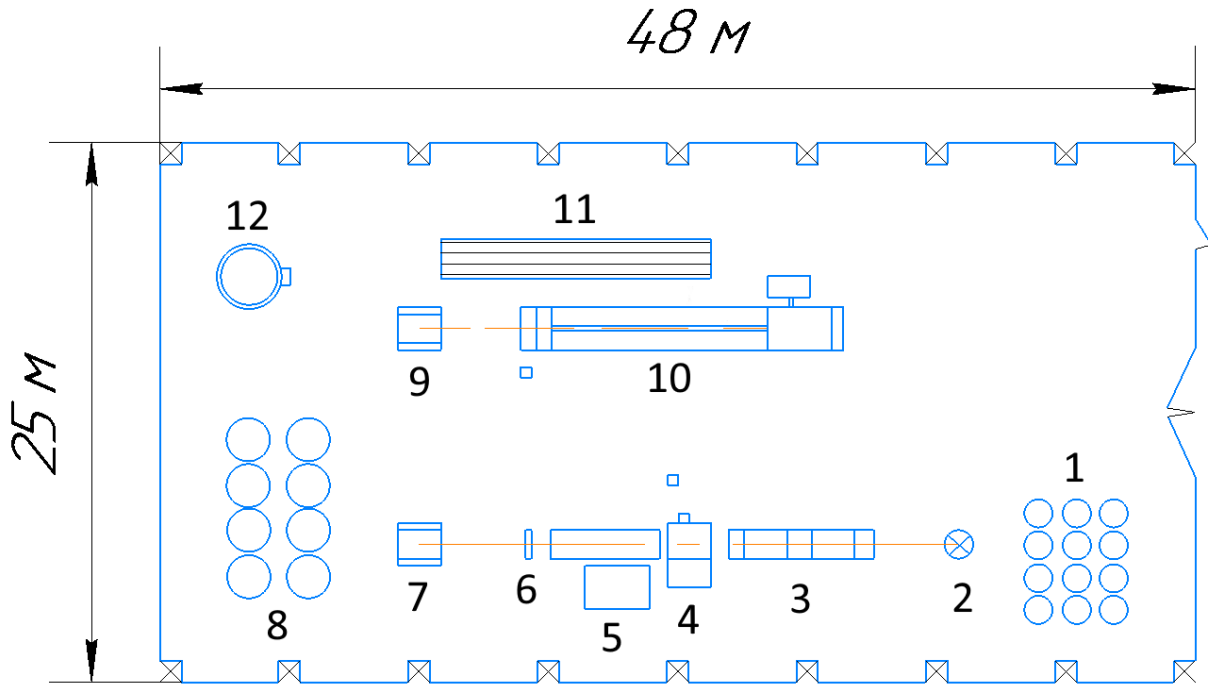


Рисунок 78 – Схема цеха непрерывного прессования медных длинномерных проводников

6.2 Совершенствование технологии производства контактного провода ВСМ на линиях непрерывного прессования

Полученные в ходе проведения эксперимента результаты, описанные в п 5.3 настоящей работы, свидетельствуют, что деформации при комнатной температуре на величину $\varepsilon_{отн}$ = 30 – 40 % (логарифмический коэффициент вытяжки $\ln\lambda$ = 0,4 – 0,5) достаточно для приведения уровня свойств непрерывно прессованной заготовки из сплава CuMg 0,2 к требуемому в ГОСТе. Таким образом, весьма актуальной задачей представляется модернизация линии непрерывного прессования CONFORM, путём дооснащения её дополнительным оборудованием для холодной деформации заготовки провода. Такое новшество позволит исключить из производственной цепочки операцию пятикратного волочения, что положительно скажется на эффективности процесса непрерывного прессования. Разработка предполагает корректировку геометрических размеров прессуемого на установке CONFORM полуфабриката-заготовки контактного провода, а именно их увеличение на величину ~ 30 % от размеров готового изделия и устранение зоны затруднённого течения на участке основания ножки контактного провода. Для доведения геометрических размеров непрерывно прессованного полуфабриката до размеров готового изделия предполагается двухэтапная деформация на величину $\varepsilon_{отн}$ ~ 15% за каждый проход с помощью роликового волочильного устройства. На рисунке 79 приведены геометрические размеры поперечного сечения прессуемой заготовки и её сечения после деформации в блоках роликовых волок.

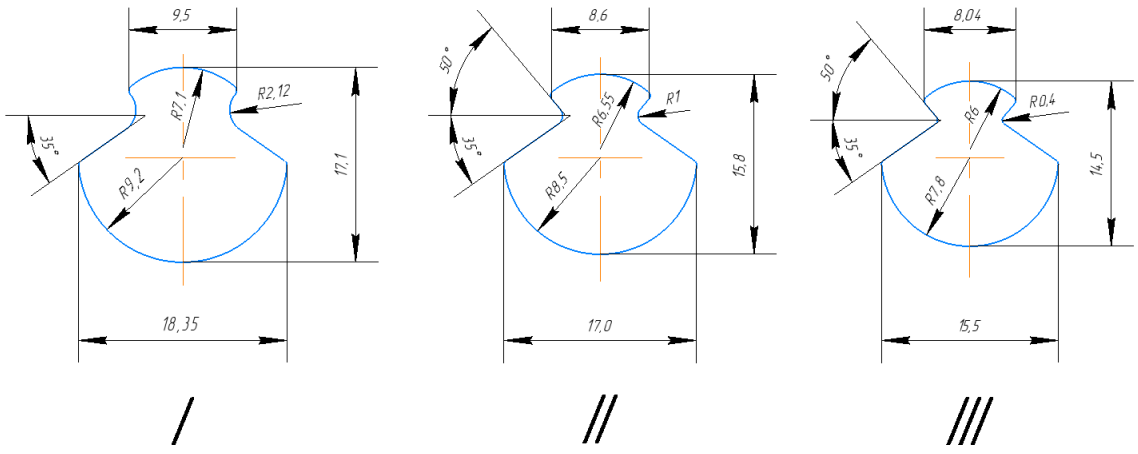


Рисунок 79 – Геометрические размеры поперечного сечения:

I) прессуемой заготовки; II) заготовки после волочения в первом блоке;

III) готового контактного провода

Модернизация линии непрерывного прессования контактного провода предполагается за счёт монтажа роликового волочильного устройства между баком системы охлаждения и устройством измерения геометрических размеров существующих линий CONFORM. Согласно разработанным существующим и применяющимся на производстве режимам литья и деформации проводников из меди и сплавов на её основе, составлена схема технологического процесса непрерывного производства контактного провода ВСМ (рисунок 80). Технология состоит из следующих этапов: подготовка шихты (брикетирование медного катодного лома); плавка медного лома с добавлением раскислителя (меди фосфористой) и легирующего компонента в индукционной печи под слоем древесного угля; подача расплава в миксер и разливка прутковой заготовки по технологии непрерывного вытягивания из расплава вверх; смотка литой прутковой заготовки в бунты; транспортировка бунтов на участок непрерывного прессования и установка их на разматывающее устройство; деформация заготовки на линии производства контактного провода, в том числе прессование на машине CONFORM, волочение в двух блоках роликовых волок, измерение и правка провода; смотка контактного провода на катушки.

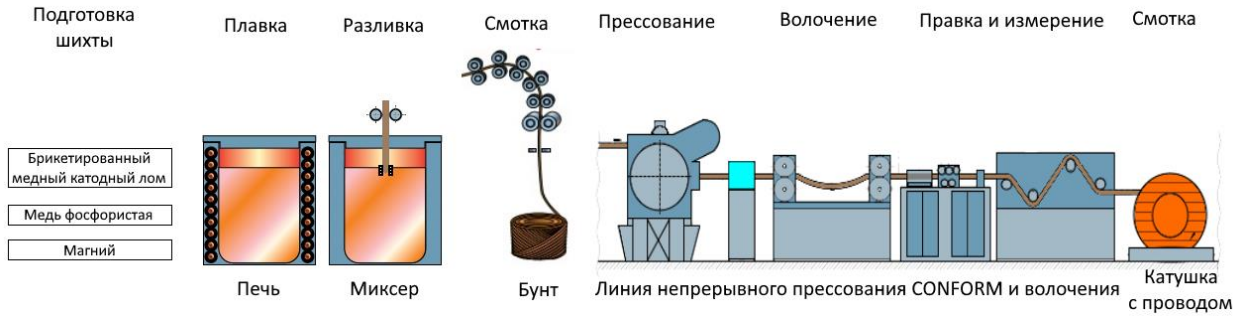


Рисунок 80 – Схема технологического процесса производства контактного провода ВСМ по технологии CONFORM

Далее выполняли разработку чертежей деформационного инструмента – матрицы установки CONFORM и роликов волочильного устройства. В конструировании матрицы важным фактором является правильное расположение канала на зеркале матрицы, который в большей степени определяет уровень неравномерности течения металла. В случае матрицы для изготовления контактного провода профиль канала – симметричный и имеет две оси симметрии (рисунок 79). Исходя из теории прессового производства пересечение этих осей профиля должны быть совмещены с центром матрицы. Ещё одним важным аспектом в данном вопросе являются энергосиловые и температурные условия процесса прессования, а именно их величина, действующая в очаге деформации на контакте

деформируемого металла с инструментом. Описанные в главе 5 результаты моделирования непрерывного прессования значительно упрощают решение этого вопроса. В качестве материала матрицы выбрана сталь 4Х5МФ1С – инструментальная штамповая сталь, сохраняющая высокие прочностные свойства даже при длительном высокотемпературном воздействии. Временное сопротивление такой стали при температуре 800 – 850 °С составляет 1100 МПа, а твёрдость после двухчасового высокотемпературного воздействия – 43 HRC. Также, для увеличения стойкости матрицы, решено увеличить её толщину с 20 мм (стандартная толщина матриц, используемых на установках CONFORM с рабочим колесом 400 мм) до, максимально допустимой конструктивными особенностями установки, толщины 35 мм. Исходя из особенностей проектирования прессового инструмента, канал матрицы в данном случае имеет расширение на величину 5° со стороны пресс-камеры и длиной 20 мм, служащее для выравнивания скорости течения металла в зонах затруднённого движения. После расширяющейся части канала следует калибрующая часть, имеющая форму требуемого профиля.

На основании вышеизложенных характеристик и особенностей был разработан чертёж матрицы, а также чертёж основания для её крепления (матрицедержатель), который необходим для использования разработанного инструмента нестандартной толщины. Трёхмерная сборная модель матричного узла, а также модель рабочего узла установки непрерывного прессования CONFORM с установленным в него матричным узлом приведены на рисунке 81.

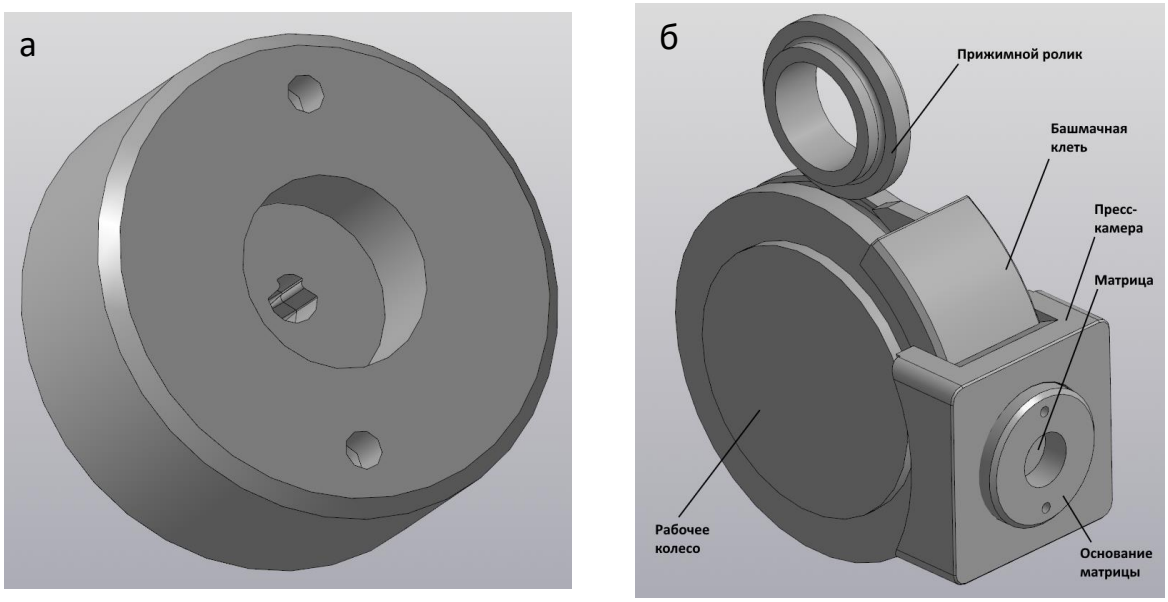


Рисунок 81. Трёхмерная CAD-модель: а) матрицы и её основания;
б) рабочего узла установки CONFORM с установленной матрицей

Применение роликовых установок для волочения фасонных профилей в настоящее находит все более широкое распространение. Это связано с преимуществами волочения в роликовых калибрах по сравнению с монолитными волоками, которые обусловлены заменой трения скольжения на трение качения. Поэтому в качестве инструмента для финишной деформации прессованного полуфабриката контактного провода выбрана трёхвалковая схема компоновки волочильного калибра.

Разработана модель деформирующего инструмента роликовой установки для волочения (рисунок 82), которая состоит из трёх роликов, изготовление которых предполагается из инструментальной стали (например 9Х1), и установленных в станину закрытого типа посредством крепления в узлах роликоподшипниковых опор. Для предупреждения возникновения рассогласования скоростей деформации и соответствующего избавления от натяжения и противонатяжения, приводящих к возникновению утяжек, рекомендуется использование петлеобразователя между волоками. Для обеспечения стабильного тянущего усилия в линию ролико-волочильного устройства рекомендована установка тянущего устройства усилием 1800 кг.

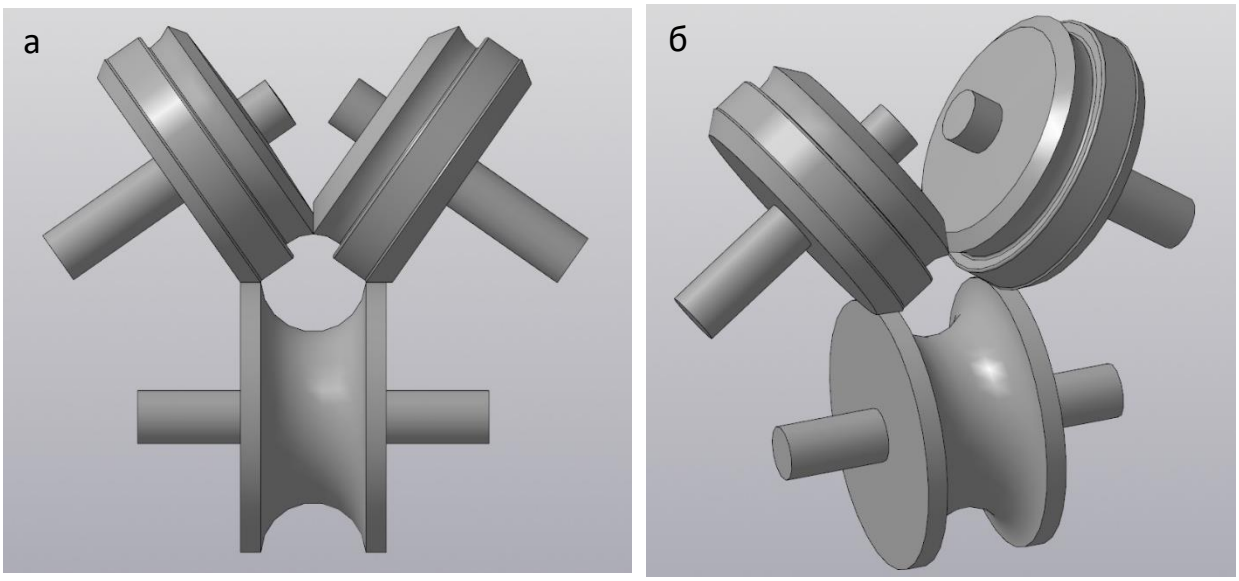


Рисунок 82. Трёхмерная модель узла роликов волочильного устройства:
а) главный вид; б) изометрия

Проверку работоспособности разработанных решений выполняли в программном комплексе КЭ-моделирования. С использованием моделей созданного инструмента (рисунки 81 и 82), а также реологических свойств материала CuMg 0,2, полученных в ходе пластометрических испытаний, строили модель технологического процесса производства контактного провода, состоящую из операций непрерывного прессования и двух операций

волочения в роликовых волоках. Операционное время моделирования прессования и волочения составило 8 и 3 секунды соответственно.

По результатам моделирования построен график изменения расчётных момента на рабочем колесе и усилия, оказываемого прессуемым материалом на матрицу. Как и при прессовании меди М1 (рисунок 46), силовые параметры процесса в случае экструзии заготовки под волочение из магниевой бронзы близки к нулю и мало изменяются вплоть до момента достижения металлом упора. Начало заполнения им пространства пресс-камеры сопровождается плавным увеличением значений момента и усилия, что меняется при контакте материала заготовки с поверхностью матрицы, который влечёт за собой их стремительный рост, продолжающийся до полного заполнения очага деформации металлом и нагрева поверхностных (контактных) слоёв инструмента теплообменом. Максимум значений момента и усилия при этом достигает 211,3 кН·м и 2,38 МН, соответственно. Затем, входе выравнивания температуры прессуемого материала в очаге деформации, происходит отмечаемая на графике стабилизация значений силовых параметров процесса, что свидетельствует о начале установившейся стадии прессования.

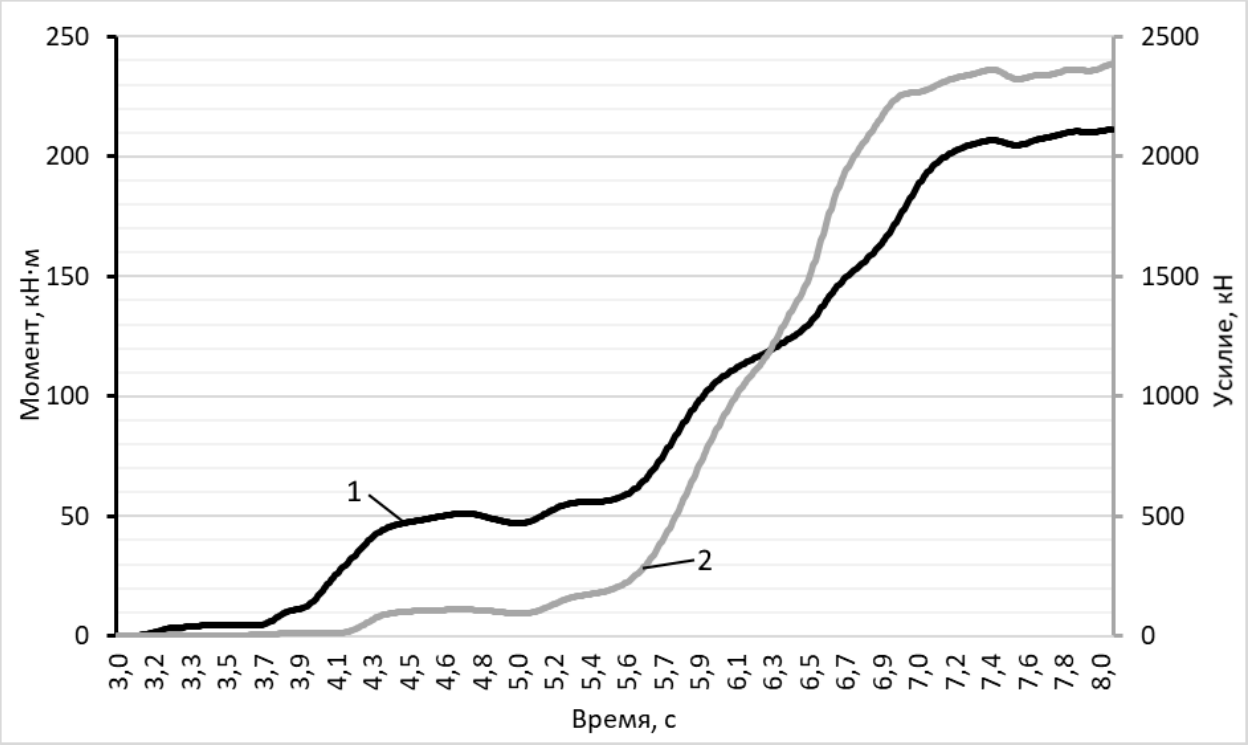


Рисунок 83 – Изменение момента на рабочем колесе (1) и
усилия на матрицу (2) от времени процесса прессования сплава CuMg 0,2

Формирование температурного градиента металла вдоль центрального сечения очага деформации (рисунок 84, а), также носит схожий характер с картиной, имеющей

место при прессовании меди технической чистоты. Однако, в случае прессования сплава CuMg 0,2, деформационный разогрев в области осадки заготовки протекает более интенсивно, что обусловлено большим временным сопротивлением материала и его меньшей теплопроводностью по сравнению с медью М1. Температурный максимум, расположенный на границе контакта металла с упором, составляет 776 °С, а минимум – 410 °С, неизменно обнаруживающий себя в «мёртвых» зонах прессования по углам форкамеры. Такая картина температурного градиента оказывает непосредственное влияние на развитие сжимающих напряжений, действующих в очаге деформации (рисунок 84, б). Их величина, за счёт столь интенсивного разогрева сплава, в среднем составляет -7,5, а максимум не превышает значения -9,1. Возникновение напряжений, характерных хрупкому разрушению, в очаге деформации не наблюдается, что свидетельствует о протекании процесса деформирования в пластической области течения металла и позволяет достигать высоких значений накопленной деформации заготовки без её разрушения.

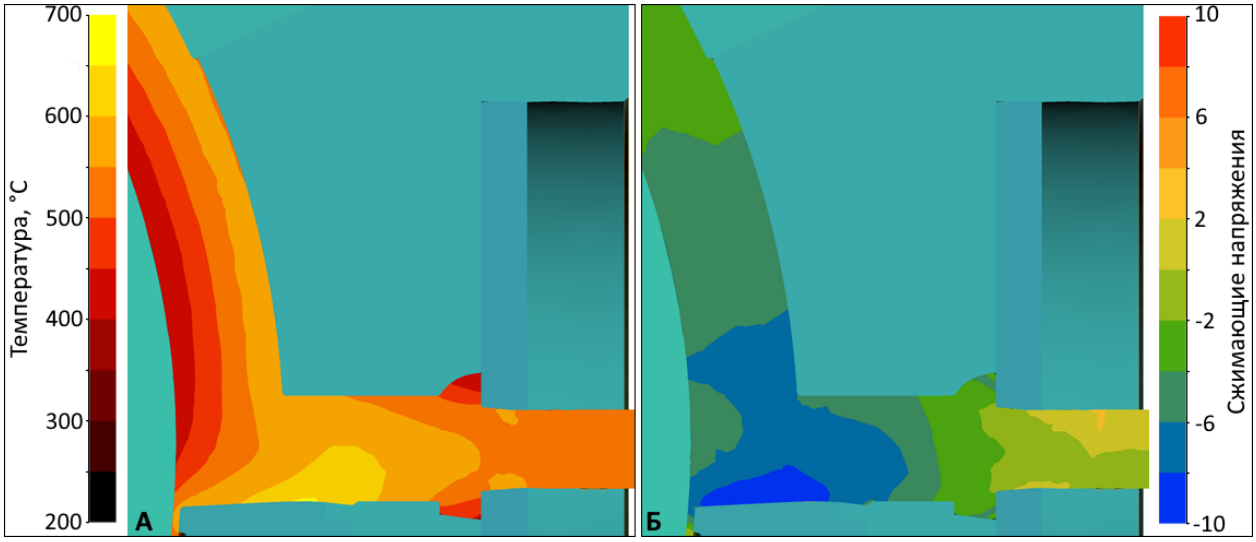


Рисунок 84 – Распределение (а) температуры и (б) сжимающих напряжений в очаге деформации при прессовании заготовки контактного провода

Получены картины распределения накопленной деформации по объему заготовки контактного провода после операций непрерывного прессования и волочения (рисунок 85). Материал заготовки на выходе из матрицы установки CONFORM характеризуется достаточно высоким уровнем накопленной деформации (рисунок 85, I), однако величина асимметрии её распределения высока, что в очередной раз свидетельствует о возможной неоднородности в формировании структуры и свойств металла после процесса непрерывного прессования. Дальнейшее волочение заготовки приводит к постепенному выравниванию накопленной деформации по её объёму (рисунок 85, II и III). Так, среднее

арифметическое значение накопленной деформации после непрерывного прессования a_I составляет 7,24, а медиана её значений m_I – 6,97. Волочение в первом и втором блоках роликового устройства позволяет достичь как увеличения, так и усреднения этих значений до a_{II} = 7,89 и m_{II} = 7,71, и a_{III} = 8,45 и m_{III} = 8,30, соответственно.

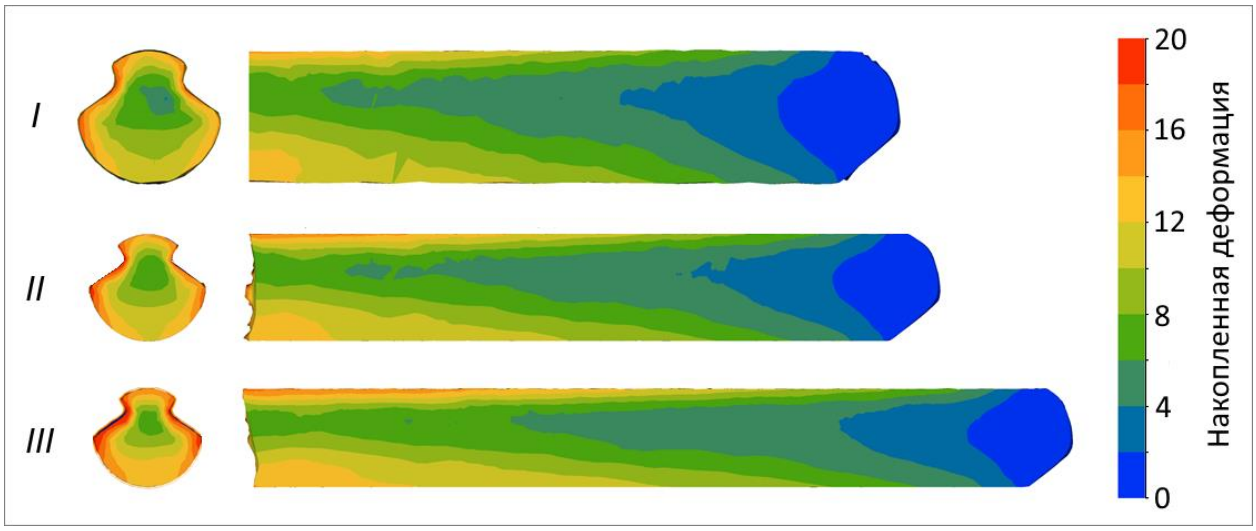


Рисунок 85 – Распределение накопленной деформации материала в поперечном и продольном сечениях после: I) непрерывного прессования;
II) волочения в первом блоке; III) волочения во втором блоке

Таким образом, полученные результаты моделирования подтверждают не только возможность реализации разработанных технологических рекомендаций, но их способность положительно влиять на формирование высокого уровня функциональных свойств контактного провода ВСМ, производимого с использованием технологии непрерывного прессования.

6.3 Выводы по главе

1. Разработаны рекомендации по усовершенствованию технологии производства длинномерных профилей из меди М1 на мини-предприятиях, заключающиеся в дооснащении цехов непрерывного прессования колпаковыми печами для отжига, с целью обеспечения возможности приведения изготавливаемых изделий (прутков, шин, профилей) соответствию требованию государственного стандарта для мягкого состояния поставки (приложение Б).

2. Обоснован и разработан план мероприятий по модернизации линии непрерывного прессования, направленный на получение возможности производства контактного провода, непосредственно на линии CONFORM, что позволит повысить экономическую и

энергетическую эффективность технологии и исключить необходимость деформации провода путём пятикратного волочения.

3. Разработаны чертежи и трёхмерные модели матрицы для прессования заготовки контактного провода фасонного сечения, а также модели роликового устройства для дополнительной деформационной обработки прессованного полуфабриката путём волочения и соответствующего придания ему требуемого уровня функциональных свойств (приложение В).

4. Выполнено компьютерное моделирование разработанных технологических операций производства провода ВСМ из сплава CuMg 0,2, результаты которого свидетельствуют о значительном увеличении однородности свойств прессованного материала заготовки после холодной деформации в роликово-волочильном устройстве.

Основные 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 ($\sigma_в$ = 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 $\sigma_в$ = 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.

Список использованных источников

1. Smith W.F., Hashemi J. Foundations of Materials Science and Engineering. Boston: McGraw-Hill Professional, 2003.
2. Davis J.R. Copper and Copper Alloys. OH: ASM International, 2003.
3. Зиновьев А.В., Часников А.Я., Потапов П.В. Физико-механические свойства и пластическая деформация меди, и её сплавов. М.: ИРИАС, 2009.
4. Pawlek F. and K. Reichel K. Der Einfluß von Beimengungen auf die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer // International Journal of Materials Research. 1956. Vol. 47, p. 347.
5. Райков Ю.Н. Обработка меди: Учебное пособие для вузов. – М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2006.
6. Перспективы развития высокоскоростного движения в России // Инновационный дайджест. [В сети интернет, доступно: 05.05.2021] http://www.rzd-expo.ru/innovation/high_speed_traffic_and_infrastructure/prospects_for_the_development_of_high_speed_movement_in_russia.php
7. Николаев А.К., Костин С.А. Медь и жаропрочные сплавы: энциклопедический терминологический словарь: фундаментальный справочник. – М.: Издательство ДПК Пресс, 2012. – 720 с.
8. Логинов Ю.Н., Мысик Р.К. Непрерывные методы литья и прокатки в производстве контактного провода для железнодорожного транспорта // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. Vol. 3, pp. 316-326.
9. ГОСТ Р 55647-2018 Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия
10. Голубев А.И. Коррозионные процессы на реальных микроэлементах. – М.: Оборонгиз, 1953. – 247 с.
11. Паршин В.С., Костров В.П., Сомов Б.С., Федоров М.И., Губашов Б.Н. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1988. 400 с.
12. Райков Ю.Н. Тенденции развития российского рынка проката из меди и ее сплавов // Медь, Латунь, Бронза. Учебное пособие для вузов. – М.: ОАО "Институт Цветметобработка", 2006.
13. Зиновьев А.В., Колпашников А.И., Полухин П.И., Глебов Ю.П. и другие. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1992. – 510с.
14. Троицкий В.П., Мохов А.И., Кобелев А.Г. Проектирование цехов обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – Волгоград: Волг ГТУ, 1997. – 528 с.

15. Королев А.А., Навроцкий А.Г., Вердеревский В.А., Кохан Л.С., Соколова О.В. Механическое оборудование заводов цветной металлургии: Учебник для вузов. В 3-х частях. Ч. 3. – М.: Металлургия, 1989. – 624 с.

16. Софинский П.И., Ершов И.М. Современные агрегаты непрерывной разливки цветных металлов в СССР и за рубежом. – М.: НИИФОРМТЯЖМАШ, 1965. – 57 с.

17. Pops H. Processing of wire from antiquity to the future // Wire Journal International. 2007. No 5.

18. Постыляков А.Ю., Логинов Ю.Н. Особенности процессов производства медной катанки // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященной памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова, [г. Екатеринбург, 26-30 ноября 2013 г.]. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. — С. 320-324.

19. Д.И. Белый. Современные технологии производства медной катанки для кабельной промышленности // Кабели и Провода. 2011. № 5, с. 29 – 33.

20. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 3–2019. – М.: Бюро НДТ, 2019.

21. Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н и другие. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов. Монография. – Красноярск: СФУ, 2013.

22. Охрименко Я.М., Бережной В.Л. Прессование металла инструментом с независимым движением контейнера // Цветные металлы. 1967. №5. С. 76–79.

23. Бережной В.Л., Охрименко Я.М. Прессование при подвижном контейнере // Тезисы докладов. Всесоюзная конференция «Процессы заготовительных цехов (ОМД)». – М.: МВТУ им Н.Э. Баумана, 1967, с. 27–19.

24. Сегал В.М. Методы исследования напряженно-деформированного состояния в процессах пластического формоизменения металлов: автореф. дис. д-ра техн. наук. Акад. наук БССР, отд-ние физ.-техн. наук, Минск. 1974

25. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Progress in Materials Science. 2006. Vol. 51. pp. 881–981.

26. Пат. US3765216 A Великобритания, МПК B 21 C 23/00. Extrusion / Green D.; заявл. 23.02.1972; опубл. 16.10.1973. – 3 с.

27. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебник. – Красноярск: СФУ, 2015. – 488 с.

28. Пат. US3934446 A США, МПК B 21 C 23/005. Methods of and apparatus for production of wire / Avitzur B.; заявл. 16.04.1974; опубл. 27.01.1976. – 22 с.

29. Grzyb R., Misiolek Z. The experimental investigations on the Force Parameters and metal flow in the combined process of Rolling and Extrusion // Archiwum Hutnitwa. – 1983. № 3. Vol. 28, pp. 321-340.

30. Alexander J.M., Hatakeyama K. On the Hot Extrolling of Aluminium. In: Davies B.J. (eds) Proceedings of the Twenty-Fourth International Machine Tool Design and Research Conference. 1984, Palgrave, London.

31. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

32. Пат. US3922898 A США, МПК B 21 C 33/00. Extrusion process / William G. Voorhes; заявл. 29.03.1974; опубл. 12.02.1975. – 8 с.

33. Довженко Н.Н., Беляев С.В., Сидельников С.Б. и другие. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография. – Красноярск: СФУ, 2009. – 256 с.

34. Адно Ю.Л. Феномен металлургических мини-заводов // Мировая экономика и международные отношения. 2014. No. 3. С. 34-45.

35. А.С. 1632547 МКП B 21 C 23/08, Российская Федерация. Устройство для непрерывного прессования металлов / Горохов Ю.В., Сергеев В.М., Гилевич Ф.С., Антич В.А., Гилевич И.Ф., Горбунов М.Г. опубликовано 07.03.1991, Бюл. № 9.

36. А.С. 1491600 СССР, МКИ B 21 C 23/08. Устройство для непрерывного прессования цветных металлов и сплавов / В. М. Сергеев, В. А. Антич, Ф. С. Гилевич, Ю. В. Горохов, Н. Н. Довженко [и др.]. (СССР). – № 4263556 / 25–27; заявл. 17.06.87; опубл. 07.07.1989, Бюл. № 25. – 2 с.

37. Пат. 96798 Российская Федерация, МКП B 21 C 23/08. Устройство для непрерывного прессования / Горохов Ю.В., Черкашин М.А., Крылов М.А.; опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23.

38. Горохов Ю.В., Тимофеев В.Н., Беляев С.В. и др. Прессовый узел установки Conform для непрерывного прессования цветных металлов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 4. с. 69-75.

39. Мочалин И.В., Горохов Ю.В., Беляев С.В., Губанов И.Ю. Экструдирование медных шин на установке «Конформ» с форкамерой // Цветные металлы. 2016. № 5. с. 75-78.

40. Горохов Ю.В., Тимофеев В.Н., Губанов И.Ю. и др. Модернизация конструкции установки Конформ: в Сб. «Цветные металлы и минералы». Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2017. с. 591-596.

41. А.С. 1031760 СССР. МКИ В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования / Сергеев В.М., Агеев Л.М., Горохов Ю.В. [и др.]; опубл. 30.07.1983, Бюл. № 28.

42. А.С. 1251428 СССР, МКИ В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования сыпучих материалов / Горохов Ю.В., Сергеев В.М., Гилевич Ф.С., Васюкевич А.Н.; зарегистр. в Гос. Реестре изобр. СССР 15.04. 1986.

43. А.С. 1398193 СССР, МКИ В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования / Горохов Ю.В., Сергеев В.М., Гилевич Ф.С. [и др.]; зарегистр. в Гос. реестре изобр. СССР 22. 01. 1988.

44. Пат. US4564347A США, МПК В 21 С 23/005. Continuous extrusion apparatus / Vaughan A.J.; заявл. 12.04.1983; опубл. 14.01.1986. – 8 с.

45. Hoshino M., Murata S. Flow Analysis of Conclad Extrusion with Two Wheels // Materials Today: Proceedings. 2015. Vol. 2, pp. 4786-4793.

46. Hoshino M. Investigation of clad wire production by conclad extrusion with twin wheels // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207, pp. 377-382.

47. Горохов Ю.В., Солопко И.В., Суслов В.П., Крылов М.А. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ» // Цветные металлы. 2010. No. 12. с. 69-71.

48. Шимов Г.В., Фоминых Р.В., Ефремова А.С., Ковин Д.С. Исследование траектории течения непрерывнолитой меди при прессовании способом Conform // Цветные металлы. 2018. No. 4. с. 79-85.

49. Фоминых Р.В., Шимов Г.В., Ефремова А.С., Лямина Э.А. Экспериментальное исследование причин брака медных шин при прессовании на линии непрерывной экструзии «Conform-400». В сб.: «Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых» (г. Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2017. с. 47-53.

50. Jing L., Gaosheng F., Zhimeng R., Jie L., Huan H. The Microstructure Evolution of Thermal Deformation of Continuous Extrusion Copper Bus Bar // MATEC Web of Conferences 228, 04006 (2018)

51. Medina S.F., Hernandez C.A. General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels // Acta Materialia. 1996. Vol. 44. Issue 1. pp. 137-148.

52. Li B., Li Ch., Yao X., Song B. Effects of continuous extrusion on microstructure evolution and property characteristics of brass alloy // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 189-193, pp. 2921-2924.

53. Li B., Wei Qi., Pei J.-Y., Zhao Y. Flow characteristics of brass rod during continuous extrusion // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81, pp. 647-651.

54. Yuan Y., Li Z., Xiao Z., Zhao Z., Yang Z. Microstructure evolution and properties of Cu – Cr alloy during continuous extrusion process // J. Alloy. Compd. 2017. Vol. 703. pp. 454-460.

55. Liu Q., Zhang X., Ge Y., Wang J., Cui J.-Z. Effect of processing and heat treatment on behavior of Cu-Cr-Zr alloys to railway contact wire // Metallurgical and materials transactions A. 2006. Vol. 37A. pp. 3233-3238.

56. Feng H., Jiang H., Yan D., Rong L. Effect of continuous extrusion on the microstructure and mechanical properties of a CuCrZr alloy // Materials Science & Engineering A. 2013. Vol. 582. P. 219-224.

57. Xu G.-L., Peng L.-J., Huang G.-J., Xie H.-F., Yang Z., Feng X., Yin X.-Q., Mi X.-J. Microstructural evolution and properties of a Cu–Cr–Ag alloy during continuous manufacturing process // Rare Metals. 2019.

58. Song L., Yuan Y., Yin Z. Microstructural evolution in Cu-Mg alloy processed by CONFORM // International Journal of Nonferrous Metallurgy. 2013. Vol. 2. pp. 100-105.

59. Yuan Y., Dai C., Li Z., Yang G., Liu Y., Xiao Z. Microstructure evolution of Cu–0.2Mg alloy during continuous extrusion process // Materials Research Society. 2015. Vol. 30, No. 18, pp. 2783-2791.

60. Yuan Y., Li Z., Xiao Z., Zhao Z. Investigations on voids formation in Cu–Mg alloy during continuous extrusion // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2017. Vol. 69, No. 9, pp. 1696-1700.

61. Lu J., Saluja N., Riviere A.L., Zhou Y. Computer modeling of the continuous forming extrusion process of AA6061 alloy // Journal of Materials Processing Technology. 1998. Vol. 79. Issues 1-3, pp. 200-212.

62. Rajendran N., Valberg H., Misiolek W.Z. The FEM simulation of continuous rotary extrusion (CRE) of aluminum alloy AA3003 // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1896. P. 050004.

63. Bressan J.D., Martins M.M., Button S.T. Analysis of metal extrusion by the Finite Volume Method // Procedia Engineering. 2017. Vol. 207. pp. 425-430.

64. Katajarinne T., Manninen T., Ramsay P. Numerical simulation of flash formation in continuous rotary extrusion of copper // J. Mater. Process. Technol. 2006. Vol. 177. No. 1-3, pp. 604-607.

65. Wu P.-Y., Xie S.-S., Li H.-Q., Yan M., Huang G.-J., Cheng L. Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming process of copper concave bus bar // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007. Vol. 17. I. 2, pp. 280-286.

66. Li B., Song B.-Y., Chen L., Zhao Y., Yun X.-B. Numerical simulation on copper bus-bar under large extending ratio for continuous extrusion process // Journal of Plasticity Engineering. 2009. Vol. 16. I. 3, pp. 111-115.

67. Li C., Bao Y.S., Xiao D.L. FVM simulation of the effect of preventing ring structure on continuous extrusion process // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 314-316, pp. 767-771.

68. Yun X., You W., Zhao Y., Li B., Fan Z. Continuous extrusion and rolling forming velocity of copper strip // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2013. Vol. 23, pp. 1108–1113.

69. Шимов Г.В., Ковин Д.С., Фоминых Р.В., Богатов А.А. Моделирование начальной стадии заполнения форкамеры при прессовании медной шины на линии непрерывной экструзии «Conform-400». В сб.: «Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых» (г. Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2017. с. 599-603.

70. Shimov G.V., Bogatov A., Kovin D. FEM Simulation of copper busbar pressing on the continuous extrusion line "CONFORM" // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284, pp. 547-551.

71. Ershov A.A., Loginov Y.N. Simulation of the Conform-Type Pressing Process by Using the QFORM VX Software Complex // Metallurgist. 2018. Vol. 62, pp. 207-211.

72. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Учебное пособие. 2016г.

73. QuantorForm2019. [В сети интернет, доступно: 05.05.2021]. https://qform3d.com.

74. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. - М.: Металлургия, 1982. - 584с.

75. Галкин А.М., Полухин П.И., Косырев В.К. Пластическая деформация сталей и сплавов. - М.: МИСиС, 1996.

76. Мочалов Н.А., Галкин А.М., Мочалов С.Н., Парфенов Д.Ю. Пластометрические исследования металлов. - М.: Интермет инжиниринг, 2003. - 317с.

77. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1983. - 352с.

78. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина А.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. - М.: Мисис, 2005. - 432с.

79. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник. 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Металлургия, 1973 г., 224 с.

80. Пресняков А.А., Червякова В.В. Природа провалов пластичности у металлических сплавов. - Алма-Ата: «Наука», 1970. - 195с.

81. Мироненко Ю.П., Пресняков А.А. Сопротивление деформированию тяжелых цветных сплавов. - Алма-Ата: Издательство АН КазССР, 1961. - 130 с.

82. Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. - М.: Металлургия. 1989. - 544с.

83. ГОСТ 21073.1–75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур (с Изменением № 1; ИУС 3-84) — М. : ИПК Издательство стандартов, 1984. — 6 с.

84. 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 // Material Science Forum, 918 MSF, 2018, pp. 145-151.

85. 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.

86. 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 // Металлург. 2019. № 3, с. 94-98.

87. ГОСТ 434-78. Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электротехнических целей. Технические условия; взамен ГОСТ 434-71 – М.: ИПК Издательство стандартов, 1979.

88. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – М: Металлургия, – 1986.

89. Hallberg H., Wallin M., Ristinmaa M. Modeling of continuous dynamic recrystallization in commercial-purity aluminum // Mater. Sci. Eng.: A. 2010. Vol. 527. No. 4-5, pp. 1126-1134.

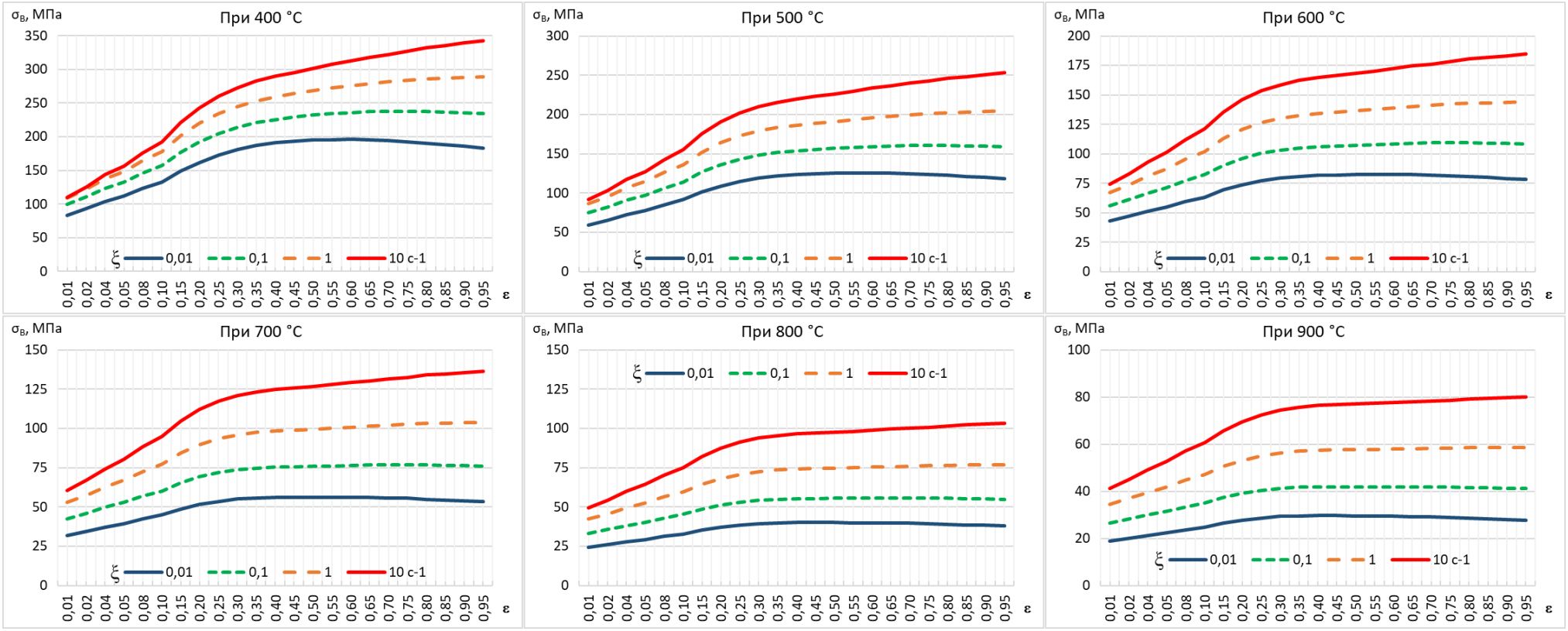
90. Кошмин А.Н., Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н.. Исследование напряжённо-деформированного состояния и трансформации микроструктуры медных электротехнических шин в очаге деформации при непрерывном прессовании // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. № 1, с. 36-48.

91. Кошмин А.Н., Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н. Экспериментальное и теоретическое исследования влияния технологических параметров процесса непрерывной экструзии на формирование прямоугольных медных шин // Цветные металлы. 2021. № 7, с. 71-78.

92. Ерманок М.З., Ватрушин Л.С. Волочение цветных металлов и сплавов. 2-е издание. – М.: Металлургия, 1988. – 287 с.

93. ГОСТ 1535-2006. Прутки медные. Технические условия; взамен ГОСТ 1535-91 – М.: Стандартинформ, 2006.

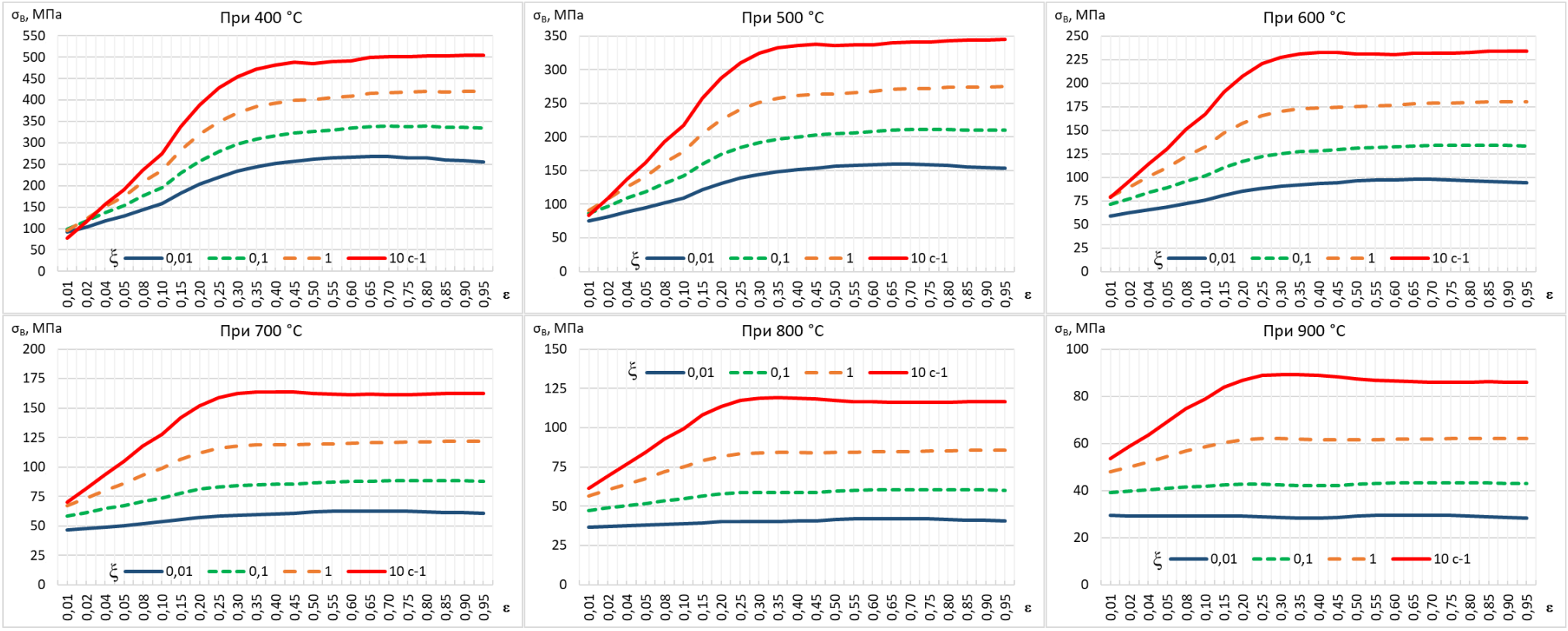
Приложение А



Временное сопротивление разрушению сплава CuMg 0,2 в диапазоне температур 400 – 900 °С,

скорости деформации 0,01 – 10 $с^{-1}$ и накопленной деформации 0,01 – 0,95

Приложение А – продолжение



Временное сопротивление разрушению сплава CuMg 0,5 в диапазоне температур 400 – 900 °С,

скорости деформации 0,01 – 10 $с^{-1}$ и накопленной деформации 0,01 – 0,95

Приложение Б

АКТ

о промышленной применимости результатов
диссертационной работы А.Н. Кошмина
на тему: «Комплексное исследование процесса непрерывного прессования и совершенствование технологии производства электрических проводников из сплавов на основе меди»

В рамках двустороннего сотрудничества между ООО «Свелен», в лице генерального директора Грачева Г.Н., и кафедрой ОМД НИТУ «МИСиС», в лице профессора Зиновьева А.В. и аспиранта Кошмина А.Н., был выполнен ряд научно-исследовательских работ, посвящённых изучению особенностей непрерывного прессования длинномерных проводников из меди. За время реализации исследования, с использованием материалов и технологического оборудования предоставленных ООО «Свелен», были получены результаты касаемо следующих изысканий:

- изучен характер формирования микроструктуры и свойств медных шин и прутков в процессе прохождения материала очага деформации при непрерывном прессовании на установке CONFORM;
- на производственной площадке выполнены опытные работы по варьированию температурно-скоростных параметров непрерывного прессования прямоугольных шин 10х60 мм из меди М1;
- осуществлён широкий спектр лабораторных исследований опытных образцов, полученных при разных скоростях прессования.

В результате выполнения совместных научно-производственных исследований получены данные, позволяющие судить о величине влияния параметров процесса непрерывного прессования на формирование функциональных свойств готовой прессованной продукции из меди М1, что является несомненно важным для понимания физической сущности процесса CONFORM, корректного ведения технологического процесса и проведения дальнейших разработок в области данной технологии и совершенствования оборудования производственных линий непрерывного прессования.

Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе Кошмина А.Н., представляют практический интерес для ООО «Свелен» и будут использованы для совершенствования производственного процесса непрерывного прессования проводников из меди и её сплавов.

От НИТУ «МИСиС»	От ООО «Свелен»
Заведующий кафедрой ОМД	Генеральный директор
_____ А.С. Алещенко	_____ Г.Н. Грачев
Научный руководитель	Начальник ПВУ
_____ А.В. Зиновьев	_____ П.А.Барабанов
Аспирант	Консультант
_____ А.Н. Кошмин	_____ А.Я. Часников

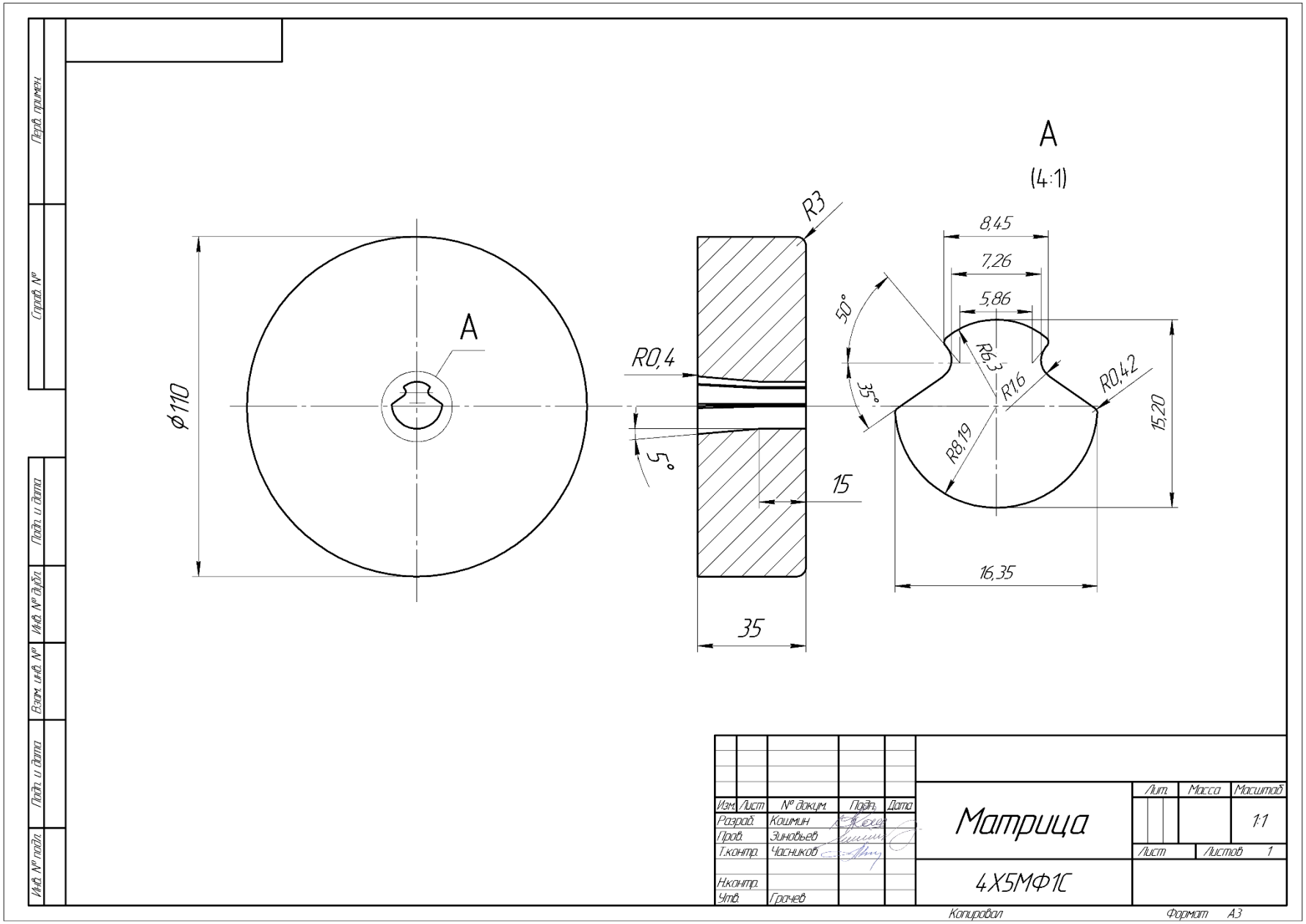
Приложение В

Нормативно-технологическая карта

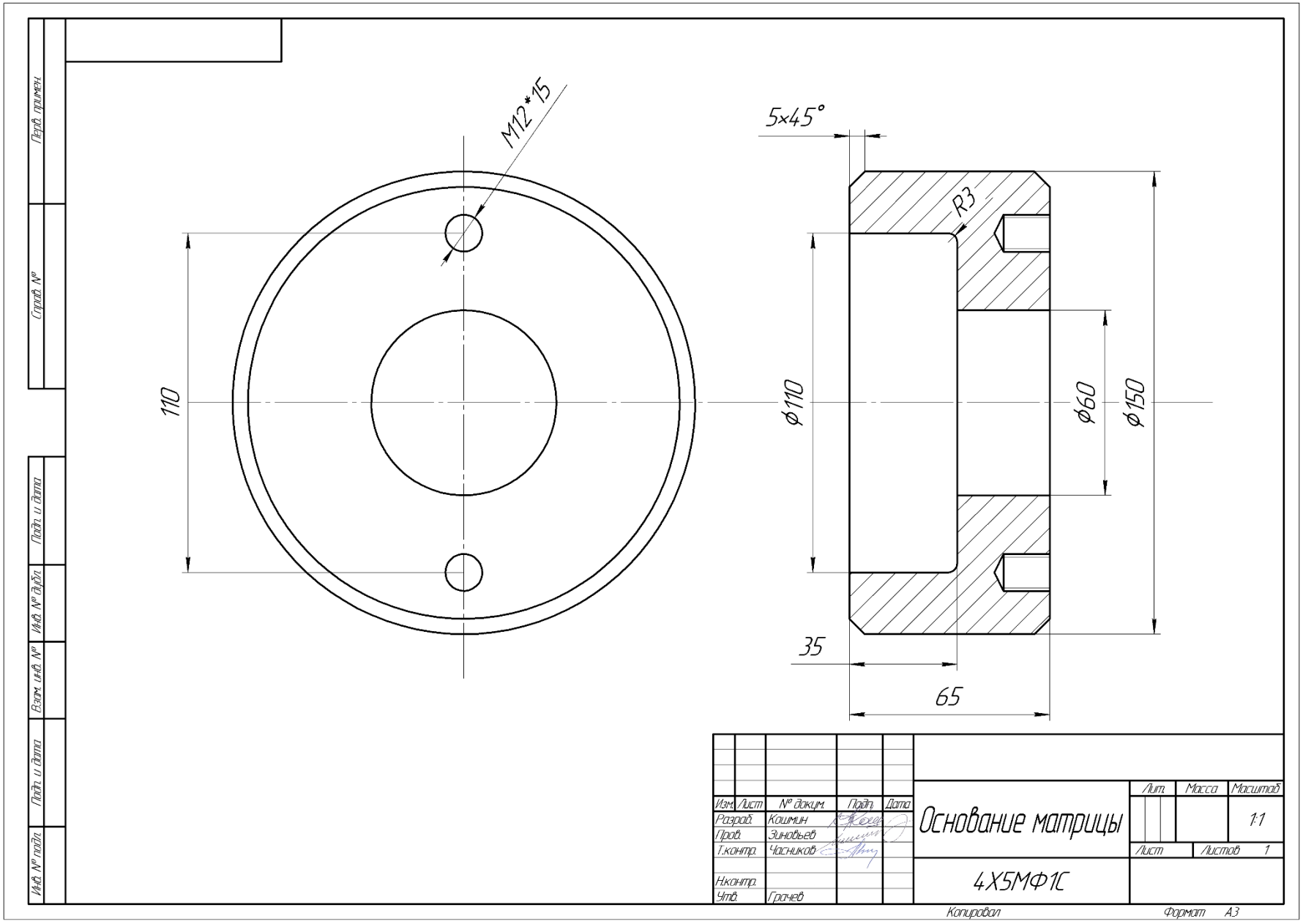
Изделие: Провод из бронзы фасонный номинальным сечением 150 мм^2, предназначенный для участков со скоростью движения свыше 200 км/ч; ГОСТ Р 55647-2018.
Заготовка: брикетированные катодная медь марки М0к по ГОСТ 859-2001 и медные лома 1 группы по ГОСТ1639-2001. Масса брикета до 50 кг.
Выход годного от 1 плавки - 92,7 %.

Номер операции	Наименование операции	Оборудование	Характеристики операции	Размеры после операции	Норма потерь и отходов металла, %	Заправочный коэффициент на 1 т продукции
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	Плавление медного лома	Индукционная печь	Т = 1150 °С	-	2	1,079
2	Легирование и раскисление расплава	Индукционная печь	Т = 1150 °С	-	0,1	1,058
3	Формовка литого прутка	Миксер и графитовый водоохлажадаемый кристаллизатор	8 ручьёв разливки	Ø 20 мм	-	1,057
4	Вытягивание прутка из расплава и смотка в бунты	Тянущие ролики и двухпозиционное сматывающее устройство	$v_{выт}$ = 400 мм/мин	Ø 20 мм	-	1,057
5	Транспортировка бунтов на участок прессования	Электропогрузчик	-	Ø 20 мм	-	1,057
6	Непрерывное прессование	Установка TLJ400	Тн = 25 °С; Тпр = 550-600 °С; $v_{пр}$ = 4 м/мин	S = 215 мм^2	4	1,057
7	Волочение	Роликовый блок 1	Тв = 25 °С; $v_в$ = 4 м/мин; ε = 15-20 %	S = 180 мм^2	0,5	1,017
8	Волочение	Роликовый блок 2	Тв = 25 °С; $v_в$ = 4,65 м/мин; ε = 15-20 %	S = 150 мм^2	0,45	1,012
9	Контроль размеров и правка	Правильное устройство	-	-	-	1,007
10	Смотка на катушки	Сматывающее устройство	$m_к$ = до 3 т	-	-	1,007
11	Лабораторные испытания	Лабораторное оборудование	-	-	0,7	1,007
12	Сдача на склад	Электропогрузчик	-	-	-	1

Приложение В – продолжение



Приложение В – продолжение



Приложение Г

Директор института
Экотехнологий и инжиниринга
НИТУ «МИСиС»
_____ А.Я. Травянов
«2» сентября 2021 г.

Акт

об использовании в учебном процессе материалов диссертации аспиранта кафедры Обработки металлов давлением Кошмина Александра Николаевича на тему: "Комплексное исследование процесса непрерывного прессования и совершенствование технологии производства электрических проводников из сплавов на основе меди"

Настоящий Акт подтверждает, что на кафедре ОМД при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия» по программе «Технологии материалов» и магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» по программе «Деформационная обработка металлов и сплавов» используются результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы Кошмина А.Н.

Указанные материалы используются при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по курсам «Совмещенные процессы деформационно-термической обработки», «Современные методы производства сплошных и полых изделий», при выполнении КНИР и выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

Заведующий кафедрой
Обработки металлов давлением А.С. Алещенко

Учёный секретарь кафедры
Обработки металлов давлением Т.Ю. Сидорова

Научный руководитель А.В. Зиновьев