

На правах рукописи



**МОТКОВ Михаил Михайлович**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОГО  
ПРЕССОВАНИЯ И ВОЛОЧЕНИЯ ПОЛУЧЕННОЙ  
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ЗАГОТОВКИ  
ИЗ СПЛАВА 01417 ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ  
С ЗАДАНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

**05.16.05** – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Сидельников Сергей Борисович**

**Официальные оппоненты:**

**Рааб Георгий Иосифович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», ведущий научный сотрудник НИИ физики перспективных материалов.

**Песин Александр Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры технологий обработки материалов.

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится «20» декабря 2021 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д **24.2.404.01** на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 348.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «    »                      2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Лесив Елена Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Деформированные длинномерные полуфабрикаты в виде прутков, катанки и проволоки из алюминиевых сплавов широко применяются для изготовления продукции электротехнического назначения. Высокие эксплуатационные свойства в сочетании с малым удельным весом и высокой электропроводностью дают возможность использовать кабельную продукцию в линиях электропередач, авиационной и космической технике. При изготовлении электропроводников для летательных аппаратов, работающих при повышенных температурах (до 250 °С), наиболее применяемыми являются высоколегированные сплавы алюминия с редкоземельными металлами (РЗМ), обладающие необходимым комплексом механических, электрических свойств и термостойкостью. Одним из таких сплавов является сплав 01417 с содержанием редкоземельных металлов 7-9%. Ранее для производства проволоки диаметром 1,0-1,2 мм из этого сплава применялась многоступенчатая гранульная технология, разработанная во Всесоюзном институте легких сплавов, включающая 17 технологических переделов. Это приводило к высокой себестоимости полуфабрикатов, обусловленной высокой трудоемкостью и большими энергозатратами на их производство. В последнее время возникла потребность в проволоке малых диаметров из сплава 01417, и в 2018 году были разработаны и введены в эксплуатацию технические условия ТУ 1-809-1038-2018, которые для проволоки из сплава 01417 регламентируют следующие свойства: временное сопротивление разрыву при растяжении должно находиться в пределах  $\sigma_b = 180-200$  МПа; временное сопротивление разрыву при температуре 250 °С в пределах  $\sigma_b = 100-120$  МПа; относительное удлинение составлять  $\delta = 8-14$  %; электросопротивление  $\rho = 0,03000-0,03200$  Ом·м/мм<sup>2</sup>. На сегодняшний день вопросы научного обоснования технологии изготовления такой проволоки диаметром 0,5 мм, получаемой на волочильных машинах для тонкого и тончайшего волочения и имеющей требуемый комплекс свойств, не решены, так как ресурс пластических и прочностных свойств сплава 01417 ограничен, что обуславливает необходимость проведения комплексных исследований по данной тематике. Вместе с тем в последнее время для получения длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, в том числе и сплавов системы Al-РЗМ, разработаны технологии непрерывного литья слитков малого поперечного сечения в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) и их последующей деформации на установках непрерывного прессования Конформ или СПП (совмещенной прокатки-прессования). Применение таких технологий может привести к решению этих вопросов и получению проволоки малых диаметров с требуемым комплексом эксплуатационных свойств. Поэтому актуальной научно-технической задачей является разработка новых технологий совмещенной обработки для получения длинномерных полуфабрикатов из высоколегиро-

ванных сплавов системы Al–РЗМ, для изготовления облегченных бортовых проводов авиационного назначения.

Актуальность исследований подтверждается тем, что они выполнены в рамках проекта по Постановлению Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» в соответствии с договором Минобрнауки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки», при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» в рамках научного проекта № 18-48-242021 «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al–РЗМ с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств» (2019-2020), а также в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ), проект № FSRZ-2020-0013.

**Степень разработанности темы:** Результаты исследований по получению длинномерных полуфабрикатов из цветных металлов и их сплавов путем применения методов непрерывного прессования с использованием активных сил трения изложены в работах В.Л. Бережного, М.С. Гильденгорна, Ф.С. Гилевича, Ю.В. Горохова, Н.Н. Довженко, В.З. Жилкина, В.Н. Корнилова Ю.Н. Логинова, Г.И. Рааба, С.Б. Сидельникова, В.Г. Шеркунова и др. Однако, для решения научной задачи по разработке технологии получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 и изучения свойств полуфабрикатов на всех технологических переделах ее изготовления, требуется проведение дополнительных исследований.

**Целью исследований является** разработка комплекса технических и технологических решений для получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств с применением непрерывных методов литья, прессования и волочения.

**Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:**

- проведение анализа свойств проволоки из сплава 01417, полученной по гранульной технологии, и с использованием метода непрерывного литья и прокатки;
- определение реологических свойств литых заготовок из сплава 01417 и компьютерное моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования прутка с использованием заготовки круглого сечения из этого сплава;

- разработка методики определения реализуемости и силовых параметров процесса совмещенной прокатки-прессования в ящичном калибре заготовки круглого поперечного сечения из сплава 01417, полученной в электромагнитном кристаллизаторе;
- проведение экспериментальных исследований деформационных и силовых параметров на установках непрерывного прессования прутков из сплава 01417 ;
- разработка маршрутов волочения проволоки и режимов отжига при использовании прутков, изготовленных на установках непрерывного прессования;
- проведение исследований структуры и свойств прутков и проволоки из сплава 01417, полученных с применением методов непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, непрерывного прессования и волочения, и установление закономерностей их изменения от параметров деформационной обработки.
- разработка новых технологий совмещенной обработки и устройств для ее реализации с целью получения проволоки из сплава 01417 с заданным уровнем физико-механических свойств и апробация результатов исследований в промышленных условиях.

#### **Научная новизна полученных результатов исследований:**

1. Разработана и экспериментально проверена методика определения реализуемости процесса и расчета силовых затрат при совмещенной прокатке-прессовании заготовки круглого поперечного сечения в закрытом ящичном калибре, которая позволила выбрать конструктивные параметры инструмента и мощность оборудования для реализации непрерывного прессования металла в лабораторных и промышленных условиях.
2. Получены новые данные по реологическим свойствам непрерывнолитых заготовок круглого поперечного сечения из сплава 01417, изготовленных с помощью электромагнитного кристаллизатора, и установлены зависимости сопротивления металла деформации этого сплава от температуры, скорости и степени деформации в широком диапазоне их изменения.
3. Путем экспериментальных исследований выявлены закономерности формирования структуры, механических, электрических свойств и термостойкости длинномерных полуфабрикатов на всех технологических этапах изготовления проволоки малых диаметров из сплава 01417, включая литье в ЭМК, непрерывное прессование и волочение.
4. На основании результатов аналитических исследований и компьютерного моделирования научно обоснованы технологические параметры непрерывного прессования и волочения, что позволило с их использованием впервые получить опытно-промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 с требуемым уровнем физико-механических свойств.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Создана компьютерная модель процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре, позволяющая рассчитать формоизменение, температуру, скорость и силовые параметры при различных условиях обработки.

2. Определены температурно-скоростные, деформационные параметры и разработана технология для производства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, включающая следующие переделы: получение непрерывнолитых заготовок круглого поперечного сечения с помощью ЭМК диаметром 12-18 мм; изготовление деформированных полуфабрикатов в виде прутков диаметром 5-9 мм с использованием методов Конформ или СПП; получение проволоки диаметром 0,5 мм волочением с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств.

3. Для реализации данной технологии разработаны конструкции установок для непрерывного литья, прокатки и прессования, одна из которых имеет в своем составе электромагнитный кристаллизатор и деформирующий валковый узел с закрытым ящичным калибром, у которого ширина канавки валка с ручьем больше диаметра заготовки на 5-15%, а гребень валка с выступом имеет высоту, рассчитанную из условия равенства площадей заготовки и калибра.

4. По предложенной технологии в промышленных условиях на предприятиях СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель), ООО «Завод современных материалов» и ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск) по разным режимам с использованием установок непрерывного прессования Конформ и СПП изготовлены опытные партии проволоки из сплава 01417 для бортовых проводов авиационного назначения, свойства которой соответствуют требованиям ТУ 1-809-1038-2018, что подтверждено протоколами испытаний физико-механических свойств и термостойкости, выполненных АО «ОКБ Кабельной промышленности» (г. Москва) и ООО «ИК ЦТО» (г. Новосибирск).

5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Металлургия и аспирантов по специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением.

**Методология и методы исследований.** Исследования выполнены с использованием основных законов обработки металлов давлением, экспериментальных методов определения параметров процесса деформации металла и свойств методами испытаний на растяжение и кручение, металлографических методов исследований структуры металла и метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D.

### **На защиту выносятся:**

– результаты экспериментальных исследований реологических свойств непрерывнолитых заготовок, полученных с помощью ЭМК, и физико-механических свойств длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417;

- технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 с применением методов литья в ЭМК и непрерывного прессования с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств;
- результаты компьютерного моделирования и экспериментально-аналитической оценки параметров процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки из сплава 01417 круглого сечения в ящичном калибре.

**Степень достоверности полученных результатов.** Подтверждается применением научных методов исследований на аттестованном и поверенном оборудовании и известных программных комплексов для компьютерного моделирования, а также данными практической реализации опытно-промышленного опробования разработанной технологии.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на международных конференциях и конгрессах, таких как XV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering» (г. Ченстохова, Польша, 2014 г.); «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2017, 2019 г.); Magnitogorsk Rolling Practice 2019: proceedings of the 4th Youth Scientific and Practical Conference (г. Магнитогорск, 2019 г.); Всероссийских научно-технических конференциях СФУ (2013, 2014 гг.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 12 печатных трудах, из них в 3 статьях из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 5 статьях в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus, и 1 патенте на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 109 источников, и 5 приложений. Основной материал изложен на 126 страницах, включая 41 таблицу и 49 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и области применения сплавов системы Al-PЗМ для производства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения. Приведено обоснование технико-экономической целесообразности получения проволоки из этих сплавов для нужд авиакосмической промышленности. В качестве материала для исследований выбран сплав 01417, приведен его химический состав и дано описание его физико-механических свойств. Установлено, что для производства качественной литой заготовки небольшого поперечного сечения в последнее время все чаще применяют метод непрерывного литья с использованием электромагнитного кристаллизатора. При этом за счет высоких скоро-

стей охлаждения и отсутствия контакта металла со стенками кристаллизатора можно получать заготовки небольших диаметров (5-18 мм) с мелкозернистой структурой и повышенными пластическими свойствами. Это дает возможность использовать их для высокопроизводительных процессов непрерывного прессования и получать длинномерные пресс-изделия из малопластичных алюминиевых сплавов для последующего волочения проволоки. На основании проведенного анализа и сделанных выводов сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** представлены результаты моделирования и аналитических исследований возможности осуществления процесса непрерывного прессования методом СПП с использованием заготовки круглого сечения, предназначенной для изготовления проволоки диаметром 0,5 мм из алюминиевого сплава 01417. Путем аналитической оценки и компьютерного моделирования было проведено изучение формоизменения металла, температурных условий и энергосиловых параметров процесса СПП. Для проведения моделирования и расчетов силовых параметров с помощью метода горячего кручения были определены реологические свойства металла непрерывнолитых заготовок из сплава 01417, полученных с помощью электромагнитного кристаллизатора. При моделировании в DEFORM-3D установлены температурно-скоростные и технологические параметры при которых процесс СПП осуществим в стабильном режиме работы. Получены данные по силам, действующим на матрицу и валки, и моментам на валках при прокатке-прессовании, что позволило выбрать оборудование для экспериментов.

Для определения реологических свойств по методике, разработанной на кафедре обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения СФУ, на имеющейся установке проводили кручение по разным режимам в широком диапазоне изменения температуры, скорости и степени деформации. Часть полученных данных представлена на рис. 1.

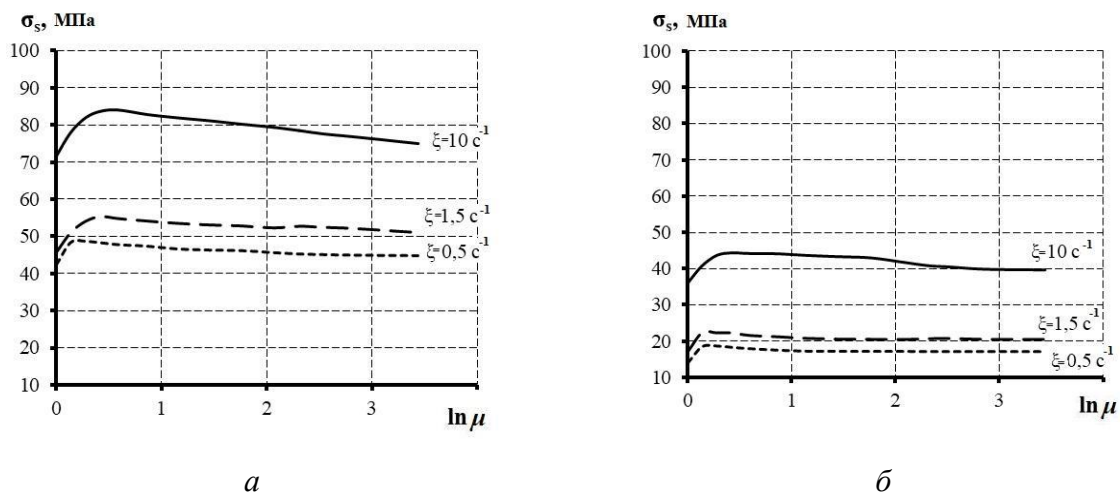


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s$  сплава 01417 от логарифмической степени деформации  $\ln \mu$  при различных скоростях деформации  $\xi$  и температурах нагрева: а – 400 °C; б – 550 °C

Анализ графиков показал, что вид кривых упрочнения для сплава 01417 имеет типовой характер, как и для большинства других алюминиевых сплавов, причем с увеличением температуры испытаний скоростное упрочнение возрастает. Полученные данные по реологическим свойствам использовали для компьютерного моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в ящичном калибре, схема которого представлена на рис. 2, с использованием установки СПП-200 (табл. 1).

При моделировании были приняты следующие условия: диаметр заготовки составлял 12 мм, а диаметр пресс-изделия 5 мм, зазор между валками был равен 2 мм; температура окружающей среды - 20° С; температура заготовки - 550 °С, а температура инструмента - 200 °С; для проведения расчетов заготовку разбивали на 10000 конечных элементов; частоту вращения валков  $\omega$  варьировали на двух уровнях (4 и 8 об/мин); степень деформации по высоте при прокатке была равна 50%; показатель трения по Зибелю составлял: на контактной поверхности валки-заготовка 0,8, на границе валки-матрица 0,5.

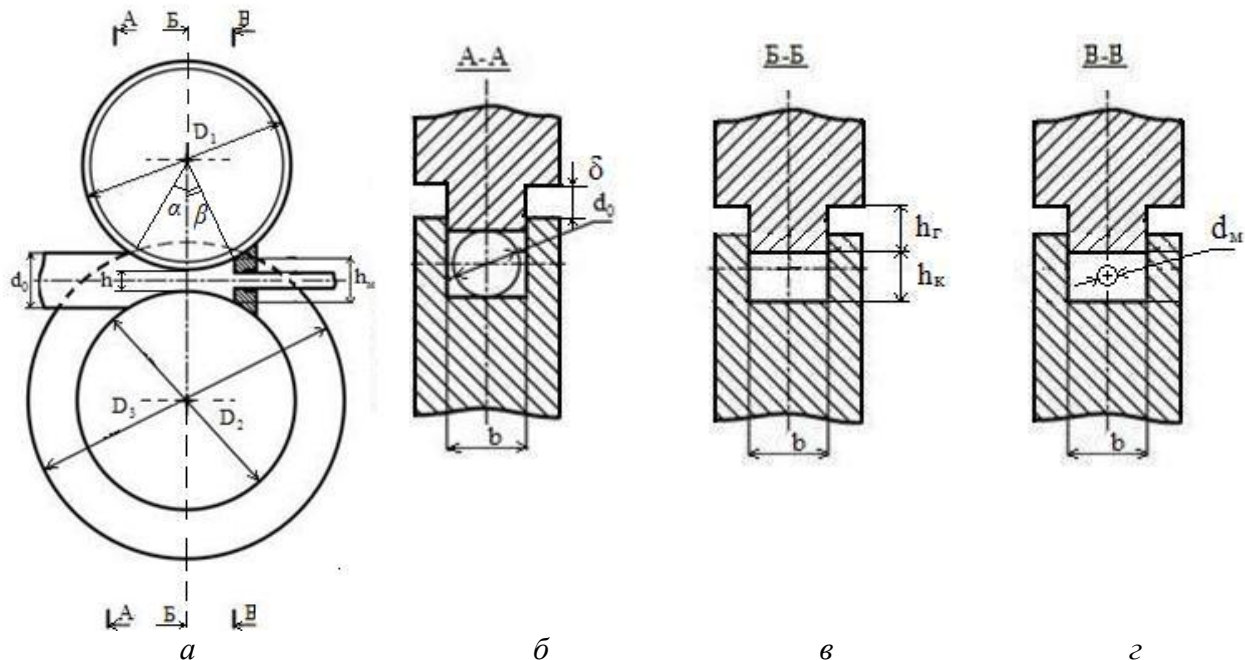


Рисунок 2 - Схема процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре: а – общий вид; б – на входе в очаг деформации, в – при прокатке, г – при выдавливании пресс-изделия из матрицы

Таблица 1 – Параметры процесса СПП для различных установок

| Параметры                                              | СПП-200    | СПП-400     |
|--------------------------------------------------------|------------|-------------|
| Катающие диаметры валков $D_1 / D_2$ , мм              | 214/167    | 385/385     |
| Частота вращения валков $\omega$ , об/мин              | 4, 8       | 4, 8        |
| Высота гребня валка с выступом $h_r$ , мм              | 7          | 8           |
| Размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b$ , мм | 7×15       | 7×15; 10×21 |
| Высота зеркала матрицы $h_m$ , мм                      | 20         | 20; 26      |
| Коэффициент вытяжки при прессовании $\mu$              | 6,5 - 15,3 | 6,5 – 27,8  |
| Температура заготовки $T_z$ , °С                       | 480; 550   | 480; 550    |
| Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup> | 0,5;1,5    | 0,5;1,5     |

Некоторые результаты моделирования, полученные с применением программного комплекса DEFORM-3D, представлены на рис. 3.

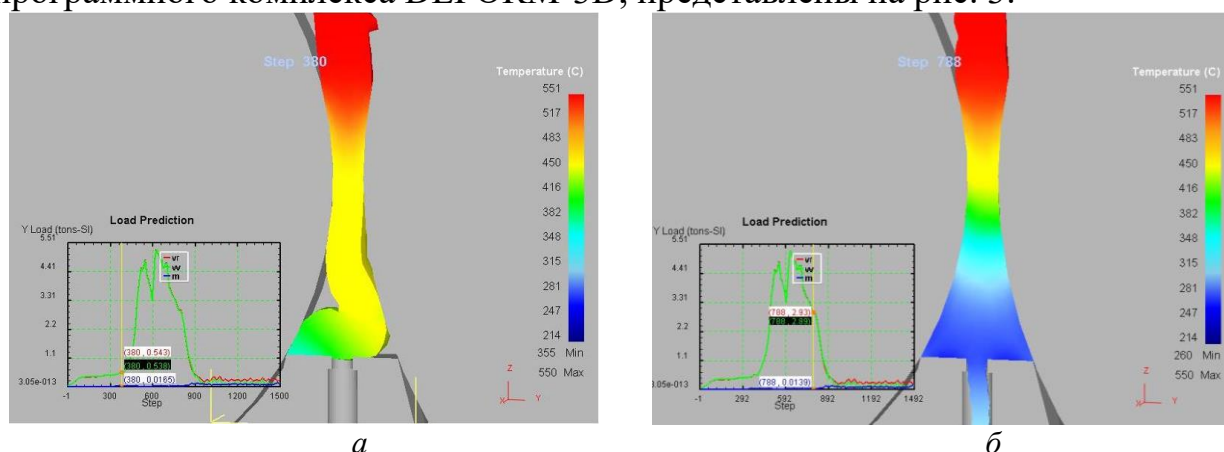


Рисунок 3 - Формоизменение заготовки и распределение температуры металла в очаге деформации СПП при  $\omega=4$  об/мин: *а* – начальная стадия; *б* – конечная стадия

Анализ результатов моделирования показал, что формоизменение металла при обработке заготовок круглого поперечного сечения диаметром 12 мм в закрытом ящичном калибре на установке СПП-200 существенно отличается от формоизменения заготовки квадратного сечения. На начальной стадии процесса при  $\omega=4$  об/мин (рис. 3, *а*) заготовка при неполном контакте захватывается валками и обжимается донной поверхностью валка с канавкой и гребнем валка с выступом. Выявлено, что при частоте вращения 4 об/мин наблюдается проскальзывание валков и постепенное снижение температуры заготовки, что может приводить к остановке процесса. Это обусловлено тем, что в зоне прокатки наблюдается уменьшение площади контакта заготовки с валками по угловым элементам калибра и снижаются силы трения, подводимые валками. При этом степень обжатия металла по высоте при прокатке (44%) не превышает рекомендованные 50%. Далее металл заготовки достигает матрицы и распрессовывается, заполняя калибр. При достижении давления в зоне прессования, достаточного для экструзии, на конечной стадии (рис. 3, *б*) металл выдавливается в виде пресс-изделия через отверстие в матрице.

Анализ распределения температуры металла показал, что на начальной стадии процесса заготовка охлаждается с 550 до 450 °С. В момент начала выдавливания пресс-изделия температура составляет 330 – 340 °С. Дальнейшая деформация приводит к снижению температуры в зоне прессования до 240 – 280 °С. Поэтому для случая реализации прокатки-прессования при частоте вращения валков 4 об/мин со степенью обжатия при прокатке меньше 50% возможна остановка процесса СПП. Повышение скорости вращения валков до 8 оборотов в минуту существенно снижает потери тепла заготовки за счет меньшего времени ее контакта с валками и матрицей. При выдавливании температура металла составляет 320 °С. Таким образом, для стабильного протекания процесса совмещенной прокатки-прессования на установке СПП-200 заготовки диаметром 12 мм из сплава 01417, на основании результатов

моделирования можно рекомендовать следующие параметры: температура заготовки - 550 °С, температура валков и матрицы - 200 °С, частота вращения валков – 4 или 8 об/мин; обжатие по высоте при прокатке не менее 50%.

Как показало моделирование при прокатке-прессовании заготовки круглого сечения перераспределение металла в калибре происходит неравномерно, поэтому калибр может быть заполнен не полностью. Это приводит к снижению контактных сил трения и, как следствие, к проскальзыванию валков относительно заготовки. В результате процесс СПП становится нестабильным и выдавливание металла через матрицу не происходит. Для того чтобы устранить данный недостаток и обеспечить стабильный процесс выдавливания металла за счет гарантированного заполнения калибра металлом при прокатке, предлагается высоту гребня валка с выступом определять, исходя из условия равенства площадей исходной заготовки круглого сечения диаметром  $d_0$  и площади осажженной заготовки прямоугольного сечения после прокатки в минимальном сечении калибра (см. рис. 2). Тогда с учетом заданного расстояния между бочками валков  $\delta$ , высоту гребня валка с выступом  $h_t$  можно найти по следующей формуле:

$$h_t = \delta + d_0 - \frac{0,25\pi d_0^2}{b}. \quad (1)$$

А условие реализуемости процесса СПП для случая деформации заготовки круглого поперечного сечения запишется в виде

$$h_{тз} \geq h_t, \quad (2)$$

где  $h_{тз}$  - экспериментальное значение высоты гребня валка, заложенное в конструкции установки совмещенной обработки.

Для расчета силовых параметров использовали данные по реологическим свойствам сплава 01417 (см. рис. 1) и учитывали повышение энергозатрат за счет захолаживания заготовки при ее задаче в валки и возможным образованием заусенца при проникновении металла между матрицей и валками.

Силу, подводимую валками, определяли по формуле

$$P_b = 0,017k_3\sigma_{ср}D(\alpha + \beta)(b + h), \quad (3)$$

где  $\sigma_{ср}$  - среднее сопротивление металла деформации с учетом захолаживания металла в валках;  $k_3$  - коэффициент, учитывающий толщину и температуру заусенца;  $D$  - средний диаметр валков,  $\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{0,5D}}$  - угол захвата металла валками;  $\Delta h$  - абсолютное обжатие при прокатке;  $\beta$  - угол отстояния зеркала матрицы от общей оси валков (см. рис. 2).

Силу, действующую на матрицу, находили по формуле

$$P_m = 1,57k_3\sigma_{ср}(1,642F_m \ln \mu + \mu r_m l_{п}), \quad (4)$$

где  $\mu$  - коэффициент вытяжки при прессовании;  $r_m = 0,5d_m$  - радиус калибрующего отверстия матрицы;  $l_{п}$  - величина рабочего пояса матрицы;  $F_m$  - площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы.

В результате расчетов по полученным формулам при одинаковых размерах калибра и значений вытяжки при прессовании установлено, что сила, действующая на валки  $P_B$ , при обработке металла на установке СПП-400 выше, чем на установке СПП-200 (табл. 2). Это объясняется тем, что катающие диаметры валков в этом случае больше, а соответственно, больше и длина контакта валков с металлом. Установлено также, что для условий обработки круглой заготовки на установках СПП прижимного усилия (300 кН) не хватит для поджима матрицы и процесс окажется неосуществим, поэтому следует выбирать температуру  $T_3=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тогда максимальная сила  $P_M$ , действующая на матрицу при выдавливании прутка диаметром 5 мм, не превысит 241 кН (см. табл. 2).

На рис. 4 приведены в сопоставлении графики расчетных силовых параметров процесса непрерывного прессования для лабораторных условий обработки на установке СПП-200 (калибр 7х15 мм) и для промышленных условий на установке СПП-400 (калибр 10х21 мм).

Таблица 2 - Значения силовых параметров для установок СПП при одинаковых размерах калибра в минимальном сечении 7х15 мм

| Параметры                 |            | $T_3 = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |      | $T_3 = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |      |
|---------------------------|------------|-------------------------------------|------|------|-------------------------------------|------|------|
|                           |            | $\mu = 6,5$                         | 12,7 | 15,3 | $\mu = 6,5$                         | 12,7 | 15,3 |
| Установка СПП-200         |            |                                     |      |      |                                     |      |      |
| $\xi = 0,5\text{ c}^{-1}$ | $P_B$ , кН | 515                                 | 543  | 572  | 279                                 | 297  | 314  |
|                           | $P_M$ , кН | 182                                 | 289  | 362  | 99                                  | 158  | 199  |
| $\xi = 1,5\text{ c}^{-1}$ | $P_B$ , кН | 599                                 | 631  | 673  | 334                                 | 355  | 382  |
|                           | $P_M$ , кН | 212                                 | 336  | 426  | 118                                 | 189  | 241  |
| Установка СПП-400         |            |                                     |      |      |                                     |      |      |
| $\xi = 0,5\text{ c}^{-1}$ | $P_B$ , кН | 732                                 | 773  | 814  | 397                                 | 422  | 447  |
|                           | $P_M$ , кН | 182                                 | 289  | 362  | 99                                  | 158  | 199  |
| $\xi = 1,5\text{ c}^{-1}$ | $P_B$ , кН | 852                                 | 898  | 958  | 476                                 | 505  | 543  |
|                           | $P_M$ , кН | 212                                 | 336  | 426  | 118                                 | 189  | 241  |

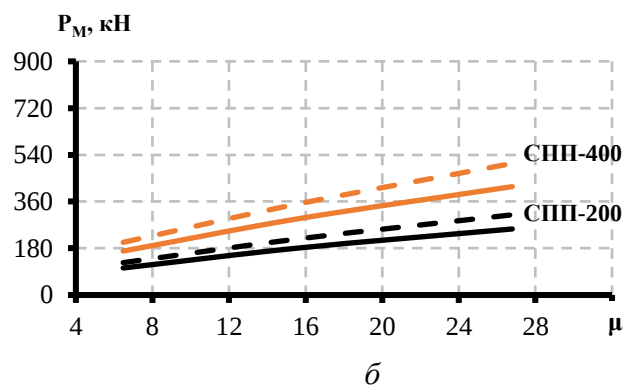
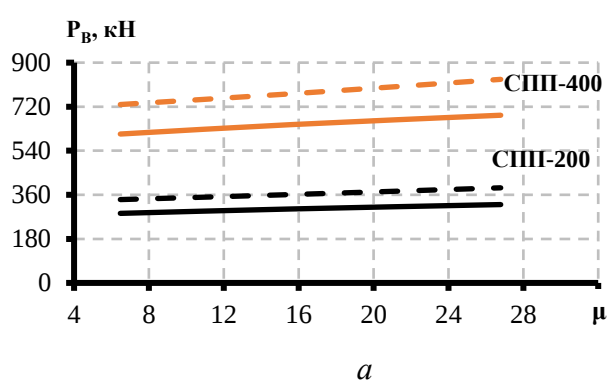


Рисунок 4 – Графики изменения силовых параметров процесса СПП при  $T_3 = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  для установок СПП-200 и СПП-400: —  $\xi = 0,5\text{ c}^{-1}$ ; .....  $\xi = 1,5\text{ c}^{-1}$

Таким образом, рекомендуемые параметры для проведения экспериментальных исследований ( $T_3=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\xi = 0,5\text{ c}^{-1}$ ) во всем диапазоне значений вытяжки обеспечивают оптимальную силовую загрузку оборудования.

Для прокатки заготовки круглого поперечного сечения предложено усовершенствовать деформирующий узел установки для непрерывной прокатки и прессования профилей (патент РФ № 119267), изготовив валки с ящичным калибром, у которого ширина канавки вала с ручьем больше диаметра заготовки на 5-15%, а гребень вала с выступом выполнять заданной высоты с учетом расстояния между валками, рассчитав ее по формуле (1).

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований процесса получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из сплава 01417 (табл. 3) с использованием методов непрерывного литья, прокатки и прессования.

Таблица 3 - Химический состав слитков из опытного сплава 01417

| Содержание компонента в сплаве, мас. % |         |         |     |     |     |     |
|----------------------------------------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|
| Al                                     | La      | Ce      | Pr  | Fe  | Si  | Sm  |
| Основа                                 | 2,3-2,5 | 4,4-4,7 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |

Для исследования влияния режимов литья и отжига на свойства и структуру прутков, полученных в ЭМК, были изготовлены опытные слитки при различных температурах литья  $T_{\text{л}} = 670, 740$  и  $780\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости литья  $v_{\text{л}} = 4,4, 10,8$  и  $14,5\text{ мм/с}$ . Свойства литых прутков приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Физико-механические свойства прутков диаметром 12 мм из сплава 01417, полученных в ЭМК при различной скорости литья

| Скорость литья, мм/с | Свойства                             |                       |                            |               |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|
|                      | Временное сопротивление разрыву, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % | Твердость HBW |
| 4,4                  | 172                                  | 91                    | 19,0                       | 43,7          |
| 10,8                 | 205                                  | 109                   | 17,2                       | 51,9          |
| 14,5                 | 210                                  | 110                   | 15,5                       | 51,9          |

Для выбора оптимальной температуры  $T_0$  и времени выдержки  $\tau$  при отжиге образцы от слитков были подвергнуты термообработке при температурах 400, 450, 500 и  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2, 4 и 8 часов.

Анализ микроструктуры прутков показал, что с понижением температуры литья внутреннее строение зерна огрубляется, более толстыми становятся ветви дендритов и увеличивается параметр дендритной ячейки. Отжиг при температуре  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызывает вырождение эвтектики, и в микроструктуре наблюдается равномерное распределение алюминидов РЗМ (рис. 5). Результаты определения размера зерна в литых прутках сплава 01417 показали, что оно неодинаково по сечению. В отдельных участках периферийной зоны наблюдается мелкозернистая структура с размером зерна 31-64 мкм, а по се-

чению имеет место крупнозернистая структура с размером зерна от 337 мкм до 1410 мкм. В связи с этим для проработки структуры необходимо применение горячей деформации.

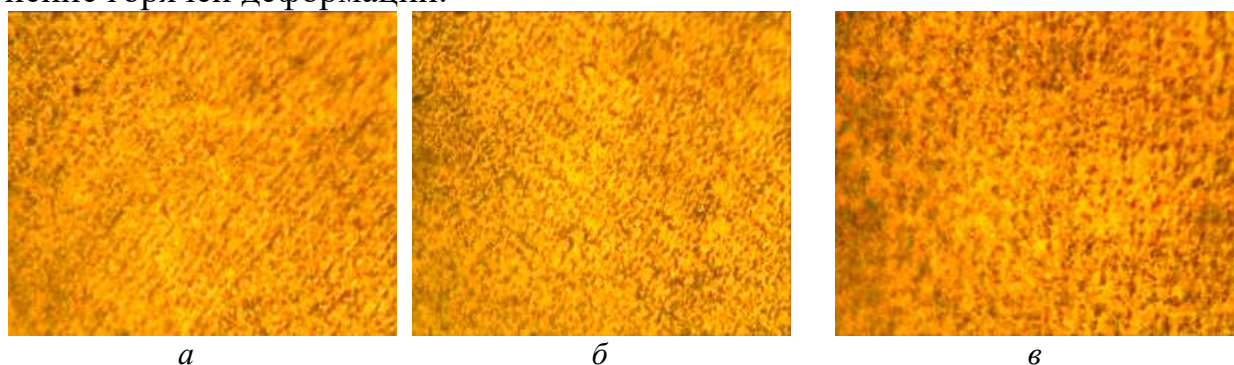


Рисунок 5 – Микроструктура отожженных при температуре  $T_o=550$  °C прутков диаметром 12 мм из сплава 01417, при скорости литья  $v_{л}=10,8$  мм/с и температурах литья:  $a - T_{л} = 670$  °C;  $б - T_{л} = 740$  °C;  $в - T_{л} = 780$  °C,  $\times 1000$

Анализ этих данных показал, что прочностные свойства литых прутков растут с увеличением скорости литья, при этом пластичность прутков снижается, но остается на достаточно высоком уровне (12,4-15,5%). При увеличении температуры отжига до 550 °C и длительности 8 час относительное удлинение повышается до 38% , а временное сопротивление разрыву снижается до 126 МПа по сравнению с литым состоянием, однако поверхность прутков из блестящей становится матово-серой.

В лабораторных условиях Московского института стали и сплавов на вальцах ВЭМ-3м из прутков диаметрами 4,0 и 9,5 мм сплава 01417, отлитых в ЭМК, сортовой прокаткой была изготовлена заготовка для волочения квадратного сечения размером 2х2 мм. Из нее, с использованием фильер различного диаметра, была получена проволока диаметрами 0,5 и 1мм, свойства которой изучали в исходном и отожженном состояниях. Результаты сравнения свойств проволоки из сплава 01417, изготовленной по двум указанным технологиям, отражены в табл. 5, из которой видно, что по совокупности механических свойств и электропроводности проволока, полученная из отлитого в ЭМК прутка диаметром 4 мм, не уступает свойствам проволоке, полученной по гранульной технологии RS/PM.

Таблица 5 – Физико-механические свойства экспериментальных образцов проволоки, полученной из сплава 01417 по разным технологиям

| Полуфабрикаты                                                           | Механические свойства |              | Электросопротивление           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------|
|                                                                         | $\sigma_b$ , МПа      | $\delta$ , % | $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м |
| Проволока диаметром 1,0 мм, полученная из прутка диаметром 9,5 мм (ЭМК) | 226                   | 1,0          | 0,03300                        |
| Проволока диаметром 1,0 мм, полученная из прутка диаметром 4,0 мм (ЭМК) | 233                   | 0,8          | 0,03100                        |
| Проволока диаметром 2,0 мм, полученная из гранул (RS/PM)                | 180-230               | 4,6-2,5      | 0,03100-0,03200                |

В работе были проведены исследования возможности получения проволоки из сплава 01417 с применением лабораторных установок Конформ и СПП-200 (табл. 6).

Для исследований на установке Конформ непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм нагревали в электрической печи до температуры 300 °С и задавали в калибр, образованный канавкой колеса и башмаком. В результате прессования была получена опытная бухта прутка диаметром 5 мм длиной 10 метров.

Таблица 6 – Технические характеристики лабораторных установок

| Параметры                      | Значения                       |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                | Лабораторная установка Конформ | Лабораторная установка СПП-200 |
| Диаметр вала (колеса), мм      | 272                            | 200                            |
| Диаметр заготовки, мм          | 12                             | 12                             |
| Мощность электродвигателя, кВт | 22                             | 19                             |
| Момент на выходном валу, кН·м  | 24,9                           | 22                             |

Далее проводили волочение на цепном стане по разработанным деформационным режимам и режимам отжига: волочение с 5 до 2 мм, отжиг промежуточный при  $T = 400\text{ °C}$  и  $\tau = 1$  час; волочение с 2,0 до 0,5 мм, окончательный отжиг при  $T = 450\text{ °C}$  и  $\tau = 1$  час. Механические свойства полуфабрикатов по переделам представлены в табл. 7. В микроструктуре прессованного прутка в продольном направлении были обнаружены микронесплошности и отдельные включения размером от 82,6 мкм до 764,9 мкм, которые при значительных степенях деформации приводили к обрывам проволоки, поэтому требовался промежуточный отжиг.

Таблица 7 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 после непрерывного прессования методом Конформ и волочения

| Диаметр полуфабриката (мм) и его состояние           | Механические свойства                |                       |                            |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                                      | Временное сопротивление разрыву, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % |
| 12,0, литое                                          | 182                                  | 102                   | 11,8                       |
| 5,0, горячепрессованное                              | 218                                  | 202                   | 31,1                       |
| 2,0, отоженное $T_0=400\text{ °C}, \tau=1\text{ ч.}$ | 131                                  | 107                   | 14,4                       |
| 0,5, холоднодеформированное                          | 203                                  | 177                   | 2,0                        |
| 0,5, отоженное $T_0=450\text{ °C}, \tau=1\text{ ч.}$ | 159                                  | 136                   | 15,0                       |

Таким образом, анализ механических свойств и структуры металла показал, что деформационные режимы непрерывного прессования на установке Конформ, волочения и отжига в целом обеспечивают получение достаточно высоких прочностных характеристик проволоки после волочения.

Экспериментальные исследования на лабораторной установке СПП-200 (см. табл. 6) осуществляли по следующей методике. В электрической камерной печи одновременно нагревали несколько непрерывнолитых заготовок диаметром 12 мм до температуры 550 °С и выдерживали 10-15 мин. Нагрев валков и матрицы проводился до температуры 200 °С. При достижении заданной температуры инструмента и заготовок валки установки СПП-200 приводили во вращение со скоростью 4 и 8 об/мин. Заготовки последовательно задавали в калибр валков, при этом металл осаживался по высоте при прокатке, распрессовывался перед матрицей и выдавливался через нее в виде прутка. Силовые показатели (табл. 8) фиксировали с помощью тензостанции фирмы ZetLab ZET 017-T8 и датчиков силы CWW-50 CWW-100.

Таблица 8 – Силовые параметры процесса СПП для прутка диаметром 5 мм

| Сила, кН | $\xi, c^{-1}$ | Расчетные данные | Экспериментальные данные | Погрешность, % |
|----------|---------------|------------------|--------------------------|----------------|
| $P_B$    | 0,5           | 314              | 348                      | 9,8            |
|          | 1,5           | 382              | 387                      | 1,3            |
| $P_M$    | 0,5           | 199              | 181                      | 9,0            |
|          | 1,5           | 241              | 218                      | 9,5            |

Далее из прессованных прутков получали проволоку диаметром 0,5 мм двумя способами: волочением на цепном стане и сортовой прокаткой с дальнейшим волочением. Результаты испытаний механических свойств полуфабрикатов, полученных непрерывным прессованием и волочением, представлены в табл. 9. Закономерности их изменения при увеличении степени деформации  $\epsilon$  (рис. 6) по первому и второму способам обработки соответствуют традиционным представлениям теории ОМД.

Таблица 9 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 после непрерывного прессования СПП и волочения

| Диаметр полуфабриката (мм) и его состояние              | Механические свойства                |                       |                            |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                                         | Временное сопротивление разрыву, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % |
| 12,0 литое                                              | 182                                  | 102                   | 11,8                       |
| 5,0, горячепрессованное                                 | 176                                  | 163                   | 20,1                       |
| 0,5, холоднодеформированное                             | 250                                  | 181                   | 1,3                        |
| 0,5, отожженное $T_0=450^{\circ}\text{C}$ , $\tau=1$ ч. | 143                                  | 124                   | 15,9                       |
| 0,5, отожженное $T_0=500^{\circ}\text{C}$ , $\tau=1$ ч. | 137                                  | 119                   | 19,1                       |

Было установлено, что отжиг проволоки при температуре 500 °С и длительности выдержки 1 час приводит к снижению временного сопротивления разрыву до значения 137 МПа и росту относительного удлинения до 19,1 %. Еще более высокую пластичность (относительное удлинение 23,6-28,8%) имеет проволока, изготовленная из заготовки, полученной с частотой враще-

ния валков 8 об/мин, что позволяет вести дальнейшую холодную деформацию металла до получения проволоки диаметром порядка 0,1-0,2 мм. Замеры электросопротивления показали, что их значения 0,02919-0,03054 Ом·мм<sup>2</sup>/м находятся в требуемых пределах.

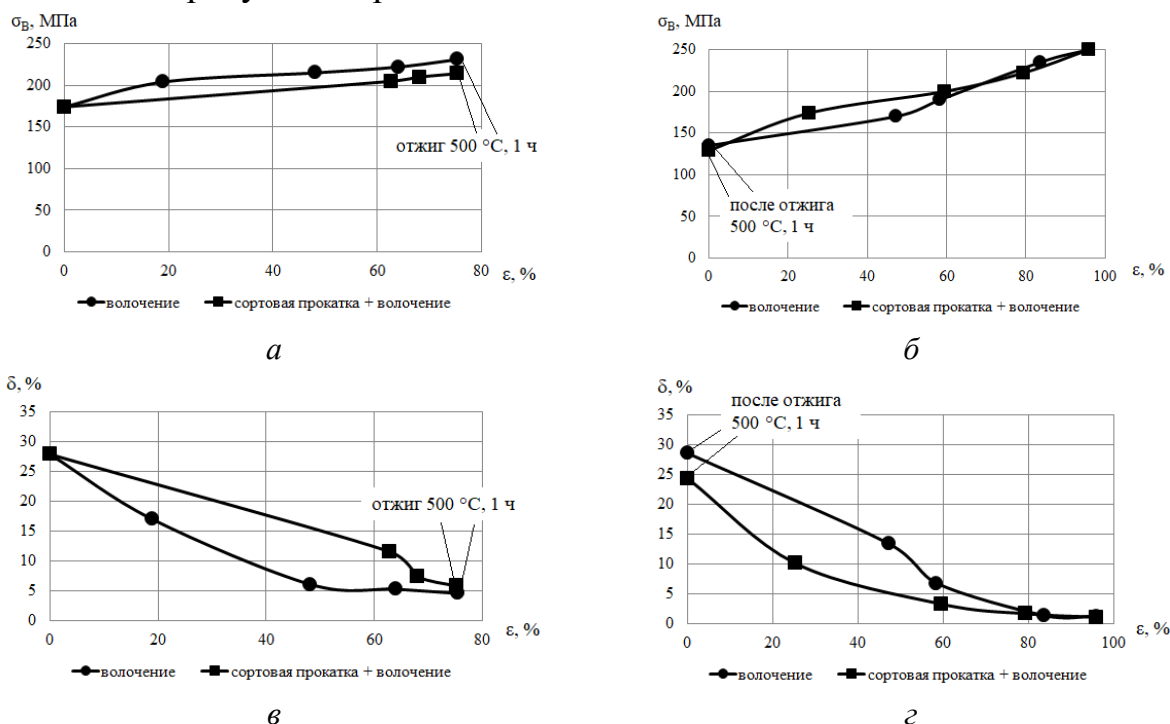


Рисунок 6 - Механические свойства полуфабрикатов из сплава 01417 до отжига (а, в) и после отжига (б, г) при частоте вращения валков 4 об/мин

Металлографические исследования прессованных прутков (рис. 7) показали, что они имеют равномерную мелкозернистую структуру (рис. 7, а), а величина включений незначительна и не превышает 7 мкм. После горячей деформации были устранены последствия дендритной ликвации, и вместо дендритных ячеек имело место равномерное и дисперсное распределение алюминидов РЗМ по сечению прутков. Структура проволоки диаметром 0,5 мм в различных состояниях показана на рис. 7, б, в. Анализ результатов исследований позволил сделать вывод о том, что проволока, изготовленная из прутка, полученного на установке СПП с частотой вращения валков 4 об/мин, после отжига при температуре 500 °C и длительности 1 час обладает требуемым комплексом механических и электрических свойств.



а



б



в

Рисунок 7 – Микроструктура прутка диаметром 5 мм (а) и проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм в деформированном (б) и отожженном (в) состояниях, х1000

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований свойств и структуры деформированных полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях с применением методов Конформ и СПП. Для испытаний применялось промышленное оборудование (табл. 10) с использованием установки Конформ TLJ 300 (табл. 10) и волочильного агрегата HESF 5/3 предприятия СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель), а также установки СПП-400 ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) и волочильного стана ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск).

Для проведения опытно-промышленных испытаний на установке Конформ использовали полученную в ЭМК заготовку из сплава 01417 диаметром 12 мм в виде бухты с габаритами 300x1000x1000 мм общим весом 300 кг.

Таблица 10 – Характеристики установок Конформ TLJ 300 и СПП-400

| Параметр                               | Значение        |         |
|----------------------------------------|-----------------|---------|
|                                        | Конформ TLJ 300 | СПП-400 |
| Номинальный диаметр валка (колеса), мм | 300             | 400     |
| Номинальный вращающий момент, кНм      | 63              | 35      |
| Частота вращения, об/мин               | 2-12,5          | 0-30    |
| Мощность основного двигателя, кВт      | 90              | 18,5    |
| Диаметр заготовки, мм                  | 12,0÷13,0 ± 0,2 | 12-18   |

Для исследования возможности получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 с требуемым комплексом свойств использовали технологию, которая включала следующие этапы: изготовление непрерывнолитого прутка в ЭМК диаметром 12 мм; прессование на установке Конформ TLJ 300 двух прутков диаметром 2,65 мм; волочение заготовки до диаметра проволоки 0,5 мм на непрерывном агрегате HESF 5/3 с отжигом в проходной печи при температуре 400 °С. Коэффициент вытяжки при прессовании непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм двух прутков диаметром 2,65 мм составил 10,3, при волочении проволоки до диаметра 0,5 мм степень деформации достигала 96,4 %. Результаты замеров (табл. 11) показали, что проволока диаметром 0,5 мм из сплава 01417 не соответствует требованиям ТУ-1-809-1038-2018 по удельному электрическому сопротивлению.

Таблица 11 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, полученной с применением установки Конформ TLJ 300

| Состояние и режим отжиг                    | Временное сопротивление разрыву, МПа | Относительное удлинение, % | Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Нагартованное                              | 271                                  | 1,0                        | 0,03392                                                     |
| Отожженное, T <sub>о</sub> =400°C, τ =2 ч. | 259                                  | 2,1                        | 0,03229                                                     |
| Отожженное, T <sub>о</sub> =450°C, τ =2 ч. | 221                                  | 3,2                        | 0,03202                                                     |
| Отожженное, T <sub>о</sub> =500°C, τ =2 ч. | 195                                  | 10,3                       | 0,03193                                                     |
| Отожженное, T <sub>о</sub> =500°C, τ =4 ч. | 170                                  | 17,4                       | 0,03178                                                     |
| ТУ 1-809-1038-2018                         | 142,5                                | 8,0                        | 0,03200                                                     |

Поэтому был проведен отжиг при температуре  $T=400, 450$  и  $500^{\circ}\text{C}$  и длительности  $\tau = 1$  и  $2$  часа. Эти исследования показали, что отжиг в печи при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  проволоки, намотанной на катушки, дает возможность получить требуемый комплекс свойств (см. табл. 11).

С целью получения опытных партий проволоки из сплава 01417 диаметром  $0,5$  мм с требуемым комплексом физико-механических свойств на предприятиях ООО «Завод современных материалов» и ООО «Альянс 2008» были проведены опытно-промышленные исследования с применением метода СПП. На основании проведенного ранее расчета силовых затрат и реализуемости процесса, а также рекомендаций по режимам обработки и отжига, были выбраны диаметр непрерывнолитой заготовки, температурные и технологические параметры для деформации металла. Для реализации экспериментов на установке СПП-400 с использованием рассчитанных по техническому решению конструктивных параметров деформирующего узла, был разработан и изготовлен валковый и прессовый инструмент. На установке СПП-400 обрабатывалась бухта непрерывнолитой заготовки, изготовленной с помощью ЭМК, диаметром  $18$  мм из сплава 01417 весом  $100$  кг. Полученный прутки диаметром  $9$  мм подвергали волочению до диаметра  $0,5$  мм с промежуточными отжигами на промышленном волочильном стане барабанного типа ООО «Альянс 2008». Было установлено, что прессование заготовки, нагретой до  $550^{\circ}\text{C}$ , при температуре валков и матрицы  $200^{\circ}\text{C}$  и частоте вращения валков  $8$  об/мин приводит к образованию температурных трещин, поэтому частоту вращения валков снизили до  $2$  об/мин. Результаты испытаний механических свойств проволоки в различном состоянии представлены в табл. 12. Предложенные режимы обработки позволили получить промышленные партии проволоки диаметром  $0,5$  мм с требуемым уровнем свойств.

Таблица 12 – Физико-механические свойства проволоки диаметром  $0,5$  мм из сплава 01417, полученной с применением установки СПП-400

| Состояние<br>и режимы отжига                             | Механические свойства                   |                               | Удельное электро-<br>сопротивление,<br>Ом мм <sup>2</sup> /м |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                                          | Временное сопротивление<br>разрыву, МПа | Относительное<br>удлинение, % |                                                              |
| Нагартованное                                            | 257                                     | 1,3                           | 0,03151                                                      |
|                                                          | 260                                     | 1,2                           | 0,03157                                                      |
| Отожженное, $T=400^{\circ}\text{C}$ ,<br>$\tau = 4$ часа | 160                                     | 14,4                          | 0,03134                                                      |
|                                                          | 159                                     | 14,2                          | 0,03137                                                      |
| Отожженное, $T=450^{\circ}\text{C}$ ,<br>$\tau = 4$ часа | 160                                     | 15,6                          | 0,03138                                                      |
|                                                          | 157                                     | 15,2                          | 0,03143                                                      |
| Отожженное, $T=500^{\circ}\text{C}$ ,<br>$\tau = 4$ часа | 162                                     | 16,5                          | 0,03139                                                      |
|                                                          | 157                                     | 16,8                          | 0,03132                                                      |
| ТУ 1-809-1038-2018                                       | 142,5                                   | 8,0                           | 0,03200                                                      |

Для независимых испытаний свойств в соответствии с ГОСТ 10446 проведены замеры временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и удельного электросопротивления при комнатной температуре

для полученной проволоки в АО «ОКБ Кабельной промышленности» (г. Москва). Результаты испытаний подтвердили вывод о соответствии физико-механических свойств проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в отожженном состоянии требованиям ТУ 1-809-1038-2018.

Исследование термостойкости проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 проводили в испытательной лаборатории механических и климатических испытаний образцов, материалов и компонентов ООО «ИК ЦТО» (г. Новосибирск) при различных температурах 180, 240 и 310 °С и времени выдержки 1 и 400 часов. В результате испытаний по методике ГОСТ Р МЭК 62004 установлено, что представленная на экспертизу проволока из сплава 01417, произведенная по указанной выше технологии, соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018 и ТУ 181131-002-86474575-09 и может применяться для изготовления токопроводящих жил проводов, предназначенных для внутриблочного фиксированного монтажа специальной аппаратуры.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Проведен анализ тенденций развития, оборудования и технологий производства длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al-P3M для производства кабельной продукции, предназначенной для изготовления проводников, работающих в условиях повышенных температур, на основании чего сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2. Изучены реологические свойства непрерывнолитых заготовок из сплава 01417 малого диаметра 12 мм, изготовленных по различным режимам литья в электромагнитном кристаллизаторе, и получены графические зависимости сопротивления деформации металла от скорости и степени деформации в заданных условиях эксперимента диапазоне их изменения.

3. Создана компьютерная 3D модель процесса совмещенной прокатки-прессования для деформации заготовки круглого поперечного сечения и с ее помощью изучены особенности формоизменения и распределения температур в очаге деформации при различной частоте вращения валков с использованием данных по реологическим характеристикам сплава 01417.

4. Предложена методика экспериментально-аналитической оценки реализуемости процесса СПП и расчета силовых характеристик при деформации заготовки круглого поперечного сечения, с применением которых определены конструктивные параметры валкового и прессового инструмента, а также технологические режимы непрерывного прессования для проведения экспериментальных исследований.

5. На основании результатов моделирования и оценки параметров совмещенной прокатки-прессования для получения из непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм деформированных полуфабрикатов диаметром 5 мм из сплава 01417 методом совмещенной прокатки-прессования с вытяжкой  $\mu =$

15,3 рекомендован следующий режим обработки: температура нагрева заготовки 550 °С; температура нагрева инструмента 200 °С; скорость вращения валков 2-4 об/мин.

6. Путем экспериментальных исследований установлено, что применение операций сортовой прокатки и волочения непрерывнолитых заготовок круглого поперечного сечения из сплава 01417, изготовленных с помощью ЭМК, позволяет получать проволоку диаметром 0,5 мм с высоким уровнем физико-механических свойств, сопоставимым с уровнем свойств проволоки, полученной по гранульной технологии.

7. С использованием разработанных технологических режимов непрерывного литья в ЭМК, непрерывного прессования методами Конформ и СПП, волочения, промежуточных и окончательных отжигов проведены экспериментальные исследования по получению опытных партий проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в лабораторных условиях.

8. На всех этапах этих экспериментальных исследований изучена структура металла и установлены закономерности изменения временного сопротивления разрыву, предела текучести, относительного удлинения и удельного электросопротивления длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде горячепрессованных прутков и проволоки в холоднодеформированном и отожженном состояниях в зависимости от режимов обработки.

9. С использованием промышленной установки непрерывного прессования Конформ TLJ 300 из длинномерного слитка диаметром 12 мм, полученного с помощью ЭМК, по производственным режимам отпрессованы в два канала заготовки для волочения диаметром 2,65 мм, из которых дальнейшим волочением изготовили опытную партию проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, свойства которой при разработанных параметрах окончательного отжига (температура 500 °С, длительность 2 и 4 часа) соответствовали техническим условиям ТУ 1-809-1038-2018.

10. С использованием технологической схемы ЭМК-СПП-волочение на установке СПП-400 в промышленных условиях из непрерывнолитой заготовки диаметром 18 мм, полученной с помощью ЭМК, отпрессован прутком диаметром 9 мм, из которого изготовили проволоку диаметром 0,5 мм из сплава 01417, которая также соответствовала указанным выше техническим условиям, при этом были разработаны новые деформационные режимы непрерывного прессования и маршруты волочения, а также режимы промежуточного и окончательного отжигов.

11. Результаты исследований по получению проволоки авиационного назначения из сплава 01417 подтверждены актами промышленной апробации на предприятиях СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель) и ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), протоколами испытаний механических, электрических свойств и термостойкости, выполненных АО «ОКБ Кабельной промышленности» (г. Москва) и ООО «ИК ЦТО» (г. Новосибирск), а также

заключением АО «ОКБ Кабельной промышленности» об успешном использовании данной проволоки для изготовления токопроводящих жил монтажных проводов, применяемых в аппаратуре специального назначения.

12. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Металлургия и аспирантов по специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Мотков, М.М.** Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al – РЗМ с применением совмещенной обработки / С.Б. Сидельников, Д.С. Ворошилов, М.В. Первухин, **М.М. Мотков** // Цветные металлы - 2019 - №9 - С. 63-68, (**издание, рекомендуемое ВАК**).

2. **Мотков, М.М.** Технология изготовления проволоки из сплава 01417 с заданным уровнем механических свойств/ Ю.В. Горохов, В.Н. Тимофеев, М.В. Первухин, В.И. Белокопытов, **М.М. Мотков** [и др.] // Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. 2019. №12– С. 842-851, (**издание, рекомендуемое ВАК**).

3. **Мотков, М.М.** Влияние режима термической обработки на структуру и свойства проводникового алюминиевого сплава Al-7%РЗМ, полученного литьем в электромагнитном кристаллизаторе / Н.О. Короткова, Н.А. Белов, В.Н. Тимофеев, **М.М. Мотков**, С.О. Черкасов // Физика металлов и металловедение. – 2020. -№2 – С.200-206, (**издание, рекомендуемое ВАК**).

4. **Motkov, M.M.** Comparative analysis of properties of wires from alloys of Al-REM system, obtained using the methods of continuous extrusion / S.B. Sidelnikov, V.N. Timofeev, Yu.V. Gorokhov, D.S. Voroshilov, R.I. Galiev, **M.M. Motkov** [etc.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019, Vol. 8, Iss. 2S2, pp 300-304, (**база цитирования Scopus**).

5. **Motkov, M.M.** Mathematical modeling of MHD processes in the casting of aluminum alloys in electromagnetic mold / M. V. Pervukhin, V. N. Timofeev, G. P. Usynina, N. V. Sergeev, **M. M. Motkov**, I. S. Gudkov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019– №643. – С.1-7, (**база цитирования Scopus**)

6. **Motkov, M.M.** Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417 / S. B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, **M.M. Motkov**, M.V. Voroshilova, V.V. Bepalov // Materials Science Forum. 2020, Vol. 992, pp 498-503, (**база цитирования Scopus**).

7. **Motkov, M.M.** Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing / S.B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, **M.M. Motkov**, V.N. Timofeev [etc.] // The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology. 2021, 114, pp 2633–2649, (**база цитирования Scopus**).

**8. Motkov, M.M.** Experimental and Analytical Assessment of the Power Parameters of the Combined Rolling-Extruding Process Using a Round Billet from Alloy 01417 Obtained Using an Electromagnetic Mold / S.B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, **M. M. Motkov**, V.M. Bessalov, M. V. Voroshilova // Key Engineering Materials. 2021, Vol. 887, pp 300-305, (**база цитирования Scopus**).

**9. Мотков, М.М.** Research of mechanical properties of deformed semi-finished products from alloys system Al-REM obtained with using combined methods of metal forming / N.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, R.I. Galiev, **M.M. Motkov** // A collective monograph XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering». Series : Monographie. Czestochowa, 2014. № 40. S. 236-239.

**10. Мотков, М.М.** Исследование технологии получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-PЗМ с применением методов совмещенной обработки/ С.Б. Сидельников, В.Н. Тимофеев, Ю.В. Горохов, М.В. Первухин, Д.С. Ворошилов, **М.М. Мотков** // Сборник докладов 11-го международного конгресса "Цветные металлы и минералы", 2019, С. 489-492.

**11. Мотков, М.М.** Development of technology for obtaining wires of electrotechnical purpose from alloys of the Al-REM system received by using methods of combined processing / D.S. Voroshilov, S.B. Sidelnikov, V.N. Timofeev, **M.M. Motkov** [etc.] // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: proceedings of the 4th Youth Scientific and Practical Conference. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publishing House, 2019. 128 p., pp 29-31.

**12.** Пат. 119267 Российская Федерация, МПК 7 В21С 23/00, 25/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, В. И. Кирко, Е. С. Лопатина, И. Ю. Губанов, Р. Е. Соколов, В. А. Падалка, В. Н. Баранов, И. Ю. Маслов, А. Л. Киселев, В. М. Беспалов, **М. М. Мотков** [и др.]; опубл. 20.08.2012, Бюл. №23.

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2021. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тир 100 экз. Заказ \_\_\_\_

Отпечатано полиграфическим центром

Библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49

E-mail: print\_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>