

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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 ЗАДАННЫМИ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович

Красноярск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ	11
1.1. Обоснование технико-экономической целесообразности получения проволоки из алюминиевых сплавов для нужд авиакосмической промышленности.....	11
1.2. Выбор сплава и описание его свойств	13
1.3. Анализ существующих технологий получения литых заготовок из сплава 01417, предназначенных для изготовления проволоки электротехнического назначения	16
1.4. Методы и оборудование для непрерывного прессования.....	21
1.5. Выбор программного комплекса для моделирования процессов непрерывного прессования.....	26
1.6. Выводы по главе.....	28
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ МЕТОДОМ СПП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ	29
2.1. Определение реологических свойств непрерывнолитых заготовок и моделирование процесса получения прутков из алюминиевого сплава 01417 методом совмещенной прокатки-прессования с применением комплекса DEFORM-3D	29
2.2. Оценка реализуемости процесса СПП при использовании заготовки круглого сечения	35
2.3. Экспериментально-аналитическая оценка силовых параметров процесса СПП.....	39
2.4. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла.....	45
2.5. Выводы по главе.....	48
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ СПЛАВА 01417 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ И ВОЛОЧЕНИЯ 49	
3.1. Изучение влияния скорости и температуры литья на структуру и свойства заготовок из сплава 01417, полученных методом электромагнитной кристаллизации	49
3.2. Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных из непрерывнолитой заготовки сортовой прокаткой и волочением	56
3.3. Исследование структуры и механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением установки Конформ и волочения	64
3.4. Исследование структуры и механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением установки совмещенной прокатки-прессования и волочения	72
3.5. Выводы по главе.....	82

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА 01417 И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	83
4.1. Материалы и оборудование для проведения опытно-промышленных исследований	83
4.2. Результаты исследований структуры и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях с применением установки Конформ TLJ 300.....	86
4.3. Результаты исследований свойств и структуры деформированных полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях с применением установки СПП-400	91
4.4. Выводы по главе.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	101
Приложение А	112
Приложение Б	113
Приложение В	114
Приложение Г	119
Приложение Д	126

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевая промышленность по объёмам производства занимает ведущее место среди отраслей цветной металлургии [1], а производство алюминия с каждым годом непрерывно увеличивается. Так, за последние 10 лет мировое потребление алюминия увеличилось на 25 - 30 %, а в 2020 году - еще на 7 - 8 % в сравнении с периодом 2017-2018 г., в связи с ростом потребления алюминия в крупнейших экономиках мира: Китае, Германии и США. Но при этом, дефицит алюминия на рынке по-прежнему сохраняется, и равняется 1,7 млн. тонн в 2018 году и 2,3 млн. тонн в 2019 году. Рост потребления алюминия [2] поддержан растущей экономикой Китайской народной республики, участие которой в общем мировом объеме потребления составляет более 50 %. Согласно прогнозам, производство алюминия и потребность потребителей в нем будет расти. (рисунок В1).



Рисунок В1 – Баланс производства и потребления алюминия в мире

На следующие 5 лет ожидается увеличение мирового потребления алюминия на 4–5 % ежегодно, что повлечет за собой увеличение дефицита первичного алюминия. Наибольшее количество алюминиевой продукции востребовано для нужд транспортной и строительной отраслей промышленности: в 2019 году эти значения составили 28 % и 27 %, а для энергетики - 14%.

Научно-технический прогресс, обусловленный так же необходимой заменой авиакосмической техники, летательных аппаратов и спутниковых систем Советского производства, сформировал в России необходимость разработки современных материалов и новых продуктов, к которым можно отнести и проволоку из алюминиевых сплавов специального назначения. Согласно оценкам экспертов, а также предприятий кабельной промышленности, спрос на проволоку из алюминиевых сплавов различного назначения на сегодняшний день составляет около 8 тыс. тонн в год. Темпы роста потребления алюминия, а также масштабное развитие предприя-

тий ВПК в нашей стране, в ближайшей перспективе увеличат потребность в алюминиевой проволоке до 10-12 тыс. тонн в год.

Алюминиевая проволока применяется для изготовления продукции электротехнического назначения следующих видов [3, 4]:

- электротранспортные тросы и кабели;
- электропроводники для авиа- и космического транспорта;
- промышленные силовые кабели;
- наземные воздушные кабели токопроводящих сетей.

Благодаря уникальным технико-эксплуатационным характеристикам, проволока из алюминиевых сплавов широко применяется в электротехнической промышленности. Важно отметить, что по массе алюминий в 3 раза легче массы меди, что существенно облегчает конструкции линий электропередач.

В России проволока для нужд электротехнической промышленности производится из алюминия марок А5Е, А7Е и сплава АВЕ. Сравнительная удельная прочность данной проволоки имеет низкие значения. При принятом оптимальном расстоянии между опорами линий электропередач велика вероятность разрыва проводов под собственным весом. Причиной этого является невозможность линии выдерживать на себе вес изоляционного покрытия. Так как российские линии электропередач выполнены неизолированными проводами, это существенно повышает риск эксплуатации, в том числе и на линиях среднего и низкого напряжения, а именно велика вероятность обрыва, климатических воздействий на линии электропередач и др.

Таким образом, модернизация отечественных предприятий, применение новых технологий литья и обработки алюминиевых сплавов являются основными направлениями развития производства алюминиевой проволоки.

Необходимо отметить возрастающую потребность в электротехнической промышленности в проволоке, применяющейся в бортовых проводах современных летательных аппаратов. Для этих нужд возможно использование жаропрочных сплавов алюминия с редкоземельными металлами (РЗМ) [4,5], применяющихся для изготовления проволоки, эксплуатирующейся при температуре + 250 °С.

В середине прошлого столетия в нашей стране началось развитие алюминиевой промышленности. Создание новых алюминиевых заводов позволило увеличить производство алюминия и сплавов на его основе [6-8]. Одновременно на базе Всесоюзного института легких сплавов (г. Москва) проводились работы по освоению гранульной технологии получения проволоки, в том числе и из сплава 01417. В работах В.И. Добаткина с соавторами [6, 7] показано, что процесс гранулирования является единственным способом достижения высоких скоростей охлаждения (до 10^6 К/с) при кристаллизации сплавов на основе алюминия. При применении ме-

тодов быстрой и сверхбыстрой кристаллизации при получении многокомпонентных сплавов происходит резкое диспергирование структурных составляющих, что приводит к образованию пересыщенных твердых растворов. Это позволило легировать сплавы металлами, ранее не применяющимися в деформируемых сплавах, при этом, важно отметить, с образованием метастабильных фаз. Деформационной обработке гранулированных сплавов посвящены работы [9, 10], где установлено, что образцы из алюминиевых сплавов, изготовленные по гранульной технологии, обладают уникальными механическими свойствами. Существующие в мире способы быстрой кристаллизации сводятся к диспергированию расплава, его охлаждению и получению гранул размером от 5 до 0,5 мм. Недостатком этих способов является большое количество технологических переделов. Причиной того, что данный способ не нашел широкого применения в промышленности является большое количество технологических операций по сушке и очистке гранул, их компактированию в заготовки для дальнейшей пластической деформации. Большое количество технологических операций, в сочетании с низкой производительностью оборудования, приводит к малому выходу годной продукции. Решением указанных проблем может служить переход к непрерывному литью слитков малого диаметра в электромагнитном поле, оказывающим комплексное воздействие на расплав при скоростях охлаждения $10^3 - 10^4$ °C/с, что позволяет сохранить уровень свойств, достигаемых гранулированием и избавиться от недостатков, присущих гранульным технологиям.

Благодаря исследованиям таких известных ученых, как И.Л. Перлин, А.И. Целиков, М.З. Ерманок, В.П. Северденко, Г.С. Гун, М.С. Гильденгорн, В.Л. Бережной, А.В. Зиновьев, В.Г. Шеркунов, А.И. Рудской, Л. Х. Райтбарг, Р.З. Валиев, В.Н. Щерба, Г.И. Рааб, Ю.А. Горбунов, Ю.Н. Логинов и др. [11-21] разработаны научные основы процессов и методов обработки металлов давлением алюминиевых сплавов. По направлению прокатки и прессования, упомянутыми исследователями внесен существенный вклад, послуживший необходимой основой для развития теории и технологий интенсивной пластической деформации. Нельзя также не отметить научные труды ученых Красноярской научной школы В.З. Жилкина, Ф.С. Гилевича, В.Н. Корнилова, Н.Н. Довженко, Ю.В. Горохова, С.Б. Сидельникова, С.В. Беяева, Н.Н. Загирова, Р.И. Галиева, А.А. Катаревой, Е.С. Лопатиной, В.М. Беспалова, Р.Е. Соколова, Д.С. Ворошилова и др., посвященные изучению непрерывных методов прессования алюминиевых сплавов [22-26]. Эти методы в совокупности с применением непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор позволяют существенно снизить трудоемкость и энергозатраты производства длинномерных деформированных полуфабрикатов небольшого поперечного сечения из сплавов цветных металлов.

Нельзя не отметить работы зарубежных ученых, посвященные тематике исследований, которые ведутся в США, Японии, Китае и других странах [27-34].

Однако вопросы получения проволоки диаметром до 0,5 мм из высоколегированных сплавов системы Al-P3M до сих пор не решены, так как ресурс пластических и прочностных свойств таких сплавов ограничен, что обуславливает необходимость проведения дополнительных комплексных исследований по данной тематике. Что подтверждает необходимость разработки новых технологий обработки металлов давлением с применением современных методов литья в электромагнитный кристаллизатор и методов непрерывного прессования для получения тонкой проволоки из сплава 01417 с содержанием редкоземельных металлов до 9 %.

Актуальность исследований подтверждена 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-P3M 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), номер проекта FSRZ-2020-0013.

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 Metallургия и аспирантов по специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением.

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 круглого сечения в закрытом ящичном калибре для исследуемого сплава.

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.

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.).

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

Настоящая работа является продолжением комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ). Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты исследований представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, и выполнены непосредственно автором или в соавторстве.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору С.В. Беляеву за помощь при работе над диссертацией.

Работа выполнена при научной консультации канд. техн. наук, доцента Д.С. Ворошилова.

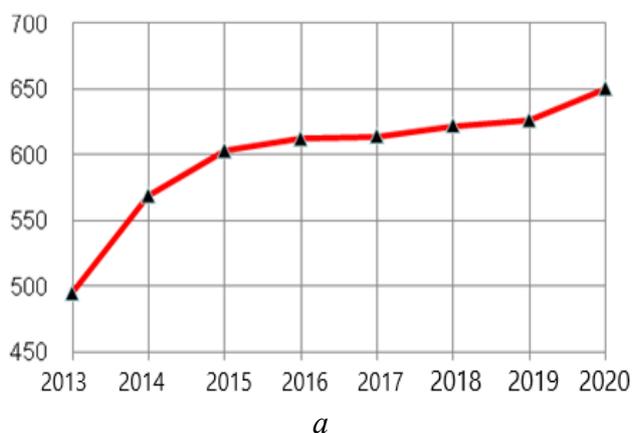
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

1.1. Обоснование технико-экономической целесообразности получения проволоки из алюминиевых сплавов для нужд авиакосмической промышленности

Бортовые электрические провода, являясь «нервной системой» современных летательных аппаратов, занимают все большую долю массы этих объектов, которая может уже достигать до 25% [35]. Поэтому задача снижения массы бортовых проводов является весьма актуальной. Основную долю массы проводов, представляющих сложную конструкцию из изоляционных материалов, экранирующих оплеток, промежуточных слоев, повышающих паяемость и электропроводимость, составляют, металлические проводниковые материалы. Поэтому наиболее эффективным путем снижения массы бортовых проводов является улучшение физико-механических характеристик токопроводящих материалов, при этом целесообразно проводники из медных сплавов заменять на алюминиевые, имеющие в три раза меньшую плотность и вес.

Ключевым фактором, определяющим выбор алюминиевых сплавов в данном сегменте рынка, будет являться низкая масса проводников при аналогичном и более высоком качестве, удовлетворяющим техническим требованиям авиакосмической промышленности. При этом детальная оценка рынка не представляется возможной, т.к. упомянутая проволока для бортовых проводов может применяться и в продуктах двойного назначения, поэтому она не отражена в статистических отчетах. Прогноз потребности в космических и летательных аппаратах представлен на рисунке 1.1 [35].

Количество, шт



Количество, шт

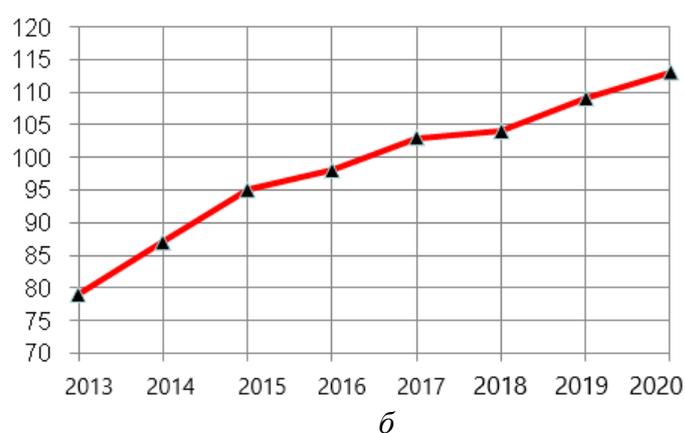


Рисунок 1.1 – Рост по годам количества авиакосмической техники, шт.: *а* - производство самолетов и вертолетов; *б* - производство космических аппаратов

В среднем на производство и запуск одного крупного самолета (Аэробус) требуется 530 км проволоки [36], что обуславливает достаточно большие объемы ее потребления. В настоящее время Российская кабельная отрасль представлена несколькими десятками предприятий [35] - производителями кабельно-проводниковой продукции. Основные производители в России объединены в ассоциацию «Электрокабель», на долю которых приходится около 90 % всей выпускаемой в России продукции в пересчете на объемы потребления меди. Можно выделить несколько основных крупных потребителей кабельной продукции, заинтересованных в повышении физико-механических характеристик токопроводящих материалов путем замещения медных сплавов на алюминиевые [35]:

- крупные предприятия аэрокосмической отрасли (ПО "ПОЛЕТ - филиал "ГКНПЦ имени М.В.Хруничева г. Омск, ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут»» и др.);
- кабельные заводы (Особое конструкторское бюро Кабельной промышленности, завод «Чувашкабель», «НПЦ Авиаспецсплав», ООО «Камский кабель» и др.).

ООО «Камский кабель» ежегодно производит для авиакосмического комплекса более 60 000 километров проводов и кабелей. Только бортовых проводов, которые используются в системах управления и жизнеобеспечения летательных аппаратов (аэробусов, вертолетов, авиадвигателей), изготавливается более 30 видов. В авиационном производстве всегда применялись особые требования к качеству и надежности всех комплектующих, поскольку от этого зависит безопасность полета. Самые жесткие требования предъявляются и к бортовым авиационным проводам, которые проходят трехступенчатый контроль качества, в том числе с участием заказчика, что обуславливает необходимость применять материалы высокого качества. Для обеспечения гибкости изделия применяют жилы, скрученные из множества проволок, в том числе и малых диаметров, в несколько раз тоньше, чем человеческий волос.

ОАО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности» г. Москва осуществляет деятельность по разработке и выпуску кабелей и проводов. Уже более 70 лет предприятие обеспечивает отечественную космонавтику и авиацию качественными проводами и кабелями. Отечественная номенклатура бортовых авиационных проводов изготавливается предприятием в номенклатуре сечений от 0,25 мм² до 90 мм² и используется при температурах от -65°С до +440°С, что требуется заказчикам для эффективной эксплуатации изделий

К крупным зарубежным покупателям кабельной продукции относятся такие известные авиастроительные компании и концерны как Boeing, Airbus, Bombardier, Embraer, ATR, Saab AB, у которых в ближайших планах - внедрение БКС с алюминиевыми проводниками [36]. Поскольку данное решение позволит не только снизить массу авиационной техники, а также сократить затраты на производство, можно предположить, что объем рынка разрабатываемой

продукции будет увеличиваться как за счет технического перевооружения старых предприятий, так и создания новых для расширения номенклатуры изделий из алюминиевых сплавов.

В связи с этим для обеспечения предприятий авиационной и ракетно-космической промышленности приоритетной задачей является изготовление кабелей и проводов, соответствующих мировым стандартам и отличающихся улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками.

1.2. Выбор сплава и описание его свойств

Основным сплавом электротехнического назначения, применяемым в изготовлении жил электропроводников для нужд авиационной и космической промышленности, является сплав 01417 с содержанием РЗМ 7,0 – 9,0% [37]. Этот жаропрочный сплав был разработан Всесоюзным институтом легких сплавов (ВИЛС). Химический состав сплава, по ТУ 1-809-1038-2018, представлен в таблице 1.1.

По ТУ 1-809-1038-2018 требуемые механические и электрические свойства для проволоки диаметром 0,3 – 2,0 мм из сплава 01417 после окончательного отжига должны соответствовать следующим значениям:

1. временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 142,5$ МПа;
2. относительное удлинение $\delta = 8$ %;
3. электросопротивление $\rho = 0,032$ Ом·м/мм².

Таблица 1.1 - Химический состав сплава 01417

Наименование сплава	Массовая доля элементов, %					
	Основные компоненты		Контролируемые примеси, не более			
	Al	РЗМ: La, Ce, Pr	Fe	Si	прочие, каждый	прочие, всего
01417	основа	7,0 – 9,0	0,6	0,3	0,2	0,4

Физическим свойством, которое определяет эксплуатационные качества проволоки, применяемой для создания бортовых проводов и проводников в целом, является электропроводность. Фактором, влияющим на электропроводность продукции из алюминиевых сплавов, является малая растворимость редкоземельных и переходных металлов в твердом растворе алюминия, что обеспечивает стабильные значения электропроводности таких сплавов.

Взаимодействие алюминия с переходными и редкоземельными металлами позволяет формировать в твердом растворе алюминиевого сплава интерметаллидные соединения в высокодисперсной форме, что при гетерогенизации пересыщенного твердого раствора обеспечивает

существенное упрочнение расплава, которое не устраняется при нагреве до температуры +200 °С.

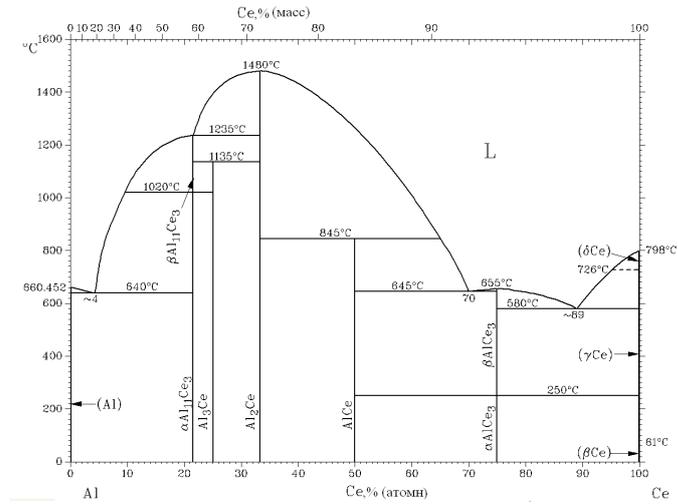
Поэтому применение указанного типа легирования, при котором редкоземельные металлы мало растворимы в твердом растворе алюминия и образуют с алюминием и другими легирующими компонентами интерметаллидные соединения, равномерно распределенные по сечению металла, может служить основой для создания проводников из алюминиевых сплавов высокими прочностными значениями и удовлетворительной термостойкостью и низким электросопротивлением.

В рассмотренных системах отношение алюминия к РЗМ 2:1, позволяет образовать очень устойчивые соединения типа Al_2Ce с температурой плавления 1400 °С, которые в 1,5 – 2,5 раза превышают температуру плавления алюминия и других редкоземельных металлов. Проанализировав фазовые равновесия алюминия с редкоземельными металлами (рисунок 1.2), можно заключить, что церий, лантан и празеодим образуют однотипные системы с алюминием, которые отличаются одинаковым взаимодействием с Al, как в отношении типа кристаллизации смесей (эвтектические, перитектические превращения), так и в отношении формирования химических соединений (промежуточных фаз).

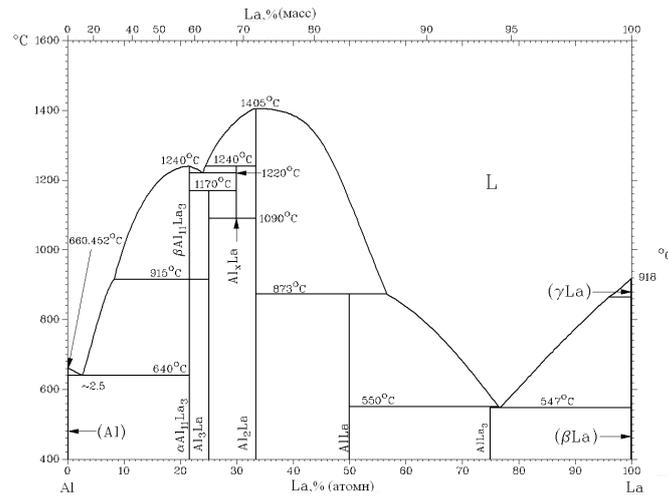
Отличительной особенностью диаграммы Al–Ce (рисунок 1.2 *a*) является то, что при очень низкой растворимости церия в алюминии, она имеет эвтектическое строение [18]. В работе [37] установлены наиболее достоверные параметры эвтектической реакции, которые составили 9,8 % Ce и 645 °С. Так же установлено что с увеличением скорости кристаллизации (V_c) максимальная растворимость Ce в алюминии незначительно изменяется, но при этом протекает диспергирование эвтектики со сдвигом эвтектической точки к большему содержанию церия. По данным работы [37] для $V_c = 10^3$ К/с эвтектическая концентрация составляет около 15 % Ce. Поскольку лантан и другие РЗМ, входящие в мишметалл, имеют изоморфные фазы с алюминием, то это значение можно принимать и для других сплавов системы Al-РЗМ. Из этого следует, что сплав 01417 должен содержать примерно равные доли первичного алюминиевого твердого раствора и эвтектики.

При приготовлении расплава алюминия с редкоземельными металлами следует использовать технические решения для образования интерметаллидов Al-РЗМ в высокодисперсном состоянии. Поэтому предпочтительнее осуществлять легирование алюминиевых сплавов лигатурами Al-РЗМ. На основании приведенных ранее диаграмм состояния рассмотрены, находящиеся в состоянии равновесия с твердым раствором алюминия, близкие к алюминию интерметаллидные соединения. Так соединение $Al_{11}Ce_3$, обладающее высокой температурой кристаллизации 1230 – 1245 °С принимает участие в эвтектических реакциях. При этом, в алюминиевых

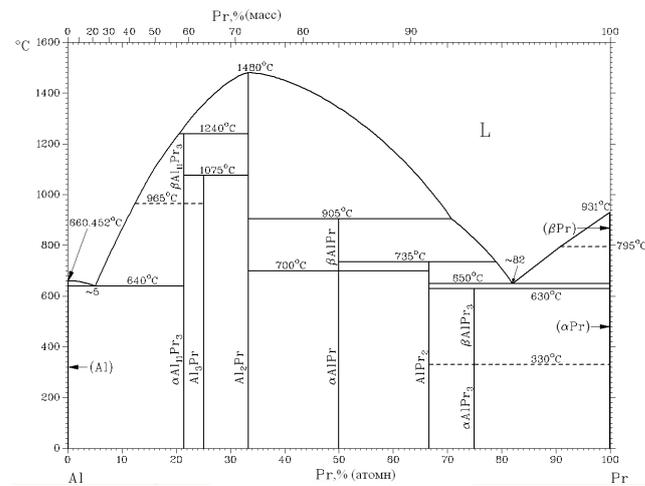
сплавах с малой концентрацией редкоземельных металлов, кристаллизация интерметаллидов в алюминиевых сплавах протекает по эвтектической реакции с температурой 635 - 645 °С.



а



б



в

Рисунок 1.2 – Диаграммы фазового равновесия : а – Al-Ce; б – Al-La; в – Al-Pr

Для интерметаллического соединения $Al_{11}Ce_3$ системы Al-Ce, отличительной особенностью протекания эвтектической кристаллизации является восходящий ликвидус в соотношении с относительно пологим ликвидусом алюминиевого твердого раствора. При таких условиях, в процессе кристаллизации зарождение интерметаллидных частиц протекает с образованием концентрационного равновесия, наличие которого позволяет предотвратить разрастание зародышей интерметаллидов и продолжить кристаллизацию посредством образования чистого твердого раствора алюминия, ввиду низкой растворимости при эвтектической температуре в нем редкоземельных металлов.

Рассмотренная особенность делает возможным зарождение интерметаллидных соединений, в алюминиевых сплавах с редкоземельными металлами с малым размером частиц менее 1,0 мкм. Присутствие значительного количества интерметаллидов в сплавах системы Al-РЗМ обуславливает достижение высоких характеристик прочности, а минимальная концентрация редкоземельных металлов в твердом растворе обеспечивает получение значений электропроводности, сопоставимые с первичным алюминием. Высокие скорости кристаллизации, обычно применяемые при реальной технологии получения заготовок электротехнического назначения, могут вызывать образование пересыщенных твердых растворов, что требует проведения гетерогенизационных нагревов, при которых происходит распад метастабильно пересыщенного твердого раствора с выделением уже в твердом состоянии высокодисперсных интерметаллидов и снижение концентрации алюминиевого твердого раствора. Часто такой гетерогенизирующий нагрев совмещают с нагревами под обработку давлением, поэтому нагрев под обработку давлением должен назначаться с учетом возможного развития процессов гетерогенизации.

Таким образом, дисперсность и стабильность частиц интерметаллидных фаз $Al_nPЗМ$ позволяют использовать сплав 01417 в качестве материала с повышенной жаропрочностью и электропроводностью.

1.3. Анализ существующих технологий получения литых заготовок из сплава 01417, предназначенных для изготовления проволоки электротехнического назначения

В настоящее время получение длинномерных заготовок из сплавов алюминия с различным содержанием редкоземельных металлов реализуется различными технологическими способами. Применение опытно-промышленной технологии получения заготовок из гранулируемых алюминиевых сплавов, разработанной и внедренной Всесоюзным институтом легких сплавов (спекание гранул, дальнейшее прессование, стыковая сварка отдельных прутков и т.п.) [38], приводило к тому, что получаемый материал содержал газовые примеси. Основными газовыми примесями в гранулах являются кислород, водород, кроме того в них содержится влага. Поэто-

му старые технические условия с применением гранульной технологии ограничивали производство электротехнических изделий из сплава 01417 до диаметра проволоки 1 мм. Неоднократные попытки получить проволоку более тонких сечений и малых диаметров не увенчались успехом.

Решить эту проблему можно за счет применения метода электромагнитной кристаллизации [39]. К литым заготовкам малых диаметров можно применить следующую закономерность: вихрь замыкается в объеме жидкого металла, что позволяет достигнуть высоких скоростей и впоследствии повысить значение турбулентной составляющей эффективной теплопроводности.

В процессе литья в ЭМК слитков малого диаметра, не более 15 мм, за счет высоких скоростей охлаждения, воздействующих на корковую зону слитка, обеспечивается равномерная, мелкозернистая структура отливаемого слитка. Именно поэтому высокие значения скоростей охлаждения позволяют значительно повысить физические и механические свойства отливаемого слитка.

Особенностью литья методом ЭМК является исключение кристаллизатора классической формы. Воздействие на расплав электромагнитных сил позволяет удерживать жидкий алюминий в индукторе. По причине того, что у фронта кристаллизации в равновесии находятся электромагнитное и гидростатическое давление, в процессе литья высота жидкой фазы остается постоянной.

Неизменное повышение требований к качеству отливаемых слитков, в реалиях современной конкуренции на мировом рынке, обуславливает и необходимость постоянного совершенствования процессов литья. Качество литого слитка характеризуется многими параметрами, основными из которых являются: скорости литья, охлаждения, температура металла, диаметр слитка и др. Как установлено в работах [40-42], перемешивание жидкой сердцевины слитков в процессе литья является перспективной технологией, оказывающий существенное влияние на формирование структуры отливаемого слитка. При исследовании структуры слитков выявлено, что с повышением поперечного сечения заготовок размер зерна в образцах существенно меняется. В работах [42-44] представлено и подробно изучено влияние изменения технологических параметров литья на качество отливаемых слитков из сплавов на основе алюминия.

При электровихревом способе [45-48] электромагнитное перемешивание возникает при контакте электрического тока с собственным магнитным полем. Индукционное перемешивание расплава осуществляет индуктор, замкнутый на жидкой сердцевине слитка. Поэтому причиной движения, созданных индуктором вихревых токов, является взаимодействие этих токов с магнитным полем в жидкой фазе слитка. Для условий, описанных в работах [48-52], при отсутствии прямого контакта системы индуктор – слиток увеличивается стабильность электромагнитного поля при подводимой мощности 15-25 кВт/т с коэффициентом полезного действия пе-

ремешивания 0,2-4,5 %. При этом диаметр литых слитков малого сечения сопоставим с диаметром заготовок, полученных прессованием из крупногабаритных цилиндрических слитков [53]. На рисунке 1.3 представлен электромагнитный кристаллизатор для литья заготовок малого диаметра.

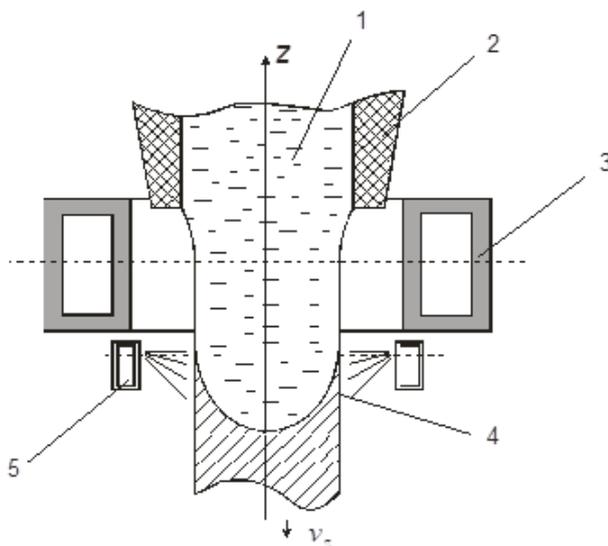


Рисунок 1.3 – Электромагнитный кристаллизатор для получения заготовок малого диаметра

На представленном рисунке расплавленный металл 1 через втулку подачи металла 2 поступает в индуктор ЭМК с одним витком 3. Для формирования донной части слитка используется токопроводящая затравка, на которую в начальном этапе литья затекает расплавленный металл, кристаллизующийся после запуска литейной машины. Система охлаждения представляет собой текстолитовый кристаллизатор 5 с множеством отверстий, выполненных под различными углами, с целью эффективного формирования корковой зоны слитка 4 и в процессе затвердевания непрерывнолитая заготовка, посредством комплекса вытяжных устройств сматывается в бухты.

Рассмотренный способ воздействия электромагнитным полем на жидкую сердцевину слитка, формирует перемещение бегущего поля по одной направляющей, так и в обратную ей сторону поочередно, образуя комбинированное движение. Это позволяет с высокой степенью эффективности влиять на жидкую фазу в нижней части слитка, тем самым повышая качество литых заготовок. Поэтому получение слитков малого сечения для изготовления проволоки из малопластичных сплавов алюминия, в том числе и сплава 01417, является актуальной научной и практической задачей.

Коллективом ученых ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск) для решения этой задачи была создана опытно-промышленная одноручьевая установка производительностью до 12 кг/час (рисунок 1.4) [54]. На ней методом непрерывного литья из сплава

01417 были получены длинномерные алюминиевые слитки в виде прутка диаметром 9-12 мм, свернутые в бухты (рисунок 1.5). Сравнительные характеристики свойств прутков, полученных по разным технологиям из сплава 01417, рассмотрены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сопоставление эксплуатационных свойств прутков из сплава 01417

Параметры	Гранульная технология	ЭМК
Временное сопротивление разрыву, МПа	165	195
Относительное удлинение, %	8	14
Удельное электрическое сопротивление, МПа	0,0322	0,0322

Анализ данных таблицы показывает, что при одинаковой электропроводности заготовки, полученной с помощью ЭМК, и аналогичного прутка, изготовленного по гранульной технологии в условиях ВИЛС, механические характеристики непрерывнолитой заготовки ЭМК на 30% выше. Предлагаемая технология получения алюминиевого слитка ЭМК малого диаметра позволила исключить энерго- и трудоемкие технологические процессы обработки гранул: компактирования, нагрева, прессования, а, следовательно, снизить потребление электроэнергии и затраты.



Рисунок 1.4 - Опытно-промышленная установка непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор

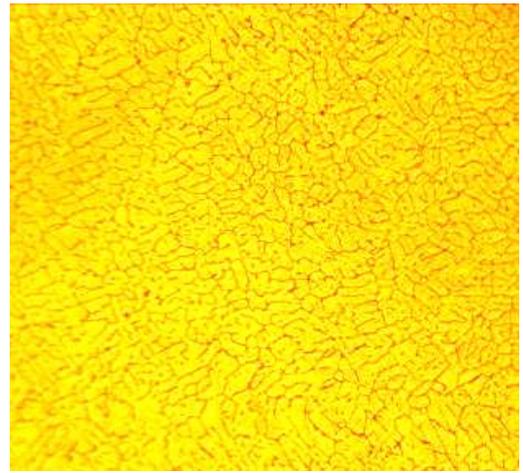
Применение процесса электромагнитного литья со сверхбыстрой кристаллизацией ($10^3 - 10^4$ °C/сек) с интенсивным воздействием электромагнитных сил на жидкую фазу расплава дает возможность изготовить длинномерный слиток под последующую деформационную обработку. Полученная таким образом заготовка, при помощи вытягивающего устройства, отводится из зоны кристаллизации и сматывается в бухту весом до 100 кг (рисунок 1.5, а). Принцип электромагнитного литья заключается в воздействии электромагнитных сил на жидкую фазу сплава

в заданном объеме, при этом происходит ее удержание и движение по фронту кристаллизации. Охлаждающая жидкость подается непосредственно на нижнюю зону кристаллизации слитка, и за счет этого достигается очень высокая скорость охлаждения. Получаемая структура слитка отличается высокой однородностью и мелкодисперсной структурой, что обеспечивает высокие прочностные характеристики и жаропрочные свойства.

Микроструктура литой заготовки (рисунок 1.5, б), наличие мелкодисперсной, равномерной кристаллической структуры по сечению слитка, играют важную роль в протекании стабильного процесса пластической деформации.



а



б

Рисунок 1.5 – Непрерывно-литая заготовка из сплава 01417 (а), полученная с применением электромагнитного кристаллизатора и ее микроструктура (б)

Перечисленные выше качественные показатели алюминиевой заготовки можно достичь в процессе литья методом электромагнитной кристаллизации под воздействием электромагнитного перемешивания за счет электромагнитной индукции и вихревых токов. Поэтому для увеличения скорости кристаллизации применение электромагнитного перемешивания целесообразно, так как за счет повышения турбулентной теплопроводности увеличивается теплообмен в зоне фазового перехода.

Таким образом, посредством интенсивного течения металла обеспечивают стабильное получение мелкодисперсной структуры при литье цилиндрических заготовок для последующей пластической деформации. Такая технология позволяет задавать фазовую структуру и структуру элементного состава металлического сплава в виде перколированной сети дендритов. Характерный размер элементов формируемых дендритов достигает 30 Нм. Указанная дендритная структура играет определяющую роль в обеспечении эксплуатационных свойств получаемых металлов, включая такие свойства как пластичность и удельная электропроводность.

Таким образом, технология непрерывного литья с применением электромагнитного кристаллизатора позволяет не только сократить количество технологических переделов, но и получать в литом состоянии определённое соотношение прочностных и пластических свойств, которое обеспечивает возможность обработки металла с высокими степенями деформации.

1.4. Методы и оборудование для непрерывного прессования

Обработку заготовок, полученных по изложенным выше технологиям литья, можно вести различными методами, например, сортовой прокаткой или прессованием. Однако при этом процесс получения проволоки малых диаметров становится многопереходным, характеризуется повышенной обрывностью, значительными трудо- и энергозатратами и высокой себестоимостью полуфабрикатов. Поэтому для деформации металла целесообразно использовать методы непрерывного прессования [24, 25], которые применяются для получения длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, в том числе и с различным содержанием редкоземельных металлов [55-69].

В настоящее время для практического использования в промышленности используются два метода непрерывного прессования: метод Конформ [25] и метод СПП [24].

Авторы монографии [25] разработали основы проектирования процесса непрерывного прессования металлов по методу Конформ. В конструкции установок Конформ часть разъемного контейнера (башмак) стыкуется с валком, имеющим канавку (рисунок 1.6). Кольцевая вставка с упором и расположенными в ней матрицами перекрывает канавку, образуя зону распрессовки и выдавливания металла через калибрующее отверстие матрицы.

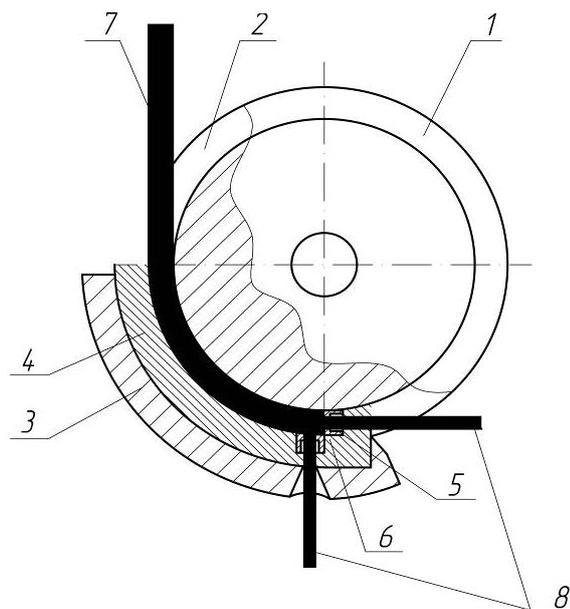


Рисунок 1.6 - Схема непрерывного прессования Конформ: 1 – колесо с приводом; 2- валок с канавкой; 3 - башмак; 4- кольцевая вставка с упором; 5, 6-матрицы; 7- заготовка; 8 - пресс-изделие

В настоящее время промышленные установки Конформ широко применяются для прессования длинномерных деформированных полуфабрикатов малого поперечного сечения из алюминия, меди и их сплавов [14].

Линии непрерывного прессования Конформ находят свое применение на различных предприятиях цветной металлургии и кабельной промышленности, таких, например, как ПАО «Каменск – Уральский завод ОЦМ», СОАО «Гомелькабель» и др.

Последовательность работы таких линий показана на рисунке 1.7. Непрерывнолитая заготовка 1 в виде бухты размещается на правильно-задающем устройстве 2, а затем подается в установку непрерывного прессования Конформ. После воздействия интенсивной пластической деформации прессованный пруток поступает в систему охлаждения 4 и калибровочный стан 5, а затем сматывается в бухту на устройстве намотки 6.

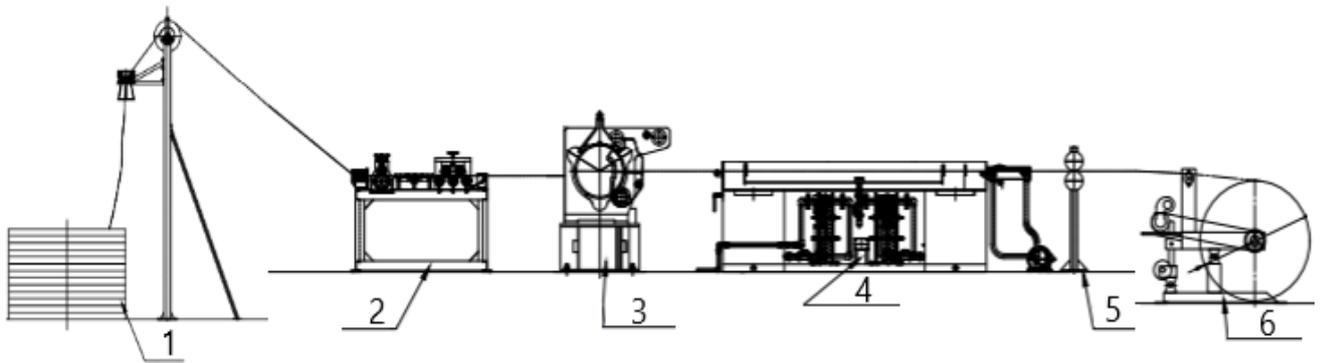


Рисунок 1.7 - Общий вид линии непрерывного прессования Конформ: 1 – непрерывнолитая заготовка; 2 – правильно-задающее устройство; 3 – установка непрерывного прессования «Конформ»; 4 – устройство охлаждения, 5 – калибровочный стан; 6 – устройство намотки.

Процесс совмещенной прокатки-прессования протекает в двухвалковом закрытом калибре, где после прокатки и распрессовки металл поступает в матрицу, и осуществляется процесс его экструдирования [24]. При этом конструктивно матрица смещена вдоль оси прокатки, не попадая в плоскость, проходящую через центры валков, что позволяет создать зону распрессовки.

В работе [24] представлена схема совмещенного процесса прокатки-прессования, на которой показаны три зоны геометрического очага деформации металла (рисунок 1.8): 1 – зона захвата заготовки и прокатки; 2 – зона распрессовки; 3 – зона прессования. Активные силы трения, возникающие на стенках калибра, сопутствуют стабильному протеканию процесса прессования, о чем свидетельствует характер деформации металла в рассмотренных зонах.

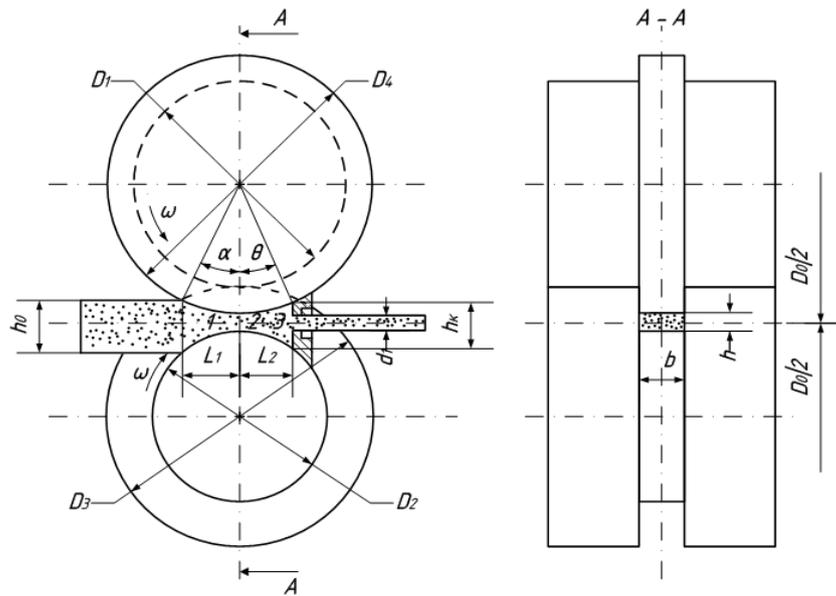


Рисунок 1.8 – Схема процесса совмещенной прокатки – прессования: 1 – зона прокатки; 2 – зона распрессовки; 3 – зона прессования

Процесс заполнения калибра металлом при вращении валков с угловой скоростью ω протекает в несколько этапов. На начальном этапе захват заготовки высотой h_0 и шириной b_0 происходит как при обычной прокатке, причем условие осуществимости процесса ограничивается углом захвата α . В момент захвата наблюдается незначительное обжатие, при этом лишь часть калибра соприкасается с заготовкой, то есть имеет место неполный контакт металла с калибром. После захвата заготовки она обжимается по высоте валками с катающими диаметрами D_1 по выступу и D_2 по дну ручья калибра до сечения высотой h , проходящего через общую ось валков. Ширина заготовки b_0 несколько меньше ширины калибра b , поэтому реализуется стесненное уширение металла в калибре. По мере продвижения заготовки в зону 2 за счет активных сил трения со стороны валков она достигает зеркала матрицы с высотой h_m и продольное перемещение прекращается. А поскольку активные силы трения создают давление в зоне 2, то заготовка подвергается деформации продольного осаживания (распрессовке) с заполнением металлом части длины калибра у матрицы, то есть реализуется обратная по знаку деформация металла. В тот момент, когда давление, создаваемое активными силами трения в зоне контакта, будет достаточным для продавливания металла через калибрующее отверстие матрицы размером d_1 , реализуется процесс прессования. При этом степень деформации увеличивается в несколько раз по сравнению с прокаткой.

Следует отметить, что создаваемые давления в значительной степени зависят от активных сил трения. Для их увеличения предложено выполнять катающие диаметры валков с отношением D_2/D_1 в диапазоне 0,6 – 1,0. Вследствие того, что выбрано такое соотношение диамет-

ров, происходит оков металлом заготовки валка с меньшим диаметром, в результате которого силы трения между заготовкой и стенками закрытого калибра значительно увеличиваются.

Общая длина очага деформации L характеризуется величиной расстояния от входа металла в валки до общей оси валков L_1 и расстоянием от общей оси валков до зеркала матрицы L_2 . Последняя величина определяет точку, получаемую пересечением диаметра D_3 с диаметром D_4 , после которой начинается раскрытие калибра, который уже невозможно перекрыть матрицей. Величину L_2 рекомендуют выбирать по выражению $L_2 = (0,005 - 0,35) D_2$, что обеспечивает увеличение протяженности зон 2 и 3 и, соответственно, рост активных сил трения.

В настоящее время создана и запущена в эксплуатацию на Иркутском алюминиевом заводе опытно-промышленная установка совмещенной прокатки-прессования [69]. На ней получают катанку диаметром 9-15 мм из алюминия и его сплавов в непрерывном режиме. Однако использование роторного кристаллизатора приводит к усложнению технологической схемы производства полуфабрикатов, так как для каждого нового сплава необходима разработка индивидуальных режимов литья и их реализации в непрерывном режиме эксплуатации установки. Поэтому при получении литой заготовки с дефектами литья, или имеющей температуру, не соответствующую требуемой при деформационной обработке, возможна аварийная остановка процесса и снижение производительности установки.

Одним из основных вопросов реализации процесса СПП является определение возможности осуществления процесса при заданных размерах калибра и заготовки. Для случая, когда заготовка квадратного поперечного сечения задается в закрытый ящичный калибр, методика определения реализуемости процесса приведена в работе [25]. Она основана на предположении о том, что процесс совмещенной прокатки прессования осуществим, когда мощность N_a , созданная силами трения на контакте калибра с заготовкой, будет больше или равна мощности $N_{пр}$, требуемой для выдавливания прутка через калибрующее отверстие матрицы

$$N_a \geq N_{пр}. \quad (1.1)$$

Это условие может быть записано в виде

$$P_1 V_B - P_2 V_x \geq 0, \quad (1.2)$$

где V_B , V_x – соответственно, скорости валков и металла, P_1 – сила, подводимая валками, P_2 – сила, затрачиваемая при выдавливании металла через матрицу.

С целью оценки возможности осуществления процесса используется параметр

$$k_y = \frac{P_1 - P_2 \lambda}{P_1} \cdot 100 \%, \quad (1.3)$$

где $\lambda = \frac{V_x}{V_B}$ – коэффициент, характеризующий относительную скорость металла.

Таким образом, условие осуществления процесса совмещенной прокатки-прессования сформулировано следующим образом: если $k_y \geq 0$, то процесс совмещенной прокатки-

прессования заготовки квадратного сечения в закрытом ящичном калибре будет гарантированно реализуем.

В работах Д.С. Ворошилова с соавторами [55-68] приведены результаты исследований процесса деформационной обработки непрерывнолитых заготовок, полученных в электромагнитном кристаллизаторе из высоколегированных сплавов системы Al-PЗМ. Установлено, что применение схемы ЭМК-СПП позволяет получать заготовки для последующего волочения с высоким уровнем пластических и прочностных свойств. Проведенные на основе метода баланса мощностей теоретические исследования позволили определить температурные и скоростные параметры процесса, реализованного на лабораторной установке СПП-200. Это дало возможность установить оптимальные параметры для реализации совмещённой прокатки-прессования заготовок из сплава системы Al-PЗМ с одним или двумя приводными валками [55]. Предложены расчетные формулы, позволяющие определить силы, действующие на валки и матрицу в процессе прокатки-прессования. С использованием рассчитанных значений силовых параметров построены зависимости, представленные на графиках (рисунок 1.9).

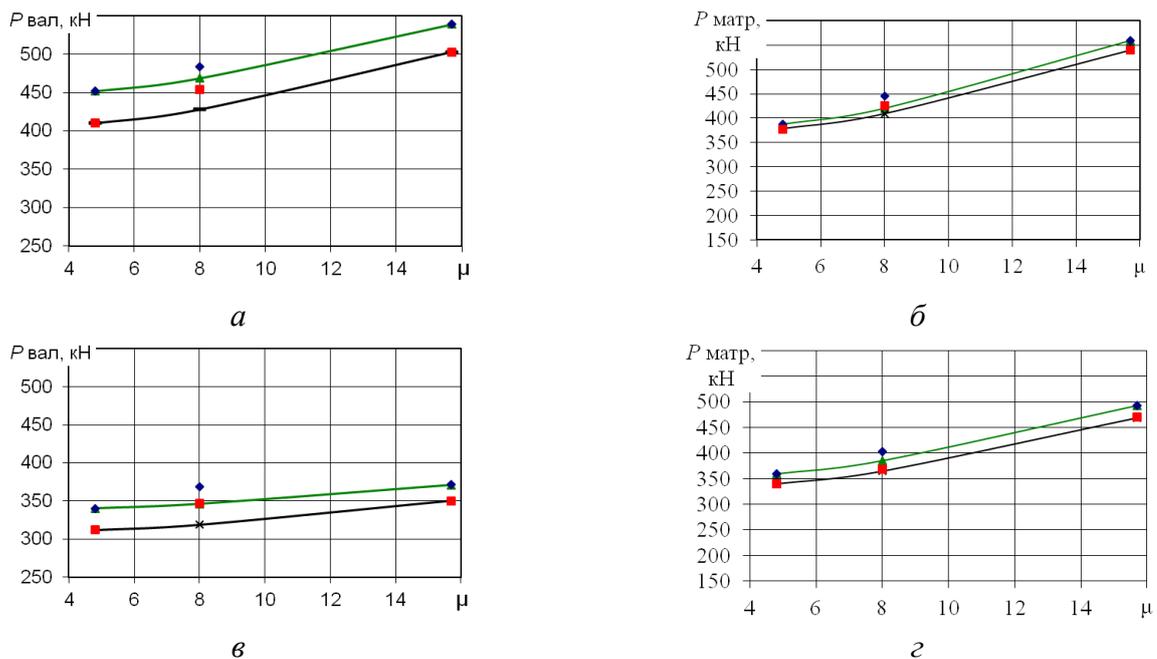


Рисунок 1.9 – Графики зависимости сил, которые действуют на валки (а, в) и матрицу (б, г), коэффициента вытяжки для цилиндрических образцов из алюминиевого сплава при различных температурах заготовок 480 °С (а, б) и 550 °С (в, г): \blacklozenge и \blacksquare - экспериментальные значения при $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ и $1,49 \text{ c}^{-1}$; \blacktriangle и \blackcross - расчетные значения при $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ и $1,49 \text{ c}^{-1}$

Для совмещенной прокатки-прессования металла предложены различные конструкции установок. Наиболее близкой для реализации непрерывного литья в ЭМК и процесса СПП является установка, защищенная патентом РФ №67492 [70], разработанная в Сибирском феде-

ральном университете. Однако, целесообразно для процессов непрерывного прессования использовать заготовки круглого поперечного сечения, задаваемые в ящичный калибр прямоугольного или квадратного сечения. Такие заготовки, например, в настоящее время получают при литье в электромагнитный кристаллизатор. При использовании же заготовок квадратного сечения [55] формоизменение металла и энергосиловые параметры процесса СПП существенно отличаются. Поэтому целесообразно провести теоретические и экспериментальные исследования по изучению процесса совмещенной прокатки-прессования с применением заготовки круглого сечения малого диаметра, полученной в ЭМК. Кроме того, для таких случаев нет методики определения реализуемости процесса, что важно для внедрения такой технологии в производство.

Таким образом, проведенный анализ позволяет подтвердить целесообразность применения устройств непрерывного прессования для решения поставленных задач исследования. Для таких установок не имеет значение волнообразная поверхность заготовок, полученных в ЭМК, так как для деформации используется экструдирование металла. Вместе с тем структура металла таких заготовок дает возможность получать высокий уровень механических и эксплуатационных свойств, что особенно важно для таких сплавов, как 01417.

1.5. Выбор программного комплекса для моделирования процессов непрерывного прессования

Для решения различных научных задач в настоящее время используют системы автоматизации инженерных расчетов или CAE (Computer-aided engineering), позволяющие применять методы математического моделирования [71].

Для анализа и решения динамических, тепловых и иных задач в их комбинации наибольшую популярность имеют гибридные, совмещенные CAD/CAE системы, объединяющие CAE системы и системы автоматизированного проектирования CAD, которые отличаются надежностью и точностью расчетов. Для обработки металлов давлением в программных комплексах используется метод конечных элементов [72, 73], а наиболее применяемым для решения задач объемного моделирования является программный комплекс Deform-3D [74].

Опыт проведенных исследований [55, 75-78], выполненных учеными кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ для моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования, показывает надежность и высокую сходимость полученных значений в программном комплексе Deform-3D с результатами лабораторных и опытно-промышленных испытаний.

Так для алюминиевого сплава системы Al-PЗМ проведено компьютерное моделирование формоизменения и температурно-скоростных параметров процесса СПП с одним и двумя при-

водными валками, что позволило установить особенности течения металла, кинематики и тепловых условий процесса, в том числе на стадии процесса прессования [55]. В ряде случаев наблюдалось образование бесконтактной зоны на границе валка с выступом и заготовки, что подтверждается экспериментальными данными. При моделировании температурных условий процесса СПП выявлено, что оптимальный интервал температур нагрева инструмента для СПП экспериментального сплава системы Al-P3M составляет от 100 до 150 °С, а величина температурного интервала нагрева заготовок для исследуемых сплавов составляет 480 – 550 °С.

Важной задачей для расширения понимания процесса СПП является моделирование температурных и скоростных параметров процесса, а также формоизменения металла под воздействием деформации. Результаты работы [75] позволили решить поставленные задачи для сплава АК5, где путем математического моделирования были проведены расчеты температуры и кинематики процесса, сходимость и достоверность которых были подтверждены результатами экспериментальных исследований.

С целью определения температурно-скоростных режимов для получения катанки электротехнического назначения из алюминиевых сплавов, проведено компьютерное моделирование процесса СПП [76]. Полученные результаты позволили установить условия для стабильной реализуемости процесса, оценить величину крутящих моментов на валках, выбрать мощность приводного электродвигателя, а также провести анализ температурных полей на рабочем инструменте с целью проектирования системы охлаждения установки СПП.

В работах [77, 78] приводятся результаты моделирования процесса СПП для алюминиевых сплавов различных систем Al-Zr, Al-Mg, Al-Fe. Выполненное авторами компьютерное моделирование совмещенной прокатки-прессования позволило оценить особенности изменения формы металла при различных условиях проведения процесса. Компьютерное моделирование дало возможность также с высокой точностью определить силовые и температурно-скоростные параметры процесса СПП, что подтверждено испытаниями на лабораторных и опытно-промышленных установках.

Таким образом, компьютерное моделирование с использованием программного комплекса Deform 3D активно применяется для анализа процессов непрерывного прессования алюминиевых сплавов. Однако математические и компьютерные модели, которые были разработаны для процесса СПП, относились к случаю деформации заготовки квадратного сечения в ящичных калибрах. То есть условия гарантированной реализации такого варианта процесса СПП и влияние на них технологических параметров обработки были недостаточно изучены.

1.6. Выводы по главе

Анализ научно-технической литературы позволил сделать следующие выводы.

1. Актуальность поставленных в работе задач объясняется низкой эффективностью разработанной промышленной технологии получения заготовок для изготовления проволоки электротехнического назначения из алюминиевого сплава 01417 и несоответствием требований, предъявляемых к ней предприятиями авиационной промышленности.
2. Оценка возможности применения технологии литья прутков небольшого поперечного сечения в электромагнитный кристаллизатор показала, что она обеспечивает получение высококачественной заготовки с мелкодисперсной структурой для последующей интенсивной пластической деформации.
3. Целесообразна разработка технологии производства проволоки с использованием для получения заготовки методов непрерывного прессования применительно к алюминиевому сплаву 01417, имеющего сравнительно низкую пластичность и трудно поддающегося деформации при реализации традиционных способов обработки.
4. Анализ эффективности применения процессов непрерывного прессования для получения заготовок из сплава 01417 показал, что необходимо изучение реологических свойств металла при различных температурно-скоростных и деформационных параметрах обработки.
5. Необходимо моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования прутков с использованием заготовки круглого сечения для исследуемого алюминиевого сплава с учетом их реологических характеристик с целью точного определения энергосиловых и температурно-скоростных условий реализации процесса, для чего целесообразно использование программного комплекса Deform-3D.
6. Имеется необходимость создания методики определения реализуемости процесса СПП для случая обработки заготовки круглого поперечного сечения в закрытом ящичном калибре.

На основании сделанных выводов сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования, представленные во введении.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ МЕТОДОМ СПП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

В данной главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности осуществления процесса непрерывного прессования методом СПП с использованием заготовки круглого сечения, полученной с помощью электромагнитного кристаллизатора, и предназначенной для изготовления проволоки алюминиевого сплава 01417 с поперечным сечением 0,5 мм.

Путем аналитической оценки и компьютерного моделирования было проведено изучение формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса СПП. Для моделирования и расчетов с помощью метода горячего кручения были определены реологические свойства металла непрерывнолитых заготовок из сплава 01417, полученные с помощью электромагнитного кристаллизатора. При этом установлены температурно-скоростные условия, технологические и силовые параметры, при которых процесс СПП осуществим в стабильном режиме его реализации. Также получены данные по силам, действующим на матрицу и валки, и моментам на валках при прокатке-прессовании, что позволило определить энергосиловую нагрузку и выбрать установку совмещенной обработки для экспериментальных исследований. Результаты моделирования опубликованы в работе [79].

2.1. Определение реологических свойств непрерывнолитых заготовок и моделирование процесса получения прутков из алюминиевого сплава 01417 методом совмещенной прокатки-прессования с применением комплекса DEFORM-3D

Целью моделирования было исследование режимов совмещенной прокатки-прессования непрерывнолитых заготовок круглого поперечного сечения из алюминиевого сплава системы Al-PZM (7-9%) на основе применения программ трехмерного моделирования в среде Solid Works и DEFORM-3D.

Для расчетов использовали данные по реологическим свойствам сплава 01417, полученные методом кручения на установке, созданной специалистами кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ [78], изготовленной в соответствии с техническим решением [80]. Основные параметры установки приведены в таблице 2.1.

Для определения реологических свойств проводили кручение по разным режимам в достаточно широком диапазоне изменения температуры, скорости и степени деформации (рисунок 2.1).

Таблица 2.1 – Основные параметры установки для горячего скручивания

Параметр	Значение
Крутящий момент, Н·м	250
Скорость вращения шпинделя, об/мин:	не более 2 500
Минимальная пауза при остановке шпинделя, с	0,3
Мощность электродвигателя, кВт	3,0

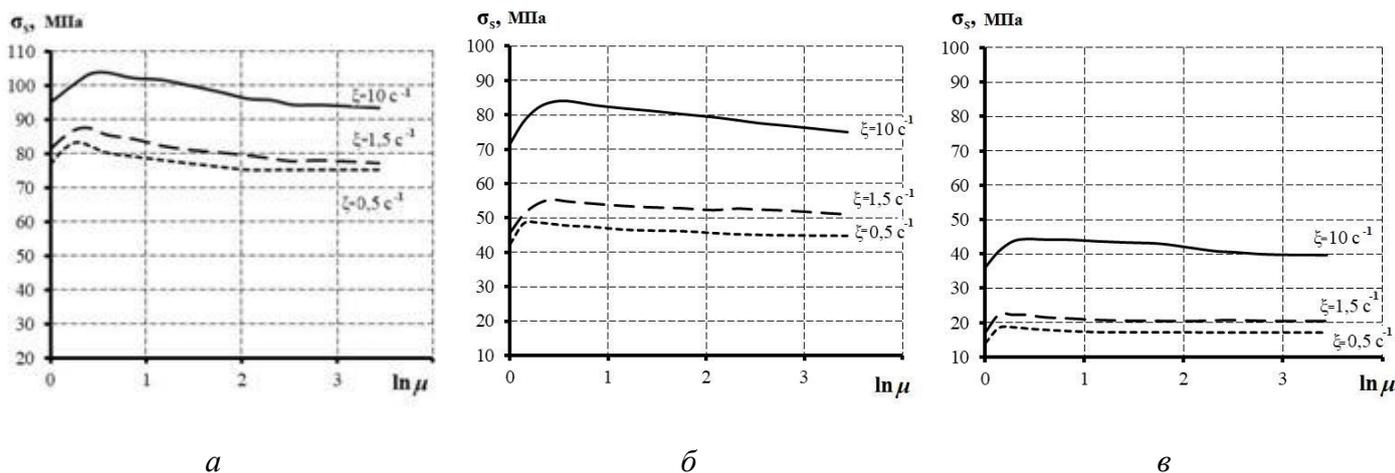


Рисунок 2.1 – Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава 01417 от логарифмической степени деформации $\ln \mu$ при различных скоростях деформации ξ и температурах нагрева:

a – 320 °C; b – 400 °C; v – 550 °C

Испытания проводили по методике [81], в соответствии с которой диаметры образцов для испытаний должны составлять 8 и 10 мм. Нагрев гантелеобразного образца, имеющего 2 головки для захвата и центральную цилиндрическую часть заданного диаметра, проводили в расплаве солей и с помощью термопары контролировали его температуру. Образец одной головкой помещали в верхний «активный» захват шпинделя установки, а второй - в нижний «пассивный» захват и поворачивали против часовой стрелки до упора. По достижении заданной температуры включали механизм вращения шпинделя и осуществляли скручивание образца до разрушения, фиксируя с помощью тензометрической аппаратуры параметры крутящего момента на приводном валу. С помощью формул, приведенных в работе [81], пересчитывали число скручиваний в деформацию сдвига и определяли скорость деформации. На основании чего, получены графики, описывающие зависимость сопротивления деформации от логарифмической степени деформации при температурах 320, 400 и 550 °C, представленные на рисунке 2.1. Анализ полученных графиков показал, что вид кривых упрочнения (изменения сопротивления деформации) для сплава 01417 в зависимости от температуры, степени и скорости деформации имеет типовой характер, при котором, скоростное упрочнение возрастает, как и для большин-

ства других алюминиевых сплавов. Модель рабочего узла лабораторной установки СПП-200, сформированная в среде Solid Works, была импортирована в пакет DEFORM-3D, где проводилось моделирование процесса СПП для заготовки диаметром 12 мм [79]. Необходимые параметры для запуска процесса моделирования указаны в таблице 2.2, а схема процесса СПП представлена на рисунке 2.2.

Таблица 2.2 – Геометрические параметры для моделирования процесса СПП

Параметр	Значение
Диаметр матрицы d_M , мм	5
Диаметр заготовки d_0 , мм	12
Высота рабочего пояса матрицы $h_{п}$, мм	3
Размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b$, мм	7x15
Высота зеркала матрицы h_M , мм	20
Диаметры валков, мм: по выступу D_1 ; по дну канавки D_2 ; по реборде D_3	214 163 220

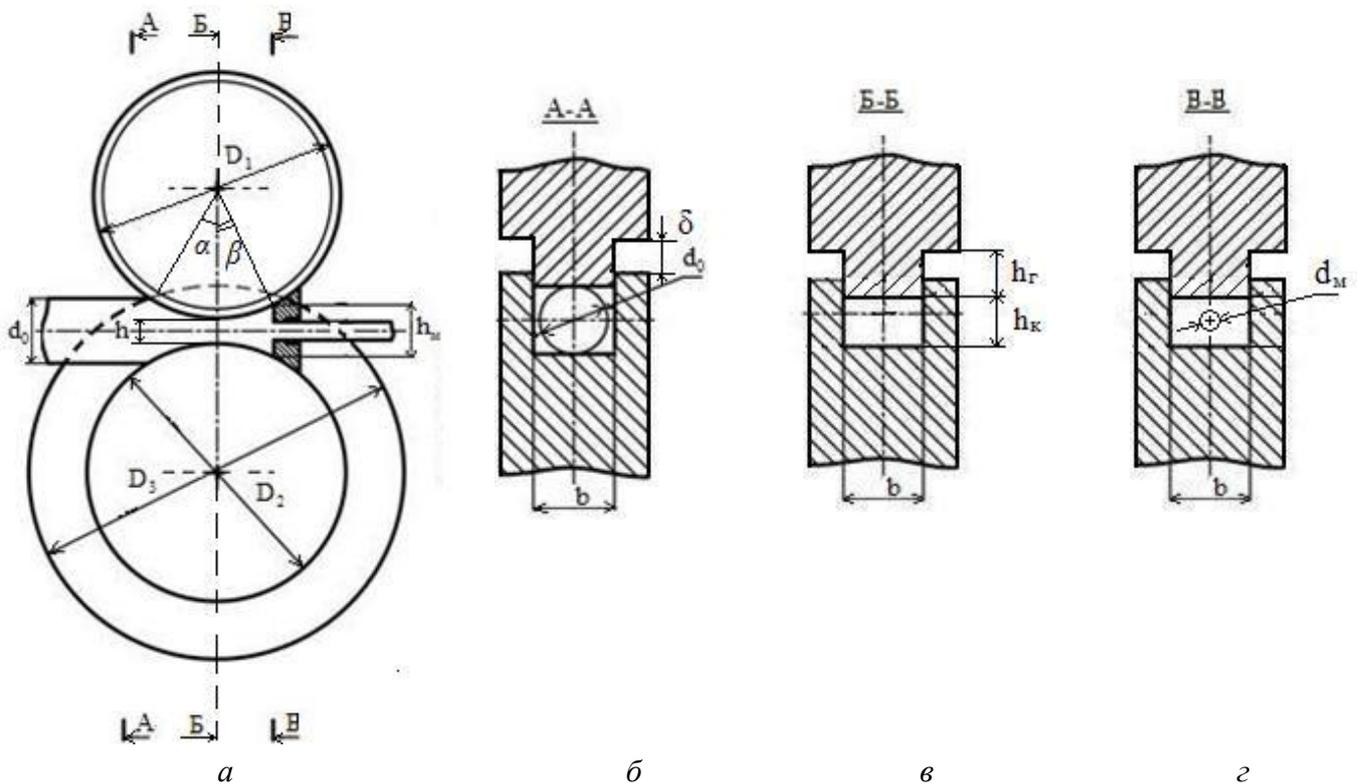


Рисунок 2.2 - Схема процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре: *a* – общий вид; *б* – на входе в деформирующий узел, *в* – при прокатке, *г* – при выдавливании пресс-изделия из матрицы

Результаты моделирования представлены на рисунках 2.3, 2.4.

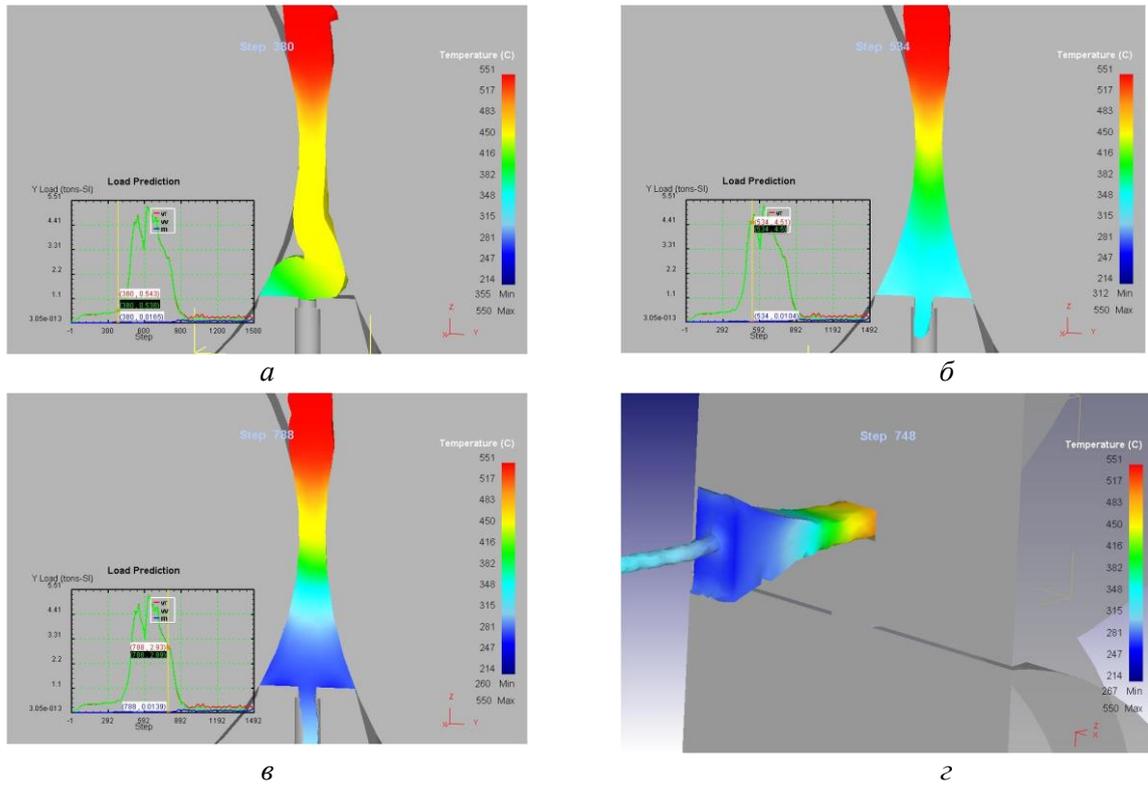


Рисунок 2.3 - Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки диаметром 12 мм на установке СПП-200 при $\omega = 4$ об/мин: *a* – начальная стадия деформации; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования; *г* – стадия прокатки

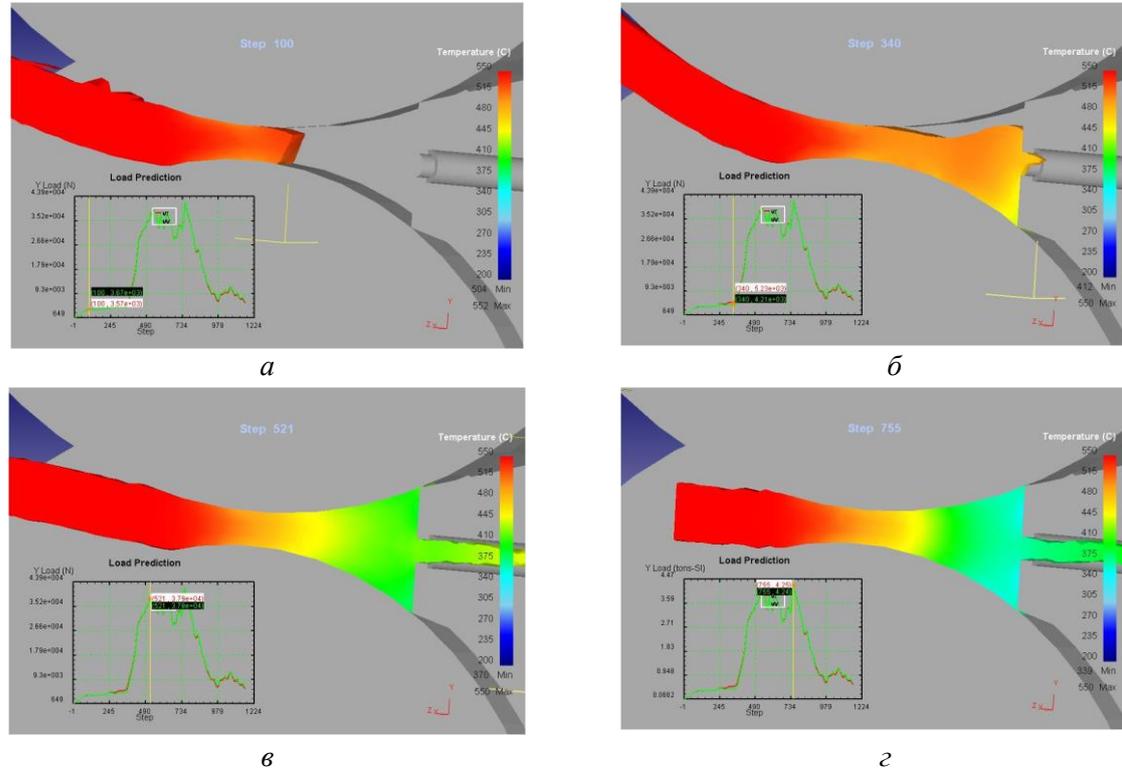


Рисунок 2.4 - Формоизменение металла и распределение температуры вдоль очага деформации при обработке заготовки диаметром 12 мм на установке СПП-200 при $\omega = 8$ об/мин: *a* – начальная стадия деформации; *б* – стадия распрессовки; *в*, *г* – стадия прессования

Формоизменение металла при обработке заготовок круглого поперечного сечения диаметром 12 мм в ящичном калибре на установке СПП-200 с (рисунок 2.3) существенно отличается от формоизменения заготовки квадратного сечения.

На начальной стадии процесса (рисунок 2.3, *а*) заготовка при неполном контакте захватывается валками и обжимается донной поверхностью валка с канавкой и гребнем валка с выступом. Далее она упирается в матрицу и распрессовывается, заполняя калибр (рисунок 2.3, *б*). При достижении давления в зоне прессования, достаточного для экструзии, металл выдавливается в виде пресс-изделия через калибрующее отверстие в матрице (рисунок 2.3, *в*). Выявлено, что при заданной частоте вращения наблюдается проскальзывание валков и постепенное снижение температуры заготовки в зоне прессования (рисунок 2.3, *г*), 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 снижается величина силы, подводимой валками. При этом степень обжатия металла по высоте при прокатке не превышает 50% и составляет 44%. Анализ распределения температуры металла показал, что на начальной стадии процесса заготовка охлаждается с 550 до 450 °С. Ее температура в зоне прессования в момент начала выдавливания пресс-изделия составляет 330 – 340 °С. Дальнейшая деформация приводит к снижению температуры в зоне прессования до 240 – 280 °С. Поэтому для случая реализации прокатки-прессования при скорости вращения валков 4 об/мин возможна остановка процесса деформации металла.

Повышение скорости вращения валков до 8 оборотов в минуту (рисунок 2.4) существенно снижает потери тепла заготовки за счет меньшего времени ее контакта с валками и матрицей, имеющими температуру 200 °С. Так в плоскости наименьшего сечения калибра средняя температура заготовки составляет 500 °С (рисунок 2.4, *а*), а на стадии распрессовки и начала выдавливания пресс-изделия она меняется в диапазоне 410-445 °С (рисунок 2.4, *б*). Дальнейшее выдавливание приводит к снижению температуры металла в зоне прессования до 320 °С и росту температуры пресс-изделия до 375 °С (рисунок 2.4, *в*, *г*), что характерно для установившегося процесса СПП.

Сравнение величин сил, действующих на рабочие валки при различных скоростях обработки сплава 01417 (рисунок 2.5), подтверждает закономерности, отмеченные в результате анализа распределения температур. Процесс деформации заготовки при скорости вращения валков 8 об/мин осуществляется в 2 раза быстрее, при этом за счет более высоких значений температуры заготовки в зоне деформации в этом случае наблюдается снижение силы на валках на величину до 20 % по сравнению с прокаткой-прессованием при $\omega=4$ об/мин. Для реализации процесса при скорости вращения валков 4 об/мин можно рекомендовать применение комплекта валкового инструмента с увеличенной высотой гребня валка с выступом, которая обеспечит

обжатие по высоте при прокатке более 50%. Это позволит улучшить его заполнение и увеличить величину контактной площади валков с металлом.

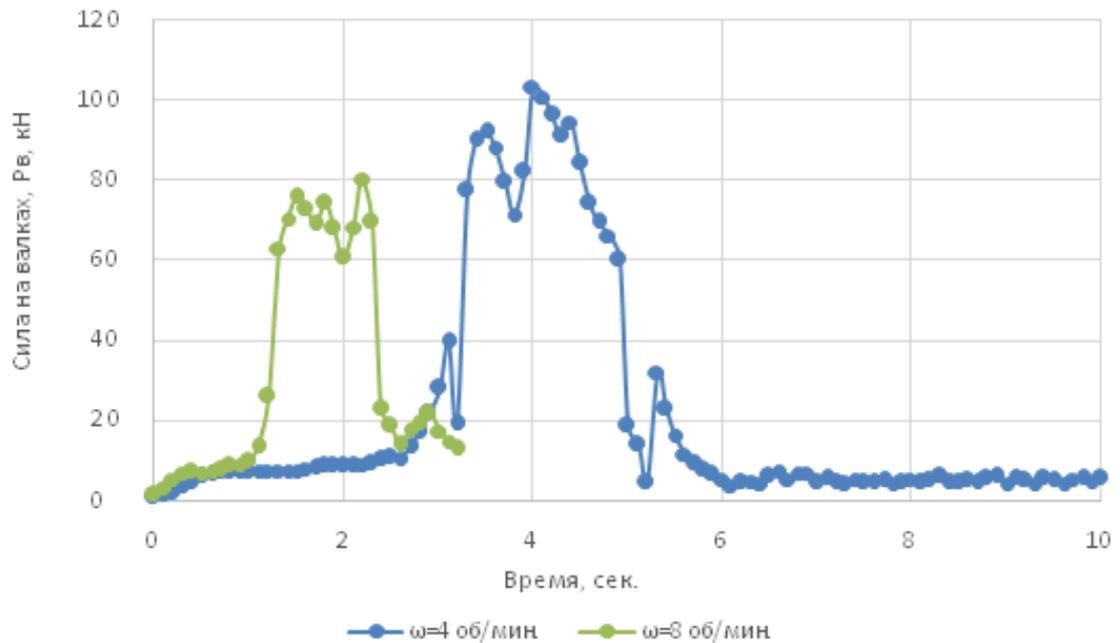


Рисунок 2.5 - График изменения силы, действующей на валки, в зависимости от времени протекания процесса СПП при различных значениях частоты вращения валков

Анализ крутящих моментов (рисунок 2.6) показал, что для обоих случаев осуществления процесса крутящий момент на валке с канавкой выше момента на валке с выступом.

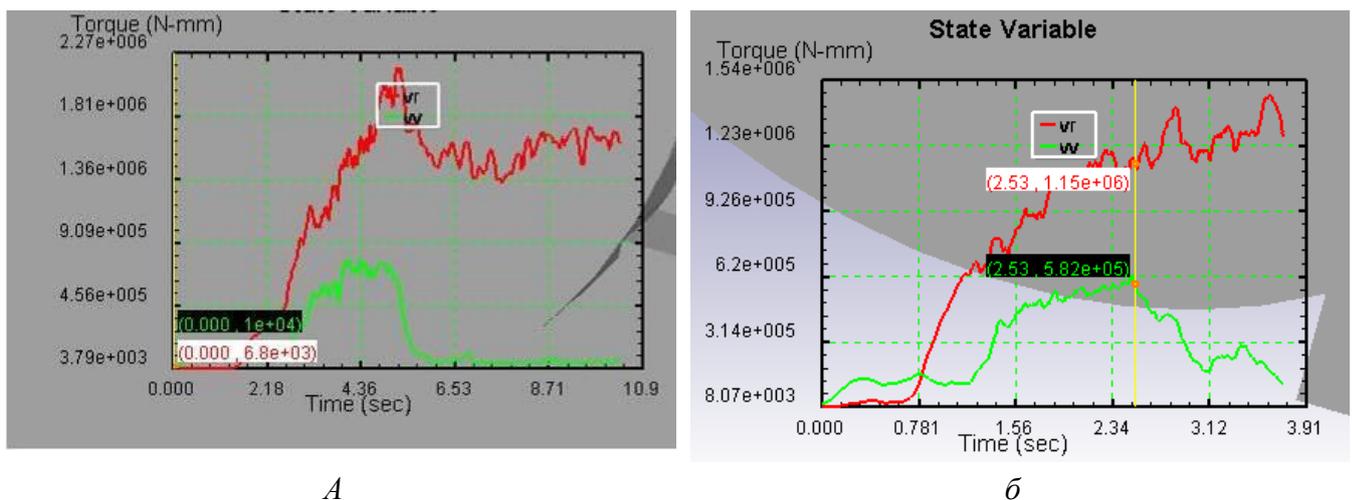


Рисунок 2.6 - График изменения крутящих момента на валке с канавкой (vr) и момента на валке с выступом (vv) при прокатке-прессовании образца из сплава 01417 диаметром 5 мм с различной скоростью вращения валков: а – $\omega = 4$ об/мин; б - $\omega = 8$ об/мин

Проанализировав полученные результаты моделирования процесса СПП заготовки диаметром 12 мм в ящичных калибрах, можно сделать следующие выводы:

- при реализации процесса с частотой вращения валков 4 об/мин в зоне прессования наблюдается существенное захолаживание заготовки и возможна остановка процесса выдавливания пресс-изделия через матрицу, что связано с недостаточной протяженностью зоны действия активных сил трения в зоне прокатки и проскальзыванием валков относительно металла, в связи с чем необходимо применение комплекта валкового инструмента с увеличенной высотой гребня валка с выступом, которая обеспечит обжатие по высоте при прокатке более 50%;
- повышение частоты вращения валков с 4 до 8 об/мин приводит к снижению энергосиловых параметров прокатки-прессования заготовки диаметром 12 мм в среднем на 20%, при этом повышается реализуемость процесса деформации металла.

Таким образом, для стабильного протекания процесса совмещенной прокатки-прессования при вытяжках до величины 15,3 на установке СПП-200 непрерывно-литой заготовки диаметром 12 мм из сплава 01417, полученной с помощью ЭМК, можно рекомендовать следующие технологические параметры режимов обработки: температура заготовки – 550 °С, температура валков и матрицы 200 °С, частота вращения валков 4–8 об/мин при заданной высоте гребня валка с выступом; обжатие по высоте при прокатке не менее 50%.

2.2. Оценка реализуемости процесса СПП при использовании заготовки круглого сечения

Как было отмечено выше, возможность осуществления процесса совмещенной прокатки-прессования при использовании заготовки круглого сечения в значительной мере отличается от деформации заготовки квадратного или прямоугольного сечения в ящичном калибре, имеющего прямоугольную форму. Получение в электромагнитном кристаллизаторе в непрерывном режиме длинномерной заготовки прямоугольного поперечного сечения нетехнологично, поэтому этим методом в настоящее время производят слитки небольшого диаметра от 12 до 24 мм круглого поперечного сечения. Прокатка таких заготовок в прямоугольном ящичном калибре возможна только при соблюдении определенных условий, так как неполное заполнение калибра приводит к снижению активных сил трения при прокатке-прессовании и не позволяет реализовать процесс выдавливания пресс-изделия, так как валки проскальзывают и не перемещают металл заготовки к матрице. На рисунке 2.7 видны следы контактного взаимодействия верхнего валка с заготовкой при отсутствии условий реализуемости процесса СПП.

Для гарантированного осуществления процесса необходимо, чтобы ширина канавки ящичного калибра была больше диаметра круглой заготовки на 5-15%, что позволяет с одной

стороны обеспечить беспрепятственную задачу нагретой заготовки в калибр, а с другой контролировать гарантированное заполнение калибра металлом по ширине. При ширине канавки по сравнению с диаметром заготовки меньше 5% вследствие расширения металла при его нагреве затрудняется задача металла в валки и ее захват валками. Для заполнения калибра при разнице между шириной канавки валка и диаметром заготовки больше 15% необходимы большие высотные обжатия при прокатке, что значительно увеличивает энергосиловые затраты при деформации металла.



Рисунок 2.7 – Круглая заготовка после прокатки-прессования в ящичном калибре

Кроме того, для реализации процесса СПП необходимо наличие на валке с выступом гребня заданной высоты, чтобы обеспечить заполнение ящичного калибра металлом по всей контактной поверхности валков и металла. Известно, что для стабильного протекания процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки прямоугольного поперечного сечения необходимо, чтобы высотное обжатие при прокатке было не менее 50% [24]. Однако это условие справедливо только для заготовок прямоугольного поперечного сечения, так как при его выполне-

нии металл гарантировано заполняет весь калибр, и активные силы трения, создаваемые контактными поверхностями валков, обеспечивают необходимое давление для стабильного протекания процесса прессования. Но при прокатке-прессовании цилиндрической заготовки перераспределение металла в калибре происходит неравномерно, и при прокатке калибр может быть заполнен не полностью. Это может приводить к снижению контактных сил трения и, как следствие, к проскальзыванию валков относительно заготовки (см. рисунок 2.7). В результате процесс прокатки-прессования 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 и площади осажённой заготовки прямоугольного сечения после прокатки в минимальном сечении калибра (см. рисунок 2.2):

$$h_k b = 0,25\pi d_0^2, \quad (2.1)$$

где h_k – высота осажённой заготовки после прокатки в минимальном сечении калибра; b – ширина канавки валка с ручьем, d_0 – диаметр исходной заготовки круглого поперечного сечения.

Тогда с учетом заданного расстояния между бочками валков (величина зазора между валками) δ , высоту гребня валка с выступом можно найти по следующей формуле:

$$h_r = \delta + d_0 - \frac{0,25\pi d_0^2}{b}, \quad (2.2)$$

где h_r – высота гребня валка с выступом.

А условие реализуемости процесса СПП запишется в виде

$$h_{r3} \geq h_r, \quad (2.3)$$

где h_{r3} – экспериментальное значение высоты гребня валка, заложенное в конструкции установки совмещённой обработки.

Покажем последовательность применения полученной формулы для оценки реализуемости процесса СПП. Для этого примем, что деформация осуществляется на установке СПП-200 (таблица 2.3) в экспериментальном калибре, имеющем минимальные размеры 7x14 мм, а в качестве заготовки используется непрерывнолитой прутки диаметром 12 мм. Величина зазора между валками δ составляет 2 мм.

Тогда расчет по формуле (2.2) показывает, что высота гребня валка при этих условиях равна 6,5 мм. Сравнивая полученное значение с экспериментальными данными, получим $h_{r3} > 6,5$. Таким образом, условие (2.3) при заданных параметрах (см. таблицу 2.3) для установ-

ки СПП-200 выполняется и процесс реализуем. Следует отметить, что данный вывод был подтвержден при проведении экспериментальных исследований на установке СПП-200 (глава 3).

Таблица 2.3 – Параметры процесса совмещенной прокатки-прессования для различных установок

Параметры	СПП-200	СПП-400
Диаметр валка с канавкой D_2 , мм	167	385
Диаметр валка с выступом D_1 , мм	214	385
Высота гребня валка с выступом $h_{гв}$, мм	7	8
Частота вращения валков n , об/мин	4, 8	4, 8
Диаметр заготовки d_0 , мм	12	12; 18
Величина зазора между валками δ , мм	2	2
Степень деформации по высоте при прокатке ε , %	50	50
Диаметр заготовки d_0 , мм	12	12; 18
Диаметр матрицы d_m , мм	5	5; 9
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20	20; 26
Коэффициент вытяжки при прессовании μ	6,5 - 15,3	6,5 - 27,2
Размеры калибра в наименьшем сечении hxb , мм	7×15	7×15; 10×21
Скорость деформации ξ , с ⁻¹	0,5; 1,5	0,5; 1,5
Усилие гидроприжима, кН	300	400
Температура заготовки T_3 , °С	480; 550	480; 550

Аналогичные расчеты для установки СПП-400 при заданных параметрах (см. таблицу 2.2) с размерами калибра в наименьшем сечении 10×21 мм для заготовки диаметром 12 мм дают следующие результаты. Рассчитанная высота гребня при этих условиях равна 8,6 мм. Сравнивая полученное значение с экспериментальными данными, получим $h_{гв} < 8,6$. Так как условие (2.3) не выполняется, процесс СПП при этих параметрах неосуществим. Поэтому в дальнейших исследованиях на промышленной линии СПП-400 использовали непрерывнолитую заготовку диаметром 18 мм. В этом случае расчетная высота гребня валка экспериментального калибра с размерами в минимальном сечении 10×21 мм равна 7,9 мм, $h_{гв} > 7,9$, что дает право утверждать о гарантированной реализации процесса СПП при этих параметрах.

2.3. Экспериментально-аналитическая оценка силовых параметров процесса СПП

Для расчета силовых параметров использовали данные по реологическим свойствам сплава 01417 (см. рисунок. 2.1), а силу, подводимую валками, определяли по формуле [24]

$$P_B = \psi \sigma_s (F_1 + F_2), \quad (2.4)$$

где ψ – показатель трения по Зибелю; σ_s – сопротивление металла деформации); F_1 – площадь контакта заготовки с гребнем верхнего валка и с дном ручья нижнего валка; F_2 - площадь контакта заготовки со стенками калибра.

Для расчёта площади контакта заготовки с гребнем верхнего валка и с дном ручья нижнего валка на стадии установившегося течения и при условии полного заполнения металлом зоны перед матрицей применяли следующую формулу

$$F_1 = 0,017 D b (\alpha + \beta), \quad (2.5)$$

где D – средний диаметр валков, α - угол захвата металла валками; β – угол отстояния зеркала матрицы от общей оси валков [24].

Площадь контакта заготовки со стенками калибра находили по выражению

$$F_2 = 0,017 D h (\alpha + \beta), \quad (2.6)$$

где h – минимальная высота калибра.

Силу, подведенную с помощью валков, можно определить по формуле

$$P_B = 0,017 \sigma_s D \left(\sqrt{\frac{\Delta h}{0,5D}} + \beta \right) (b + h) \quad (2.7)$$

Силу, необходимую для истечения металла через калибрующее отверстие матрицы при прессовании, рассчитывали по формуле

$$P_M = 2,577 \sigma_s F_M \ln \mu + 1,57 \sigma_s \mu r_M l_{\Pi}, \quad (2.8)$$

где μ – коэффициент вытяжки; $r_M = 0,5 d_M$ – радиус калибра матрицы; l_{Π} – величина рабочего пояса матрицы; F_M - площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы

Формулы (2.7) и (2.8) позволяют рассчитать силовые параметры процесса СПП без учета двух факторов:

- захлаживание металла при контактировании его с валковым и прессовым инструментом;
- возникновение дополнительных силовых нагрузок на инструмент при проникновении металла в зазор между матрицей и валками и образовании заусенца («уса»).

Для учета первого фактора предлагается сопротивление деформации определять в зависимости от изменения температуры как среднюю величину [82]

$$\sigma_{\text{ср}} = 0,5(\sigma_{s0} + \sigma_{s1}), \quad (2.9)$$

где σ_{s0} - сопротивление деформации металла при начальной температуре нагрева заготовки, σ_{s1} - сопротивление деформации при минимальной температуре металла в очаге деформации.

Для учета второго фактора предлагается ввести коэффициент k_3 , учитывающий размеры заусенца и его температуру. Многочисленные экспериментальные исследования [24] показали, что для условий прокатки-прессования на установках совмещенной обработки образование заусенца, имеющего низкую температуру, может приводить к значительному увеличению нагрузки, а в некоторых случаях и к остановке процесса (при $k_3 > 3$). Поэтому предлагается этот коэффициент выбирать в пределах $k_3 = 1,5-3,0$.

Тогда формула для определения силы, действующей на валки, приобретет вид

$$P_{\text{в}} = 0,017k_3\sigma_{\text{ср}}D\left(\sqrt{\frac{\Delta h}{0,5D}} + \beta\right)(b+h). \quad (2.10)$$

А формула для расчета силы, действующей на матрицу, будет иметь вид

$$P_{\text{м}} = 1,57k_3\sigma_{\text{ср}}(1,642F_{\text{м}}\ln\mu + \mu r_{\text{м}}l_{\text{п}}). \quad (2.11)$$

Расчет сил, возникающих на валках и матрице, проводили по этим формулам при различных геометрических и технологических параметрах процесса для двух установок совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400, приняв на первом этапе допущение, что размеры калибров одинаковы (см. таблицу 2.3).

Поскольку основной задачей расчета энергосиловых параметров является оценка силовой нагрузки на инструментальный узел установок совмещенной прокатки-прессования при прессовании прутка диаметром 5 мм, входные и расчетные параметры в таблицах 2.4 и 2.5 приведены более подробно.

Результаты расчета силовых параметров при получении прутков из сплава 01417 для различных установок сведены в таблицу 2.6, а их графические зависимости от степени и скорости деформации и температуры представлены на рисунках 2.8, 2.9. Для исследуемого сплава максимальные значения силовых параметров обработки на установке СПП-200 возможно обеспечить при скорости деформации $1,5 \text{ с}^{-1}$ и температуре нагрева заготовки $T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$, а низкая температура обработки может привести в дальнейшем к получению механических и электрических свойств прутков, не соответствующих требованиям технических условий на проволоку из сплава 01417 [83].

Таблица 2.4 - Параметры процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки из сплава 01417 диаметром 5 мм для установки СПП-200

Входные параметры				
Температура заготовки	$T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$	
Скорость деформации ξ , c^{-1}	0,5	1,5	0,5	1,5
Диаметр вала с канавкой D_2 , мм	167	167	167	167
Диаметр вала с выступом D_1 , мм	214	214	214	214
Диаметр заготовки d_0 , мм	12	12	12	12
Минимальная высота калибра h , мм	7	7	7	7
Ширина калибра b , мм	15	15	15	15
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20	20	20	20
Диаметр прессуемого прутка d_m , мм	5	5	5	5
Угол наклона зеркала матрицы θ , град	90	90	90	90
Длина калибрующего пояска матрицы l_n , мм	2	2	2	2
Частота вращения валков n , об/мин	4	8	4	8
Геометрические и технологические параметры				
Средний диаметр D , мм	191	191	191	191
Обжатие при прокатке Δh , мм	5	5	5	5
Коэффициент вытяжки при прессовании μ	15,3	15,3	15,3	15,3
Площадь контакта заготовки со стенками калибра F_2 , мм^2	1031	1031	1031	1031
Площадь контакта заготовки с катающими поверхностями валков F_1 , мм^2	1470	1470	1470	1470
Площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы F_M , мм^2	300	300	300	300
Расчетные силовые параметры				
Сила, подводимая валками P_v , кН	572	673	314	382
Сила, действующая на матрицу P_M , кН	362	426	199	241

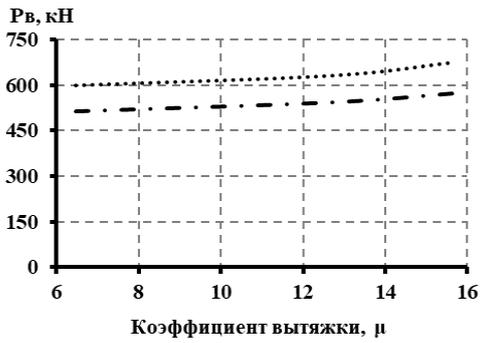
Рекомендуемая температура заготовки, таким образом, должна быть равна $550 \text{ }^\circ\text{C}$, а скорость деформации не более $0,5 \text{ c}^{-1}$. Повышение температуры сверх этого значения уменьшат силовую нагрузку оборудования, но при этом, особенно при высоких скоростях деформации, возможно появление температурных трещин при прессовании.

Аналогичные выводы можно сделать и для деформации металла на установке СПП-400.

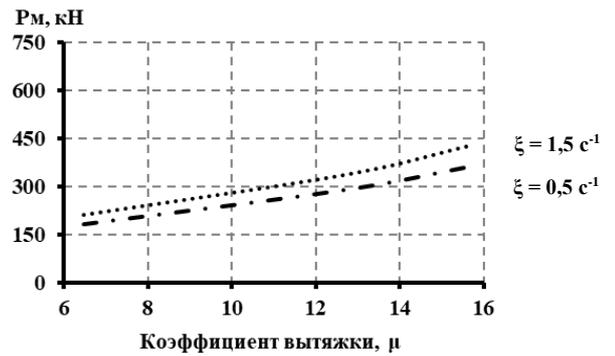
Таблица 2.5 - Параметры процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки из сплава 01417 диаметром 5 мм для установки СПП-400

Входные параметры				
Температура заготовки	$T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$	
Скорость деформации ξ , c^{-1}	0,5	1,5	0,5	1,5
Диаметр вала с канавкой D_2 , мм	385	385	385	385
Диаметр вала с выступом D_1 , мм	385	385	385	385
Диаметр заготовки d_0 , мм	12	12	12	12
Ширина калибра b , мм	15	15	15	15
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20	20	20	20
Минимальный зазор между валками h , мм	7	7	7	7
Длина калибрующего пояса матрицы l_n , мм	2	2	2	2
Диаметр прессуемого прутка d_m , мм	5	5	5	5
Угол наклона зеркала матрицы θ_1 град	90	90	90	90
Частота вращения валков n , об/мин	4	8	4	8
Геометрические и технологические параметры				
Средний диаметр D , мм	385	385	385	385
Обжатие при прокатке Δh , мм	5	5	5	5
Коэффициент вытяжки при прессовании μ	15,3	15,3	15,3	15,3
Площадь контакта заготовки со стенками калибра F_2 , мм^2	1474	1474	1474	1474
Площадь контакта заготовки с катающими поверхностями валков F_1 , мм^2	2086	2086	2086	2086
Площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы F_m , мм^2	300	300	300	300
Расчетные силовые параметры				
Сила, подводимая валками P_B , кН	814	958	447	543
Сила, действующая на матрицу P_M , кН	362	426	199	241

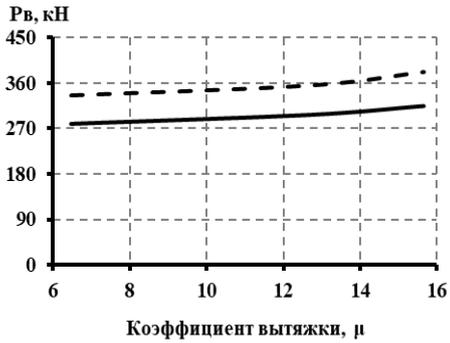
Полученные значения сил на валках и матрице при этих параметрах не превышают допустимых значений силовой загрузки для установок СПП-200 и СПП-400 (см. таблицу 2.3), а, следовательно, они подходят для планирования и проведения экспериментальных исследований по изготовлению опытных образцов из сплава 01417 диаметром 5 мм.



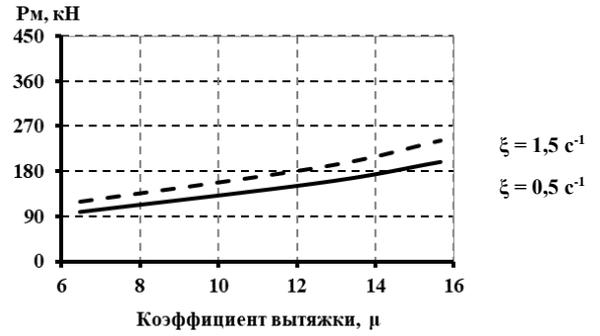
а



б

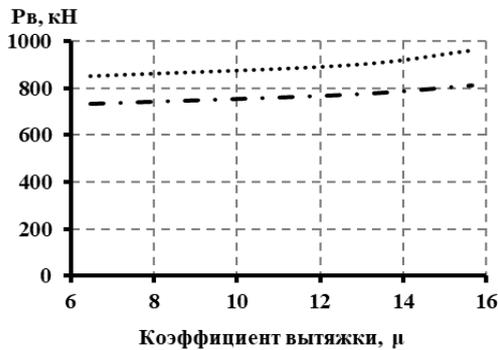


в



г

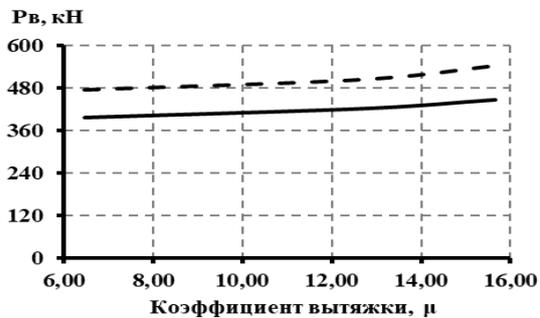
Рисунок 2.8 – Графики зависимости расчётных значений сил, действующих на валки (а, в) и матрицу (б, г) от коэффициента вытяжки для прутков из экспериментального сплава при температуре заготовки 480 °С (а, б) и 550 °С (в, г) для установки СПП-200



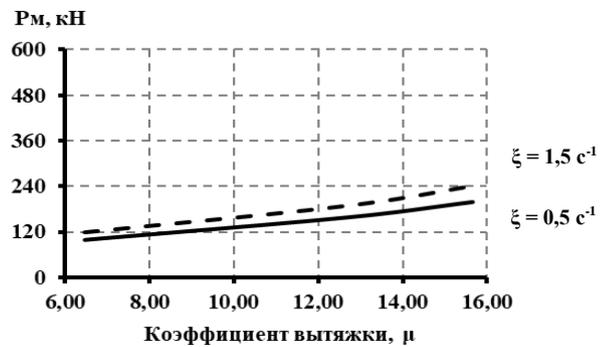
а



б



в



г

Рисунок 2.9 – Графики зависимости расчётных значений сил, действующих на валки (а, в) и матрицу (б, г) от коэффициента вытяжки для прутков из экспериментального сплава при температуре заготовки 480 °С (а, б) и 550 °С (в, г) для установки СПП-400

Таблица 2.6 - Значения силовых параметров процесса СПП на различных установках при одинаковых размерах калибра в минимальном сечении 7x15 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							
$\xi = 0,5 \text{ c}^{-1}$	$P_B, \text{ кН}$	515	543	572	279	297	314
	$P_M, \text{ кН}$	182	289	362	99	158	199
$\xi = 1,5 \text{ c}^{-1}$	$P_B, \text{ кН}$	599	631	673	334	355	382
	$P_M, \text{ кН}$	212	336	426	118	189	241
Установка СПП-400							
$\xi = 0,5 \text{ c}^{-1}$	$P_B, \text{ кН}$	732	773	814	397	422	447
	$P_M, \text{ кН}$	182	289	362	99	158	199
$\xi = 1,5 \text{ c}^{-1}$	$P_B, \text{ кН}$	852	898	958	476	505	543
	$P_M, \text{ кН}$	212	336	426	118	189	241

В результате расчетов установлено, что сила, действующая на валки, при обработке на установке СПП-400 выше, чем на установке СПП-200. Это объясняется тем, что катающие диаметры валков в этом случае больше, а соответственно, больше и длина контактной поверхности валков с металлом. Рассчитанные при температуре заготовки $T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$ и скорости деформации $\xi = 1,5 \text{ c}^{-1}$ значения силы, действующей на матрицу, достигают $P_M = 426 \text{ кН}$. Это означает, что для условий обработки круглой заготовки на установках СПП-200 и СПП-400 прижимного усилия (см. таблицу 2.3) не хватит для поджима матрицы и процесс окажется энергетически неосуществим, поэтому рекомендуется выбирать температуру $T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом максимальная сила, необходимая для выдавливания прутка диаметром 5 мм, не превысит 241 кН. На втором этапе исследований решалась задача оценки силовых параметров процесса СПП при различных размерах калибров и матриц (таблица 2.7), соответствующих реальным экспериментальным условиям.

Таблица 2.7 – Параметры процесса совмещенной прокатки-прессования

Параметры	СПП-200	СПП-400
Диаметр валка с канавкой, мм	167	385
Диаметр валка с выступом, мм	214	385
Размеры калибра, мм	7x15	10x21
Диаметр заготовки, мм	12	18
Высота зеркала матрицы, мм	20	26
Степень деформации при прокатке, %	50	50
Температура заготовки, $^\circ\text{C}$	480; 550	480; 550
Коэффициент вытяжки	6,5; 15,3; 27,8	6,5; 15,3; 27,8
Скорость деформации, c^{-1}	0,5; 1,5	0,5; 1,5

На рисунке 2.10 приведены в сопоставлении графики расчетных силовых параметров процесса непрерывного прессования для лабораторных условий обработки на установке СПП-200 и для промышленных условий на установке СПП-400 при различных размерах калибров. Видно, что для установки СПП-400 рекомендуемые параметры для проведения экспериментальных исследований ($T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$, $\xi = 0,5 \text{ c}^{-1}$) во всем диапазоне варьируемых значений вытяжки обеспечивают оптимальную силовую нагрузку оборудования.

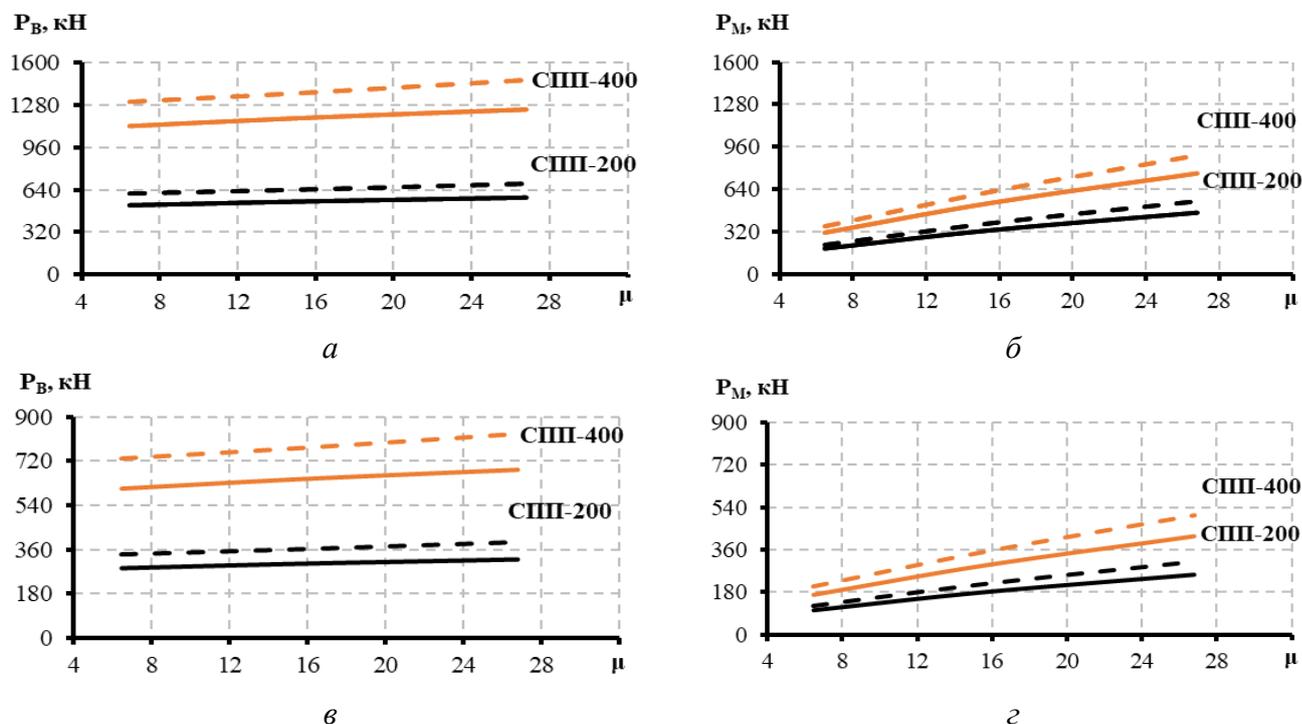


Рисунок 2.10 – Графики изменения силовых параметров процесса СПП для установок СПП-200 и СПП-400 при различных размерах калибров: $a, б - T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$; $в, г - T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$; — $\xi = 0,5 \text{ c}^{-1}$; - - - $\xi = 1,5 \text{ c}^{-1}$

На основании проведенных расчетов подготовлены технологические рекомендации для проведения лабораторных испытаний на установке СПП-200 (глава 3) и опытно-промышленных исследований (глава 4) по изготовлению прутков из сплава 01417 на установке СПП-400 с использованием непрерывнолитых заготовок различного диаметра, полученных с помощью электромагнитного кристаллизатора.

2.4. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла

Анализ технических решений по способам и конструкциям устройств для совмещенных процессов с использованием операций непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения [84-100] показал, что для реализации процесса совмещенной обработки непрерывнолитой заготовки, получаемой с помощью ЭМК, можно использовать установку по патенту [85].

Для реализации разработанных технологических режимов было предложено новое техническое решение, патентуемое в настоящее время. Технической задачей являлось повышение реализуемости процесса прокатки-прессования за счет увеличения контактного трения на границе валки – заготовка, что позволит обеспечить стабильный процесс выдавливания металла вследствие гарантированного заполнения калибра металлом при прокатке, то есть осуществить возможность обработки малопластичных сплавов с повышенным уровнем механических свойств.

В качестве типового устройства для получения изделий совмещенным методом непрерывного литья, прокатки и прессования можно использовать установку по патенту [84]. Рассмотренная установка имеет известные преимущества, но ее применение не позволяет обрабатывать малопластичные алюминиевые сплавы, такие как АК5, АК12, 01417 и др. Предъявляемые особые требования к свойствам металла литой заготовки и к ее пластическим и прочностным характеристикам, влияют на эксплуатационные свойства конечного изделия. Традиционные методы литья не в состоянии обеспечить высокую пластичность слитков из указанных сплавов, что делает невозможным их последующую деформационную обработку.

На основе этого типового устройства авторами патента [85] предложено использовать для получения непрерывнолитой заготовки высокого качества электромагнитный кристаллизатор. Тогда, помимо достижения необходимых свойств и структуры металла заготовки, решается задача организации непрерывного процесса обработки металла в одной линии, начиная с литья в ЭМК, непрерывного прессования прутка методом СПП и заканчивая калибровкой готового пресс-изделия и смоткой его в бухту (рисунок 2.11).

С целью ее использования для прокатки заготовки круглого поперечного сечения предложено усовершенствовать деформирующий узел установки, изготовив ящичный калибр, у которого ширина канавки валка с ручьем больше диаметра заготовки на 5-15%, а гребень валка с выступом выполнять заданной высоты с учетом расстояния между бочками валков, рассчитав ее по формуле (2.2).

Для экспериментальной проверки данного технического решения длинномерную цилиндрическую заготовку из сплава 01417 диаметром 12 мм отлили с помощью электромагнитного кристаллизатора специальной конструкции [54] при температуре 780 °С. Получение прутка диаметром 5 мм производили на установке совмещенной прокатки-прессования СПП-200 со скоростью вращения 4 об/мин в закрытом калибре с размерами в минимальном сечении 7x15 мм. Нагрев валков и матрицы проводили до температуры 200 °С, а заготовки до 550 °С. В первом случае обжатие по высоте составляло 30%, и процесс СПП в этом случае не был реализован (см. рисунок 2.7), так как калибр при прокатке был заполнен неполностью, и чтобы выдавить металл через матрицу активных сил трения было недостаточно.

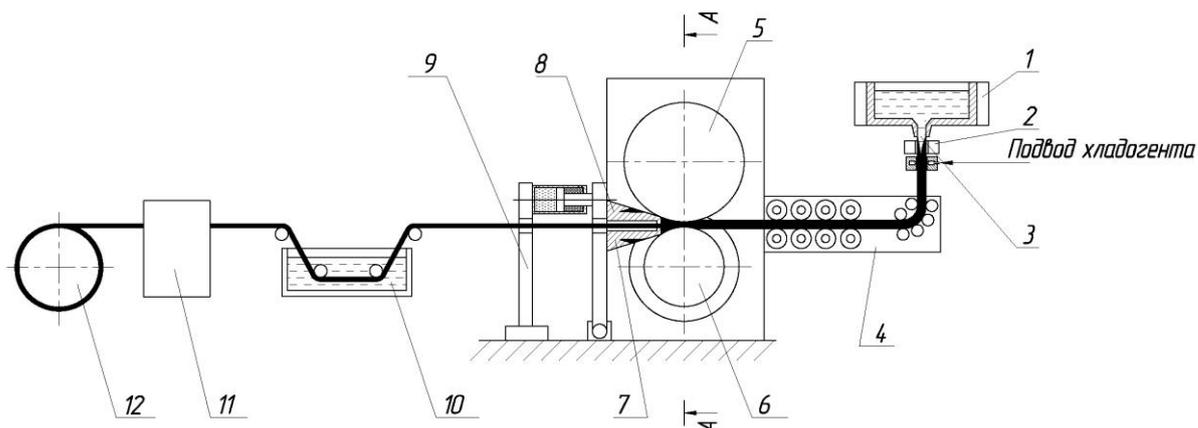


Рисунок 2.11 – Общий вид установки для непрерывного литья, прокатки и прессования:
 1 – миксер; 2 – ЭМК; 3 – система питателей; 4 – задающее устройство; 5 – валок с выступом;
 6 – валок с ручьем; 7 – матрица; 8 – клиновидные полости для подвода хладагента;
 9 – гидроцилиндр; 10 – емкость для охлаждения; 11 – прокатная клеть; 12 – моталка

После расчетов по предлагаемой формуле (2.2) увеличили высоту гребня валка, тем самым увеличив высотное обжатие при прокатке до 56%. В результате процесс выдавливания в этом случае был успешно реализован, а полученные пресс-изделия имели высокий уровень пластических и прочностных свойств. Из полученного прутка методом волочения изготовили проволоку диаметром 0,5 мм. Механические свойства полуфабрикатов испытаны в соответствии с ГОСТ-1497-84, удельное электрического сопротивление по ГОСТ-7229-76. Механические и электрические свойства полуфабрикатов по технологическим переделам представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Свойства полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением предлагаемого технического решения

Вид изделия	Свойства		
	σ_b , МПа	δ , %	ρ , Ом·мм ² /м
Литая заготовка диаметром 12 мм	159	23,0	-
Пруток диаметром 5 мм	176	20,1	0,03183
Проволока диаметром 0,5 мм	152	13,0	0,02924
Проволока диаметром 0,5 мм ТУ 1-809-1038-2018 в отожженном состоянии	143	8,0	0,03200

2.5. Выводы по главе

1. На установке горячего скручивания определены реологические характеристики непрерывнолитых заготовок диаметром 12 мм из сплава 01417, полученных с помощью электромагнитного кристаллизатора
2. С использованием полученных реологических характеристик проведено компьютерное моделирование в программном пакете DEFORM-3D совмещенной прокатки-прессования прутка диаметром 5 мм из сплава 01417 на установке СПП-200 из заготовки диаметром 12 мм, в результате чего определены особенности формоизменения металла при различных температурно-скоростных условиях процесса и рекомендованы следующие технологические параметры режимов обработки: температура заготовки – 550 °С; температура валков и матрицы 200 °С; частота вращения валков 4-8 об/мин; обжатие при прокатке не менее 50%.
3. Предложена методика определения реализуемости процесса СПП при использовании заготовки круглого сечения и выполнена аналитическая оценка сил, действующих на валки и матрицу для лабораторных и промышленных условий совмещенной прокатки-прессования заготовок круглого сечения из сплава 01417 на установках СПП-200 и СПП-400.
4. На основании проведенных расчетов силовых параметров для получения деформированных полуфабрикатов диаметром 5 мм из сплава 01417 методом совмещенной прокатки-прессования в промышленных условиях на установке СПП-400 рекомендован следующий режим обработки: температура нагрева заготовки 550 °С; температура нагрева инструмента 100-200 °С; частота вращения валков 2-4 об/мин; обжатие при прокатке не менее 50%.
5. Для прокатки заготовок круглого поперечного сечения предложено новое техническое решение на конструкцию установки для непрерывного литья, прокатки и прессования металла, отличительной особенностью которого является усовершенствование деформирующего узла установки, заключающееся в выполнении ящичного калибра с шириной канавки валка с ручьем больше диаметра заготовки на 5-15%, а высоту гребня валка с выступом с учетом заданного расстояния между бочками валков рекомендуется определять по формуле (2.2).

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ СПЛАВА 01417 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ И ВОЛОЧЕНИЯ

Одной из актуальных задач алюминиевой промышленности является получение проволоки из малопластичных сплавов на основе алюминия с применением методов непрерывного прессования для нужд авиационно-космической отрасли. Для получения тонкой проволоки необходимо получать заготовку для волочения диаметром 9,5 – 12 мм. По традиционной технологии ее получают методом непрерывного литья и сортовой прокатки на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) [101]. Современными способами получения такой заготовки являются методы непрерывного прессования, наиболее развитыми из которых являются метод Конформ [25] и метод совмещенной прокатки-прессования (СПП) [24]. Ниже приведены результаты исследований особенностей применения этих методов для получения заготовки под волочение проволоки из сплава 01417 с повышенным уровнем механических и электрических свойств. Для достижения требуемых эксплуатационных свойств такой проволоки разработаны технологические режимы непрерывного прессования и волочения, а также определены параметры промежуточных и конечных отжигов металла. Результаты исследований опубликованы в работах [102-109].

3.1. Изучение влияния скорости и температуры литья на структуру и свойства заготовок из сплава 01417, полученных методом электромагнитной кристаллизации

Анализ внешнего вида литых прутков диаметром 12 мм показывает, что они имеют блестящую поверхность с чередующимися небольшими волнами по всей длине (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Непрерывнолитые прутки из сплава 01417 диаметром 12 мм, полученные в ЭМК с различной скоростью литья: 1 – 14,5 мм/с, 2– 10,8 мм/с, 3 – 7,4 мм/с, 4 – 4,4 мм/с

Химический состав экспериментального сплава, и полученных прутков на его основе представлен в таблице 3.1.

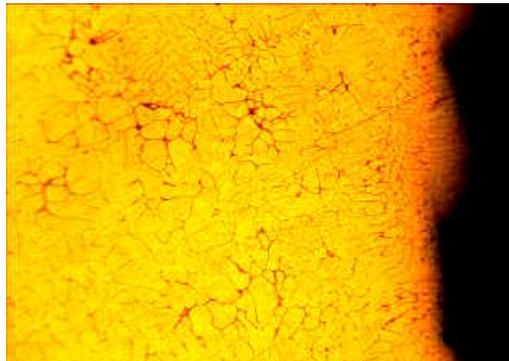
Таблица 3.1 - Химический состав сплава 01417

Содержание элементов, мас. %						
La	Ce	Pr	Fe	Si	Sm	Al
2,3-2,6	4,4-4,7	0,1	0,2	0,1	0,1	Основа

На рисунке 3.2 представлен вид литого прутка, полученного методом литья в ЭМК. Следует отметить, что поверхность прутка, отлитого в ЭМК, достаточно гладкая, блестящая, но по длине недостаточно ровная (рисунок 3.2, *а*).



а



б

Рисунок 3.2 - Внешний вид литого прутка (*а*), полученного методом литья в ЭМК, и его микроструктура (*б*) с локальным поверхностным дефектом, х200

Микроструктуру металла исследовали с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении 200 крат. Анализ микроструктуры показал, что металлургических дефектов в виде окисных плен, неметаллических включений в структуре исследуемых образцов нет. Однако в структуре образца был обнаружен дефект в виде повреждения поверхностной корочки металла, где наблюдается укрупнение дендритной ячейки и разноструктурность, что может свидетельствовать о локальном подплавлении металла в процессе кристаллизации слитка (рисунок 3.2, *б*).

Необходимо отметить, что поверхность прутков при литье в электромагнитный кристаллизатор формируется оксидной пленой, образующейся уже на горизонтальном участке зеркала расплава в кристаллизаторе. В силу принятой схемы подачи расплава в кристаллизатор и направленности движения его под действием электромагнитных сил оксидная пленка вместе с потоком металла стекает на поверхность отливаемого прутка. Вследствие теплоизлучения с открытой поверхности расплава в кристаллизаторе и влияния подхолаживания за счет опережающего продвижения фронта охлаждения в переходной зоне, примыкающей к поверхности отливаемого прутка на оксидной плене, как на подложке, имеет место ячеистая структура. В сплавах ячеистая кристаллизация сопровождается накоплением примесей перед растущими кристаллами и оттоком легкоплавких составляющих к поверхности литого прутка для восполнения их усадки. Это делает оксидную плену литого прутка достаточно подвижной, что способствует получению высококачественной поверхности.

Литые прутки при таком же сложном химическом составе отличаются минимальным дендритным параметром, который сопоставим с размером дендритных ячеек в гранулах, т.е. 6-12 мкм, и тонкими дисперсными выделениями частиц неравновесных фаз.

Литьем прутков диаметром 9,5-12 мм в электромагнитный кристаллизатор достигается получение практически идеальной однородной по сечению и длине изделий структуры с размером дендритной ячейки в 100 раз меньше, чем при литье в кокиль с низкой скоростью охлаждения. Таким образом, литые прутки диаметром 9,5-12 мм с качественной поверхностью, полученные в электромагнитном поле в результате бесконтактного формообразования и интенсивности охлаждения за счет приближения подачи воды к фронту кристаллизации, в дальнейшем могут быть подвергнуты интенсивной пластической деформации с помощью методов непрерывного прессования.

Для подтверждения этого вывода провели исследования влияния скорости литья на структуру и свойства непрерывнолитых образцов диаметром 12 мм (см. рисунок 3.1), отлитых в ЭМК при температуре литья 670, 740 и 780 °С с разной скоростью: № 1 – 14,5 мм/с, № 2 – 10,8 мм/с, № 3 – 7,4 мм/с, № 4 – 4,4 мм/с. Микроструктуру исследовали с помощью оптических микроскопов марок «Olympus» и «Neophot» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличениях 200, 500 и 1000 крат. Образцы исследованы до травления и после травления в реактиве Келлера. Электропроводность определяли с помощью прибора ВЭ 17НЦ, а твердость по Бринеллю - на приборе ТШ-2М стальным шариком диаметром 5 мм при нагрузке 250 кг. Испытания для определения механических свойств проводили на универсальной испытательной машине LFM 20 усилием 400 кН.

Результаты исследования микроструктуры этих литых прутков (рисунок 3.3) показывают, что она однородна, дисперсна по всему сечению, в ней отсутствуют первичные интерме-

таллиды. Микроструктура представляет собой α -твердый раствор, по границам дендритных ячеек которого располагается дисперсная эвтектика ($\alpha + Al_nMe$). При этом следует отметить высокую плотность структуры, особенно это свойственно пруткам, отлитым при скорости литья 7,4 мм/с - 14,5 мм/с. С понижением температуры литья внутреннее строение зерна огрубляется: более толстыми становятся ветви дендритов и несколько увеличивается параметр дендритной ячейки вследствие снижения скорости кристаллизации при литье с более низких температур.

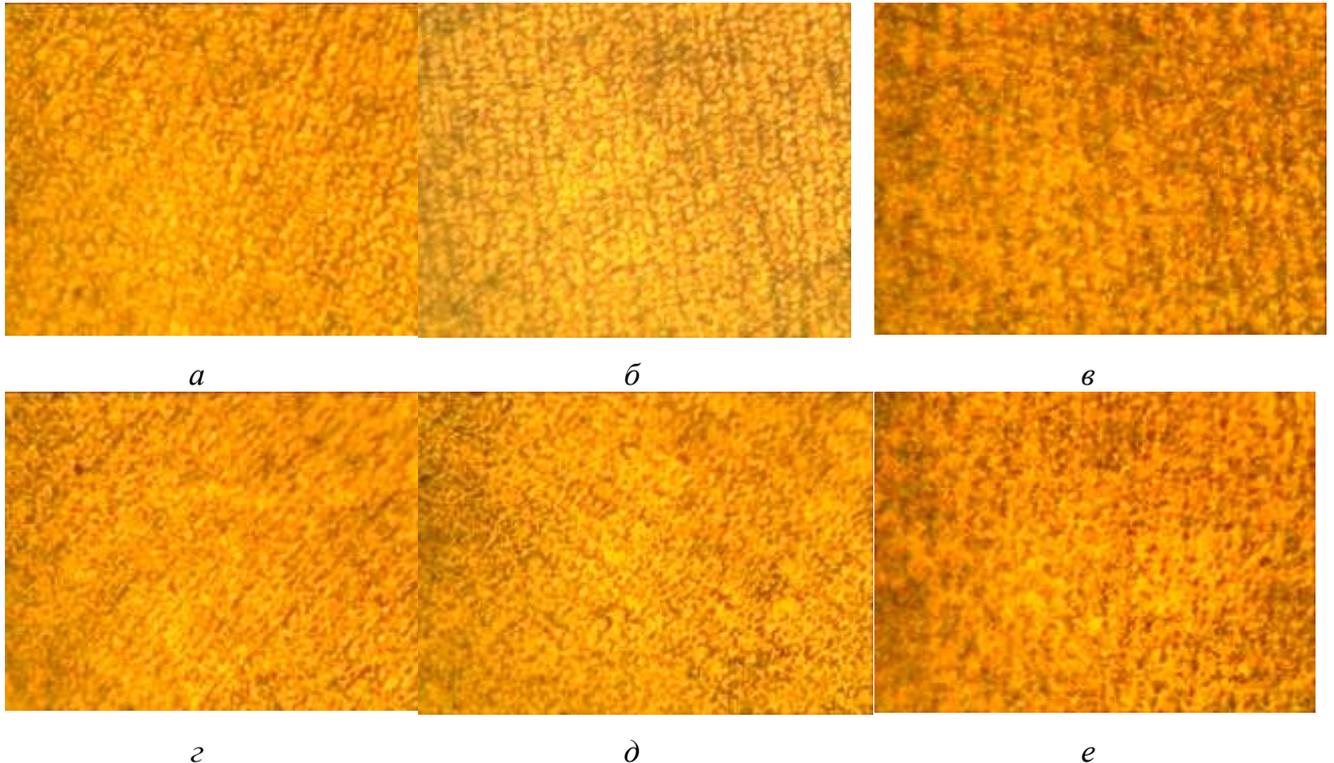


Рисунок 3.3 - Микроструктура слитков диаметром 12 мм, отлитых при разных температурах $T_{л}$ и отожженных при температурах 400 °С с выдержкой 2 часа (а-в) и 550 °С с выдержкой 8 часов (г-е): а, г – $T_{л}=670$ °С; б, д – $T_{л}=740$ °С; в, е – $T_{л}=780$ °С, $\times 1000$

Замер дендритного параметра на прутках сплава 01417, полученных при разных скоростях литья от 4,4 до 14,5 мм/с, свидетельствует о том, что наблюдается закономерное его измельчение при увеличении скорости литья (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Размер дендритной ячейки и электропроводность прутков диаметром 12 мм в зависимости от скорости литья в ЭМК

Скорость литья $V_{л}$, мм/с	Размер дендритной ячейки, мкм	Электропроводность, МСм/м
4,4	8,7	26,8
7,4	7,0	25,4
10,8	4,4	22,3
14,5	4,1	21,5

Наименьший размер дендритной ячейки (4,1 - 4,4 мкм) получен при скорости литья 10,8 - 14,4 мм/с. Снижение скорости литья до 4,4 мм/с приводит к увеличению дендритного параметра до 8,7 мкм. 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. В основном по сечению имеет место крупнозернистая и вытянутая от периферии к центру прутка структура. Размер зерна колеблется от 337 мкм до 1410 мкм. Высокие степени деформации с такой неоднородной и крупнозернистой структурой при волочении прутков невозможно обеспечить, поэтому необходим этап горячей деформации, для чего лучше всего подходят методы непрерывного прессования.

Свойства полученных литых прутков приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Физико-механические свойства литых прутков диаметром 12 мм

Скорость литья	Свойства			
	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость по Бринеллю, HBW
4,4 мм/с	172	91	19,0	43,7
	170	88	23,8	
	173	89	24,2	
7,4 мм/с	190	120	23,6	47,5
	186	102	23,2	
	189	104	21,8	
10,8 мм/с	205	109	17,2	51,9
	205	111	12,8	
	205	109	21,9	
14,5 мм/с	210	110	15,5	51,9
	205	105	12,4	
	205	111	13,6	

Анализ данных показывает, что прочностные свойства литых прутков растут с увеличением скорости литья от 4,4 мм/с до 14,5 мм/с, а относительное удлинение прутков снижается (12,4 – 16,0 %). Сопоставимый уровень механических свойств имеют горячепрессованные прутки из гранул сплава 01417, полученные с высоким коэффициентом вытяжки ($\mu=55$). В связи с тем, что сплав 01417 отличается повышенной электропроводностью ввиду малой растворимости РЗМ в алюминии, было проведено определение электропроводности на прутках, отлитых с разной скоростью. Установлено, что электропроводность снижается с увеличением скорости литья от 4,4 мм/с до 14,5 мм/с, что можно объяснить уменьшением объемной доли α -твердого раствора.

Таким образом, непрерывнолитые прутки диаметром 12 мм, отлитые в ЭМК, имеют блестящую поверхность с чередующимися небольшими поверхностными складками по всей длине. Микроструктура исследуемых прутков свойственна гранулируемым сплавам Al-PЗМ, полученным с высокими скоростями охлаждения (до 10^3 °C/c).

При такой скорости охлаждения прутки, отлитые в ЭМК, кристаллизуются по метастабильной диаграмме состояния, имеют квазиэвтектическую структуру, без первичных интерметаллидов. С повышением скорости литья до 14,5 мм/с наблюдается закономерное измельчение дендритного параметра литых прутков. Установлено, что в прутках диаметром 12 мм сплава 01417, отлитых в ЭМК со скоростью 14,5 мм/с, практически отсутствует дендритная ликвация. Такого эффекта не было достигнуто ни при одном из существующих методов литья, в т.ч. при получении гранулируемых алюминиевых сплавов. Размер зерна в литых прутках сплава 01417 колеблется от 337 мкм до 1410 мкм. Полученные прутки имеют уровень прочностных свойств, который свойственен горячепрессованным пруткам алюминиевого сплава 01417, полученного по гранульной технологии, причем отпрессованным с высоким коэффициентом вытяжки. С повышением скорости литья до 14,5 мм/с, наблюдается повышение временного сопротивления разрыву прутков в литом состоянии с 170 до 220 МПа, а относительное удлинение снижается до 12,4 %. Полученные механические свойства литых прутков из сплава 01417, отлитых в ЭМК, свойственны горячепрессованным или отожженным пруткам из термически упрочняемых алюминиевых сплавов в закаленном и естественно состаренном состоянии.

Для исследования влияния режимов термообработки на свойства и структуру литых прутков, полученных в ЭМК, были отлиты опытные слитки при различных температурах литья: 670°C, 740°C и 780°C и скорости литья 10 мм/с. Для выбора оптимальной температуры и времени выдержки, образцы от слитков были подвергнуты отжигу по следующим режимам: 400°C в течение 2, 4, 8 часов; 450 °C в течение 2, 4, 8 часов; 500 °C в течение 2, 4, 8 часов; 550 °C в течение 2, 4, 8 часов. Отжиг образцов проводился в лабораторной печи ЭКПС-10. Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot 21» с компьютерной системой регистрации и обработки изображений при увеличении 1000 крат. Образцы исследованы до травления и после травления в реактиве Келлера. Испытания механических свойств проведены на испытательной машине LFM 20 усилием 20 кН.

Несмотря на дисперсную литую структуру слитков диаметром 12 мм из сплава 01417 с размером дендритной ячейки в среднем 3-5 мкм (таблица 3.4), они имеют незначительную внутрикристаллитную концентрационную неоднородность в результате неравновесной кристаллизации. Для ее устранения, а именно фрагментации и сфероидизации алюминидов РЗМ в эвтектических колониях, необходим гомогенизационный отжиг.

Таблица 3.4 - Размер дендритной ячейки в зависимости от температуры литья слитков диаметром 12 мм, отлитых в ЭМК

Температура литья $T_{л}$, °С	Размер дендритной ячейки, мкм	Средний размер дендритной ячейки, мкм
670	2,6-10,4	6,5
740	3,9-5,8	4,8
780	2,6-5,2	3,9

Анализ микроструктуры слитков после отжига по разным режимам свидетельствует о том, что нагрев до 550 °С вызывает вырождение эвтектики, и в микроструктуре наблюдается достаточно равномерное распределение алюминидов РЗМ (см. рисунок 3.3). До этой температуры заметных изменений в микроструктуре слитков не выявлено.

Анализ механических свойств (таблица 3.5) показывает, что определенной закономерности в изменении механических свойств в зависимости от температуры литья не наблюдается.

Таблица 3.5 - Механические свойства слитков диаметром 12 мм в зависимости от температуры литья и режимов отжига

Режим отжига	Температура литья								
	670 °С			740 °С			780 °С		
	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %
Без отжига	188	88	24,2	200	86	19,8	182	87	21,8
400 °С									
2 часа	173	79	30,0	187	89	31,5	163	75	30,6
4 часа	163	76	34,6	177	88	33,1	160	72	33,8
8 часов	163	75	35,0	174	86	34,1	159	71	34,2
450 °С									
2 часа	162	71	33,2	173	82	31,0	158	67	32,7
4 часа	152	67	34,3	163	77	33,0	147	62	33,0
8 часов	149	66	39,6	160	73	34,6	140	57	35,0
500 °С									
2 часа	148	70	32,4	158	71	27,2	145	68	29,8
4 часа	142	66	33,6	149	68	32,9	137	68	32,5
8 часов	134	62	36,0	144	64	35,8	134	63	34,8
550 °С									
2 часа	133	58	32,2	142	66	31,8	129	57	37,4
4 часа	130	56	36,0	140	64	35,1	125	56	38,2
8 часов	126	54	38,8	137	63	38,4	123	55	40,0

Наиболее высокая прочность получена при температуре литья $T_{л} = 740$ °С, а пластичность - при $T_{л} = 670$ °С. При этом разница для значений временного сопротивления разрыву в зависимости от температуры литья составила 12-18 МПа, а для относительного удлинения – 2,4-4,4 %. С повышением температуры отжига от 400 °С до 550 °С и времени выдержки от 2 до 8 часов прочностные свойства закономерно снижаются. Относительное удлинение повышается при отжиге по сравнению с литым состоянием. Однако заметного повышения относительного удлинения при температурах 400-500 °С не наблюдается. Оно заметно возрастает при нагреве до температуры 550 °С и времени выдержки 8 часов. Однако поверхность образцов, отожженных при температуре 550 °С, из блестящей становится матово-серой.

Таким образом, с повышением температуры литья от 670 °С до 780 °С закономерно измельчается микроструктура слитков из сплава 01417 диаметром 12 мм, что объясняется повышением скорости кристаллизации металла. При этом размер зерна слитков не изменяется, и она остается крупнозернистой. С повышением температуры отжига от 400 °С до 550 °С и времени выдержки от 2 до 8 часов прочностные свойства слитков закономерно снижаются. По сравнению с литым состоянием относительное удлинение слитков повышается при отжиге, однако заметно оно возрастает только при температуре 550 °С и времени выдержки 8 часов.

3.2 Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных из непрерывнолитой заготовки сортовой прокаткой и волочением

Для сравнения результатов исследований по получению заготовок для волочения с применением методов непрерывного прессования с традиционными технологиями непрерывного литья и прокатки, а также гранульной технологии, провели исследования по получению проволоки из сплава 01417 [102]. Исходными объектами исследования являлись заготовки из сплава 01417 в виде прутков диаметром 4 и 9,5 мм (рисунок 3.4), полученные методом ЭМК в производственных условиях ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».



Рисунок 3.4 - Экспериментальные образцы прутков диаметром 4 и 9,5 мм

Химический состав сплава приведен в таблице 3.1.

Предварительно изучали влияние температуры отжига на микроструктуру прутков, поскольку для сплавов такого типа морфология эвтектических включений определяет, с одной стороны, технологическую пластичность при деформационной обработке, а с другой стороны, конечные свойства деформированного полуфабриката. Термическая обработка экспериментальных образцов производилась в интервале 300 – 600 °С с шагом 100 °С в муфельной электропечи SNOL 8,2/1100. Поскольку исследуемые образцы сплава 01417 характеризуются высокодисперсным строением эвтектики, практически не выявляемой в световом микроскопе, микроструктуру изучали на сканирующем электронном микроскопе «TESCAN VEGA 3». Помимо структурных исследований для каждой ступени отжига производились измерения твердости, коррелируемой с прочностью, на микротвердомере Wilson Wolpert 930 М при следующих параметрах: нагрузка - 1 Н, время теста – 10 с. Далее из этих прутков, отожженных по выбранному режиму, в лабораторных условиях Московского института стали и сплавов (МИСиС) с применением вальцов ВЭМ-3М изготовлена заготовка квадратного сечения размером 2x2 мм, из которой, по предложенному маршруту волочения, получена проволока диаметром 1 и 0,5 мм, изученная в дальнейшем в исходном и отожженном состояниях. Схема эксперимента по деформационно-термической обработке исходных прутков приведен на рисунке 3.5. Испытания проволоки на растяжение проводили на универсальной машине Zwick по ГОСТ 1497-84 при скорости нагружения 10 мм/мин. На проволоке диаметром 1 мм, кроме механических свойств, измеряли удельное электросопротивление с помощью цифрового миллиомметра GOM-802 (GP+RS) по ГОСТ 7229-76 и рассчитывали удельную электропроводность.

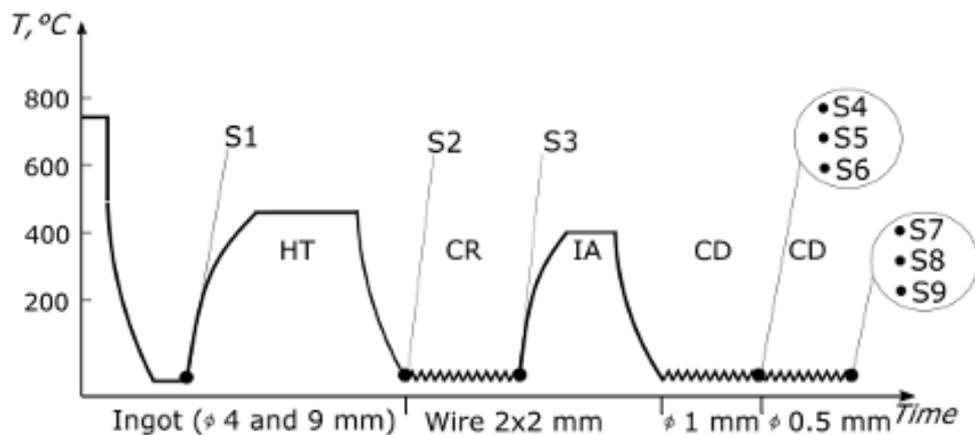


Рисунок 3.5 – Схема эксперимента по получению проволоки из исходных прутков сплава 01417

Эволюция структуры на различных этапах отражена в таблице 3.6. На первоначальном этапе исследовали исходную структуру образцов диаметром 9,5 мм (П1) и 4 мм (П2), полученных по технологии электромагнитной кристаллизации (рисунок 3.6).

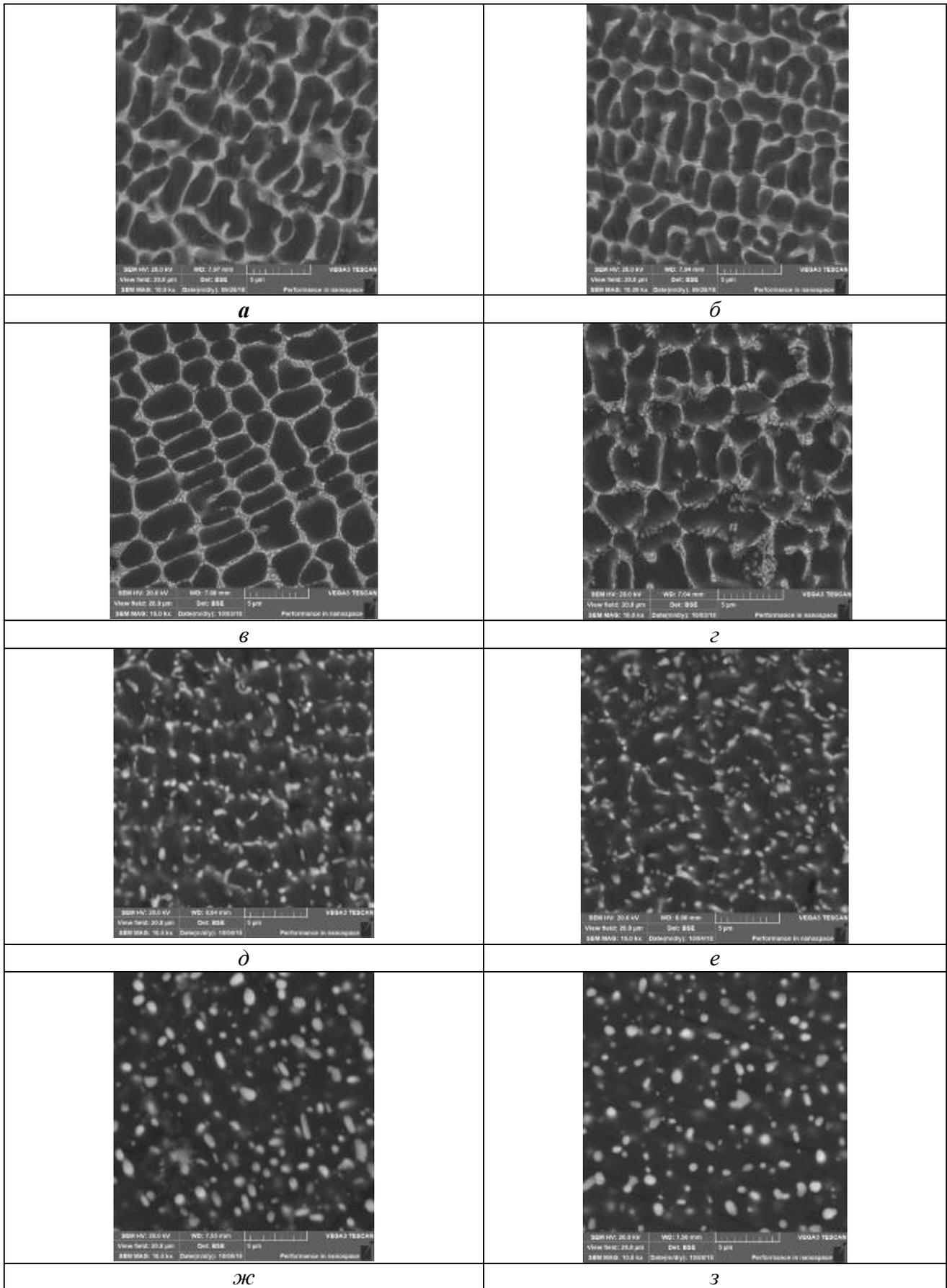


Рисунок 3.6 - Влияние температуры отжига $T_{от}$ на микроструктуру прутков из сплава 01417, СЭМ: *a, б* - исходное состояние; *в, з* - $T_{от}=400$ °С; *д, е* - $T_{от}=500$ °С; *ж, з* - $T_{от}=600$ °С

Таблица 3.6 - Деформационно-термическая обработка образцов из сплава 01417

Обозначение	Технологические операции	Планируемые изменения в структуре
S1	Литой пруток (диаметр 9,5 и 4,0 мм)	Высокодисперсная эвтектика (Al)+Al _n Mm
S2	Отжиг прутков при 450 °С в течение 3-х часов	Фрагментированные частицы эвтектической фазы
S3	Прокатка прутков до размера 2x2 мм	Деформационное упрочнение
S4	Волочение проволоки от 2x2 мм до диаметра 1 мм	Деформационное упрочнение
S5	Отжиг проволоки диаметром 1 мм при 300 °С в течение 3-х часов	Дорекристаллизационная (субзеренная) структура
S6	Отжиг проволоки диаметром 1 мм при 400 °С в течение 3-х часов	Рекристаллизованная структура
S7	Волочение проволоки от диаметра 1 мм до 0,5 мм	Деформационное упрочнение
S8	Отжиг мм проволоки диаметром 0,5 мм при 300 °С в течение 3-х часов	Дорекристаллизационная (субзеренная) структура
S9	Отжиг проволоки диаметром 0,5 мм при 400 °С в течение 3-х часов	Рекристаллизованная структура

Микроструктура литых образцов (рисунок 3.6, *а, б*) подобна микроструктуре доэвтектических силуминов типа АК7. На первоначальном этапе исследовали исходную структуру прутков диаметром 9,5 мм (П1) и 4 мм (П2), полученных в электромагнитном кристаллизаторе. Однако РЗМ-содержащая эвтектика намного дисперснее, чем алюминиево-кремниевая эвтектика. Размер эвтектических ветвей алюминидной фазы Al₁₁RE₃ составляет менее 200 нм и с трудом выявляется даже методом СЭМ. Отжиг при 300 °С не приводит к заметным изменениям по сравнению с литой структурой. При повышении температуры до 400 °С выявляется частичная фрагментация частиц эвтектического происхождения (рисунок 3.6, *в, г*). В прутке П2 формоизменение частиц заметнее, что связано с более тонким строением литой структуры из-за более высокой скорости охлаждения при кристаллизации.

Это подтверждается определением среднего размера дендритной ячейки, который составил 1,99 (±0,06) мкм и 1,78 (±0,06) мкм для прутков П1 и П2 соответственно. После отжига при 500 °С наблюдается также сфероидизация образовавшихся частиц алюминидной фазы. При повышении температуры выдержки до 600 °С (рисунок 3.6, *ж, з*) наблюдается укрупнение частиц, что согласуется с известными закономерностями [102]. Помимо анализа микроструктур на каждом этапе многоступенчатого отжига производили измерения твердости с целью оценки прочностных характеристик двух прутков различного диаметра.

Результаты приведены на рисунке 3.7. Установлено, что при увеличении температуры происходит снижение твердости, объясняемое протеканием процессов фрагментации и сфероидизации высокодисперсной эвтектики. При этом экспериментальные образцы на всех этапах термообработки показали сопоставимые значения. Поскольку формирование крупных частиц

фазы $Al_{11}RE_3$ ведет к разупрочнению, а исходная (нефрагментированная) структура не обеспечивает достаточную деформационную пластичность, то выбор оптимальной температуры отжига прутковых заготовок приобретает первостепенное значение. На основе анализа полученных экспериментальных и литературных данных для рассматриваемых объектов исследования была выбрана температура 450 °С.

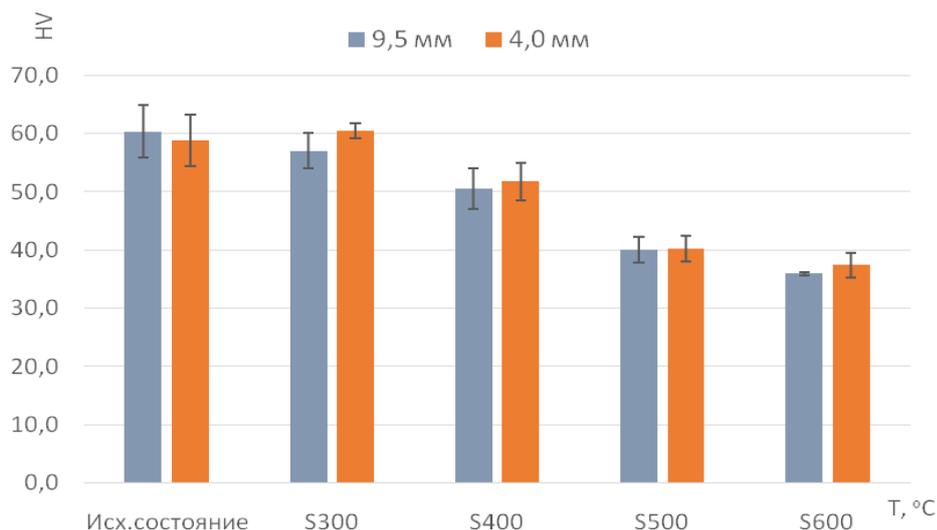


Рисунок 3.7 - Влияние температуры отжига на твердость прутков сплава 01417, время отжига 3 ч

Технологическая обработка литых прутков П1 и П2, как видно из таблицы 3.6, включала в себя отжиг литой заготовки (S2), получение холоднокатаной заготовки сечением 2x2 мм (S3), промежуточный отжиг с последующим волочением до 1 (S4) и 0,5 мм (S7). Полученная после волочения проволока подвергалась механическим испытаниям на разрыв в трех состояниях: исходном (S4, S7), после нагрева до 300 °С (S5, S8) и после нагрева до 400 °С (S6, S9). Результаты испытаний на растяжение представлены в таблице 3.7, диаметр исходного прутка мало сказывается на механических свойствах проволоки. В частности, в состоянии S4 временное сопротивление составляет около 230 МПа при пластичности материала около 1 %. Отжиг при 300 °С приводит к незначительному снижению прочностных характеристик, что позволяет предположить его дорекристаллизационный характер. После отжига при 400 °С наблюдается снижение прочности и рост пластичности до 8 %. Данное изменение механических свойств, очевидно, может быть связано с рекристаллизацией.

При определении величины удельной электропроводности выявлено значимое различие: проволока П1 (9,5 мм) в состоянии S4 обладает удельной электропроводностью 52,3 % IACS, проволока П2 (4,0 мм) в аналогичных условиях – 56,1 % IACS. Данный факт, по-видимому, можно объяснить различием в размерных параметрах структуры таких, как размер дендритной ячейки, а также расстояние между пластинами эвтектики, что оказывает столь существенное влияние.

Таблица 3.7 - Механические свойства проволоки из сплава 01417

Обозначение	Диаметр заготовки, мм	Диаметр проволоки, мм	Механические свойства		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
S4	4,0	1	233	207	0,8
	9,5	1	226	196	1,0
S5	4,0	1	203	201	0,2
	9,5	1	201	188	0,4
S6	4,0	1	170	164	2,8
	9,5	1	164	155	8,0
S7	4,0	0,5	221	193	1,2
	9,5	0,5	221	187	1,2
S8	4,0	0,5	200	186	0,4
	9,5	0,5	200	179	0,5
S9	4,0	0,5	167	152	9,1
	9,5	0,5	165	146	9,6

На рисунке 3.8 приведены микроструктуры проволоки П1 диаметром 1 мм в исходном (S4) и отожженном при 400 °С (S6) состояниях при различных увеличениях.

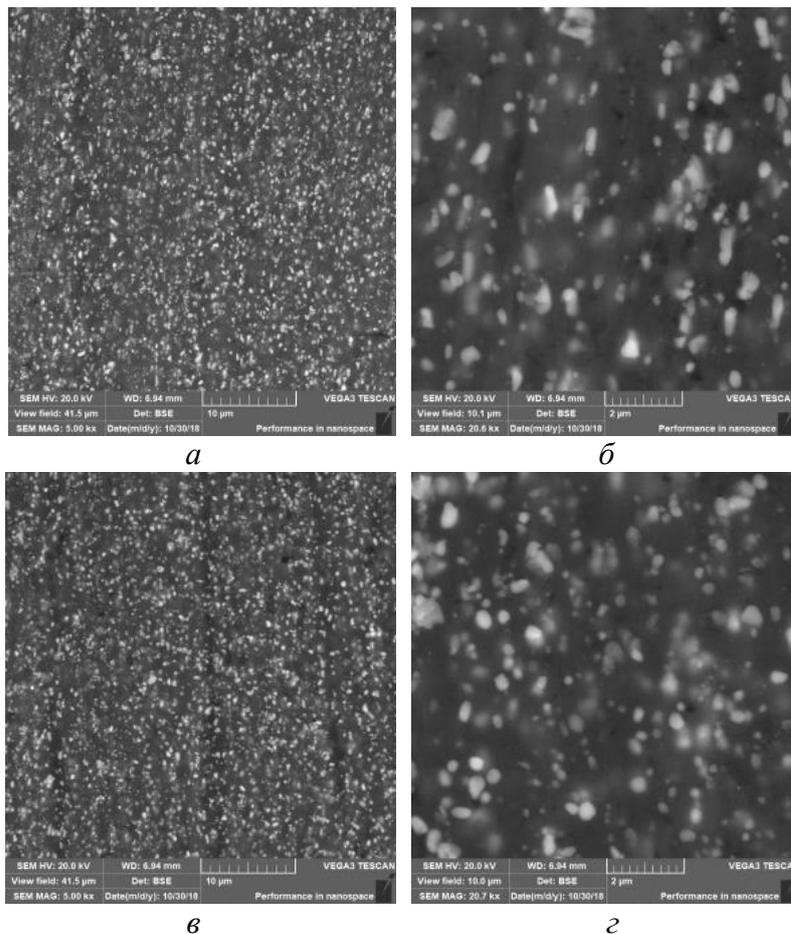


Рисунок 3.8 - Микроструктура проволоки диаметром 1 мм, полученной из непрерывнолитого прутка диаметром 9,5 мм из сплава 01417 в различных состояниях, СЭМ: а, б- S4, в, г - S6

Анализ микроструктур показал, что в исходном состоянии прослеживается направление волочения (рисунок 3.8, *а*). Отжиг при 400 °С приводит к сфероидизации и некоторому укрупнению за счет коагуляции эвтектических частиц со средним размером около 0,5 мкм (рисунок 3.8, *б*). В целом микроструктура проволоки во всех состояниях характеризуется субмикронным размером РЗМ-содержащих частиц. Это подтверждает правильность выбора температуры отжига исходных прутков, поскольку достигается сочетание достаточной технологичности при деформационной обработке и дисперсности структуры.

Для анализа характера разрушения проволоки изучали структуру изломов с использованием метода СЭМ (как в отраженных, так во вторичных электронах). В общем случае имеет место ямочный характер излома (рисунок 3.9).

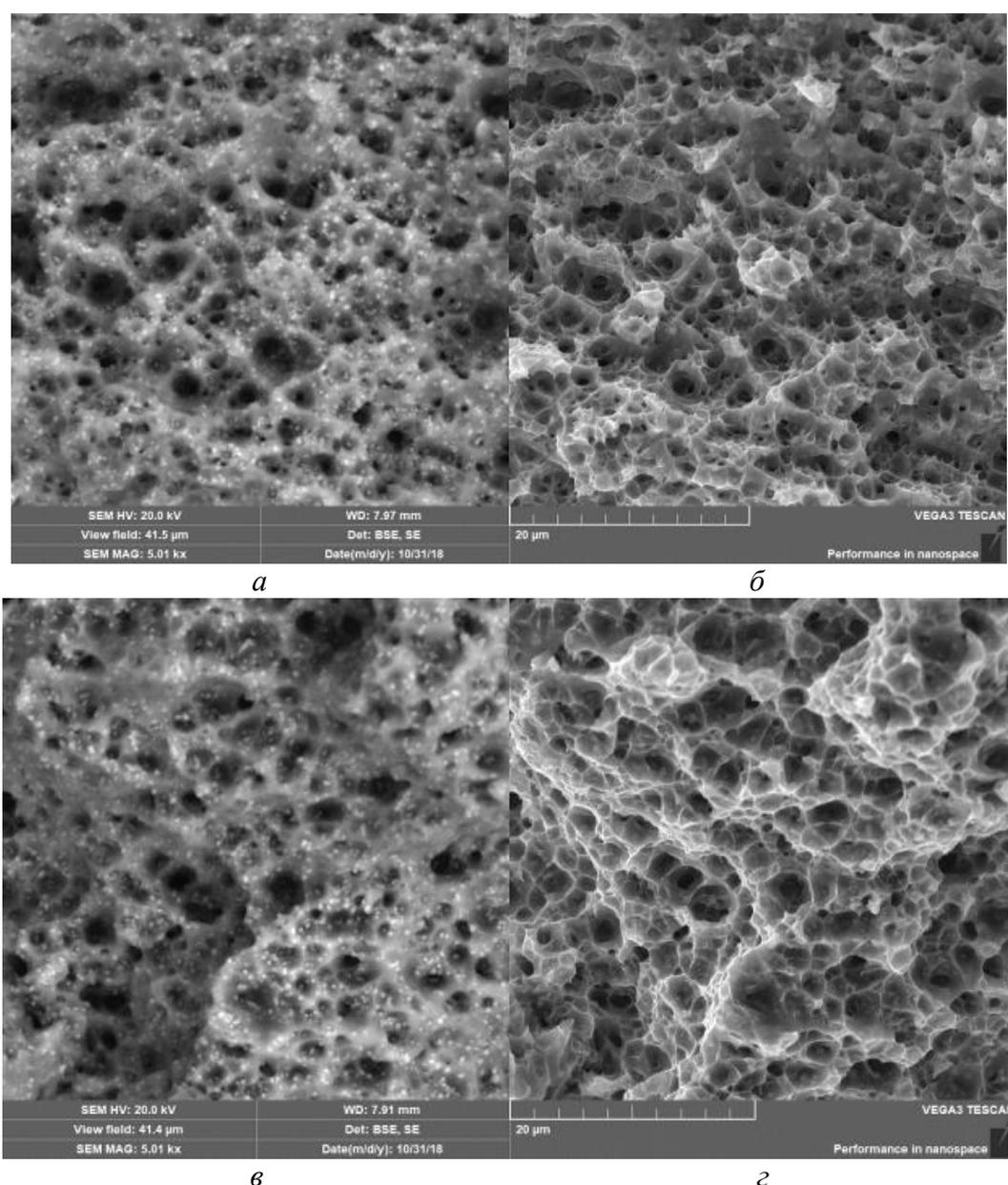


Рисунок 3.9 - Фрактограммы проволоки диаметром 1 мм, полученной из непрерывнолитого образца диаметром 9,5 мм из сплава 01417, после испытания на разрыв, СЭМ: *а, б*- S4, *в, г* - S6

Можно утверждать, что местом зарождения ямок являлась граница раздела между матрицей и включениями. Фрактограмма излома проволоки П1 по сравнению с состоянием S4 (рисунки 3.9, а, б) в состоянии S6 (рисунок 3.9, в, г) фиксирует более глубокие ямки, что подтверждают полученные экспериментальные данные по пластичности двух состояний (см. таблицу 3.7). Результаты сравнения базовых свойств проволоки сплава 01417, полученной по двум технологиям изготовления заготовки, отражены в таблице 3.8. Для гранульной технологии использовали данные для проволоки диаметром 2 мм, приведенные в работе [6]. Из таблицы 3.8 видно, что проволока из литого прутка П2 не уступает свойствам проволоке, полученной по гранульной технологии.

Таблица 3.8 - Физико-механические свойства экспериментальных образцов проволоки из сплава 01417, полученной по разным технологиям

Технология	Механические свойства		Электрические свойства	
	σ_B , МПа	δ , %	ρ , Ом·мм ² /м	% IACS
ЭМК (П1)	226	1,0	0,03300	52
ЭМК (П2)	233	0,8	0,03100	56
RS/PM	180-230	4,6-2,5	0,03100-0,03200	56-54

Предложенная технология ЭМК представляется перспективной для производства проволоки не только из конкретного сплава 01417, но и других сплавов подобного типа, требуемая структура которых реализуется в условиях быстрой кристаллизации.

Таким образом, в результате проведения исследований изучено влияние температуры отжига (до 600 °С включительно) на структуру непрерывнолитых прутков сплава 01417, полученных по технологии ЭМК. Показано, что при нагреве до 300 °С входящие в состав высокодисперсной эвтектики алюминиды, содержащие РЗМ, практически не изменяются. При 400 °С отмечаются следы фрагментации, а при более высоких температурах происходит сфероидизация эвтектических включений и их укрупнение (до 1,5 мкм), что сопровождается снижением твердости. Показано, что полностью сфероидизированная структура, достигаемая после отжига при 450 °С, позволяет получать проволоку из сплава 01417 до 0,5 мм включительно.

В процессе деформации происходит формирование волокнистой структуры алюминиевых зерен с равномерно распределенными в них частицами РЗМ-содержащих алюминидов субмикронного размера. Установлено, что отжиг проволоки при 300 °С практически не снижает прочностные свойства. Отжиг при 400 °С приводит к снижению прочности и росту пластичности, что обусловлено протеканием рекристаллизации. Размер рекристаллизованных зерен составляет около 3 мкм, что соответствует расстоянию между частицами.

Таким образом, применение операций сортовой прокатки и волочения непрерывнолитых слитков 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.

Однако для создания комплексной технологии целесообразно объединить в одной линии непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор и установку непрерывного прессования. Это позволит существенно увеличить производительность и снизить трудо- и энергоёмкость производства таких полуфабрикатов, а также расширить технологические возможности по сравнению с технологией непрерывного литья и прокатки.

3.3. Исследование структуры и механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением установки Конформ и волочения

Необходимо отметить, что одним из способов, позволяющим увеличить деформационную способность непрерывнолитых слитков, может быть непрерывное прессование по методу Конформ [25]. Поэтому в работе были проведены исследования возможности получения проволоки из сплава 01417 с применением лабораторной установки Конформ [103].

Образцы в виде длинномерных слитков из сплава 01417 диаметром 12 мм изготовили в электромагнитном кристаллизаторе, что обеспечило более высокий в соотношении с традиционными методами литья, уровень механических свойств за счет образования в слитках дисперсной структуры с незначительной внутридендритной ликвацией. Образцы были отлиты из опытного сплава 01417, химический состав которого приведен в таблице 3.1. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе марки «Olympus». Механические свойства полуфабрикатов определяли на испытательных машинах LFM 400 и LFM 20.

В лабораторных условиях был разработан режим гомогенизационного отжига (температура 550 °С, время выдержки 4-5 часов), применение которого обеспечило образование скопления множества дисперсных алюминидов РЗМ на месте бывших эвтектических колоний в результате вырождения эвтектики. В результате этого была устранена внутрикристаллитная ликвация, что способствовало уменьшению внутренних напряжений и обеспечило оптимальные условия для получения проволоки диаметром 0,5 мм.

Исследования проведены на опытной установке Конформ (рисунок 3.10) с диаметром колеса 300 мм (таблица 3.9).

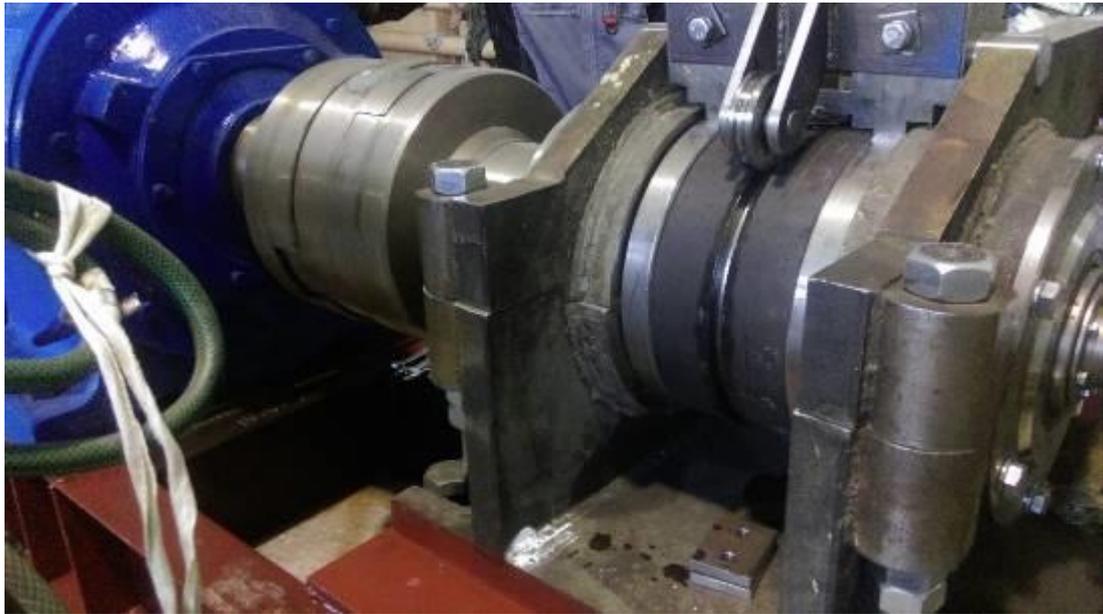


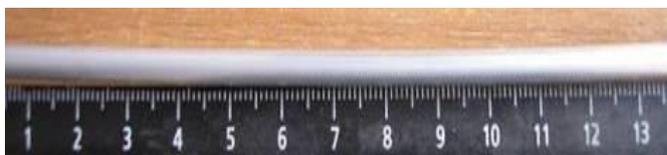
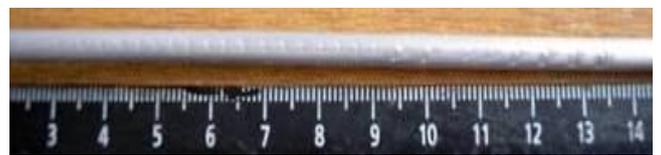
Рисунок 3.10 – Опытная установка Конформ

Таблица 3.9 – Технические характеристики опытной установки Конформ

Параметры	Значения
Мощность двигателя, кВт	22
Радиус колеса, мм	136
Скорость вращения выходного вала, об/мин	8
Момент на валу, кН·м	24,9

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Непрерывнолитую заготовку из сплава 01417 диаметром 12 мм нагревали в электрической печи до температуры 300 °С и задавали в калибр, образованный канавкой колеса и башмаком. В результате прессования через матрицу с калибрующим отверстием была получена опытная бухта прутка диаметром 5 мм длиной 10 метров.

Анализ внешнего вида прутка диаметром 5 мм (рисунок 3.11), показывает, что поверхность прутка гладкая и ровная (рисунок 3.11, *а*), однако имеются небольшие участки с надирями и надрывами на поверхности прутка (рисунок 3.11, *б*).

*а**б*Рисунок 3.11 – Поверхность прутка диаметром 5 мм, полученного методом Конформ из непрерывнолитой заготовки сплава 01417: *а* – без дефектов; *б* – с дефектами

В микроструктуре прутка в продольном направлении были обнаружены микронесплошности и отдельные включения неидентифицированного состава размером от 82,6 мкм до 764,9

мкм (рисунок 3.12). Эти включения явились одной из причин образования расслоений прутка, кроме того, на качество прутка повлияли вовлеченные загрязненные поверхностные слои литой заготовки. В процессе дальнейшей пластической деформации (волочения) наследуемые деформированным изделием микрорасслоения и крупные включения приводят к обрывам (браку).



Рисунок 3.12 - Микроструктура образца поперечным сечением 5 мм, полученного на установке Конформ с микронесплошностями (а) и включениями (б), x1000

Анализ механических свойств прутка диаметром 5 мм, отпрессованного на установке Конформ, в сравнении с литым состоянием, показывает, что деформация непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм, нагретой до 300 °С, приводит к значительному повышению прочности и пластичности металла (таблица 3.10). Относительное удлинение возрастает в 2,5 раза, а временное сопротивление разрыву достигает величины 222 МПа. Необходимо отметить, что механические свойства прутка, где были обнаружены поверхностные дефекты (надиры), несколько снизились, но остались достаточно высокими.

Таким образом, прутки из сплава 01417 диаметром 5 мм, полученные на установке «Конформ» из непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм, отлитой в ЭМК, обладают достаточной технологической пластичностью. Об этом свидетельствует повышение механических свойств металла после деформации по сравнению с литым состоянием. Как показали металлографические исследования в результате непрерывного прессования устранена внутрикристаллитная ликвация и обеспечены условия для их последующей деформационной обработки – волочения. Поэтому прутки диаметром 5 мм, полученные на установке Конформ, были подвергнуты волочению.

Таблица 3.10 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 после деформации на установке Конформ

Номер образца	Состояние	Механические свойства		
		Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ , %
	литое	182	102	11,8
1	деформированное	218	202	31,1
2		222	205	28,0
3		213	169	31,9
4		222	200	31,9
5		218	201	31,7
6		217	200	27,1
7		213	164	27,7
8		217	202	29,1
Образцы с поверхностными дефектами				
9	деформированное	204	175	23,2
10		216	182	23,0
11		215	196	28,4

Маршрут волочения проволоки диаметром 2 мм представлен в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Маршрут волочения проволоки из сплава 01417

Диаметр проволоки, мм	Площадь сечения, мм ²	Вытяжка	Обжатие, %	Обжатие между отжигами, %
5,0	19,625	-	-	-
4,5	15,896	1,24	19,0	-
4,0	12,560	1,26	21,0	-
3,6	10,174	1,24	19,0	-
3,3	8,549	1,19	16,0	-
3,0	7,065	1,21	17,4	64,0
2,6	5,307	1,33	24,9	-
2,3	4,153	1,28	21,8	-
2,0	3,140	1,32	24,4	55,6

Механические свойства проволоки, полученной из прессованной заготовки диаметром 5 мм на установке Конформ, приведены в таблице 3.12.

Металлографические исследования показали, что проволока диаметром 3 мм при температурах отжига 500 и 600 °С имеет полностью рекристаллизованную и крупнозернистую структуру (рисунок 3.13).

Таблица 3.12 – Механические свойства проволоки диаметром 2,0 - 4,5 мм из сплава 01417, изготовленной из заготовки диаметром 5 мм, полученной с применением установки «Конформ»

Диаметр, мм, состояние и режим отжига	Механические свойства		
	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %
5,0, прессованное	174	100	31,7
	174	101	33,3
4,5, нагартованное	234	188	5,2
	216	164	5,9
4,0, нагартованное	221	192	4,8
	225	205	4,6
3,6, нагартованное	219	181	4,6
	227	213	4,4
3,3, нагартованное	227	200	3,7
	213	189	3,4
3,0, нагартованное	229	219	2,3
	226	206	2,7
2,6, нагартованное	236	224	2,9
	284	282	2,4
	239	229	2,3
2,0 нагартованное	203	199	1,1
	209	205	1,1
	191	188	1,3
3,0, отожженное $T = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	230	207	1,3
	207	192	1,2
	222	205	1,6
3,0, отожженное $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	215	201	1,1
	216	205	1,7
	216	204	1,0
3,0, отожженное $T = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	204	197	2,1
	210	201	2,3
	215	207	1,4
3,0, отожженное $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	168	160	15,1
	166	158	13,6
	169	161	14,9
3,0, отожженное $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	124	62	16,7
	120	64	18,3
	116	66	19,5
3,0, отожженное $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	134	82	14,2
	120	70	19,0
	118	69	20,9
2,0, отожженное $T = 370\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	148	145	5,6
	216	81	7,8
	157	151	9,7
2,0, отожженное $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	131	107	14,4
	130	104	14,4
	130	99	15,1
2,0, отожженное $T = 430\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	129	99	19,6
	128	96	17,5
	135	109	16,8

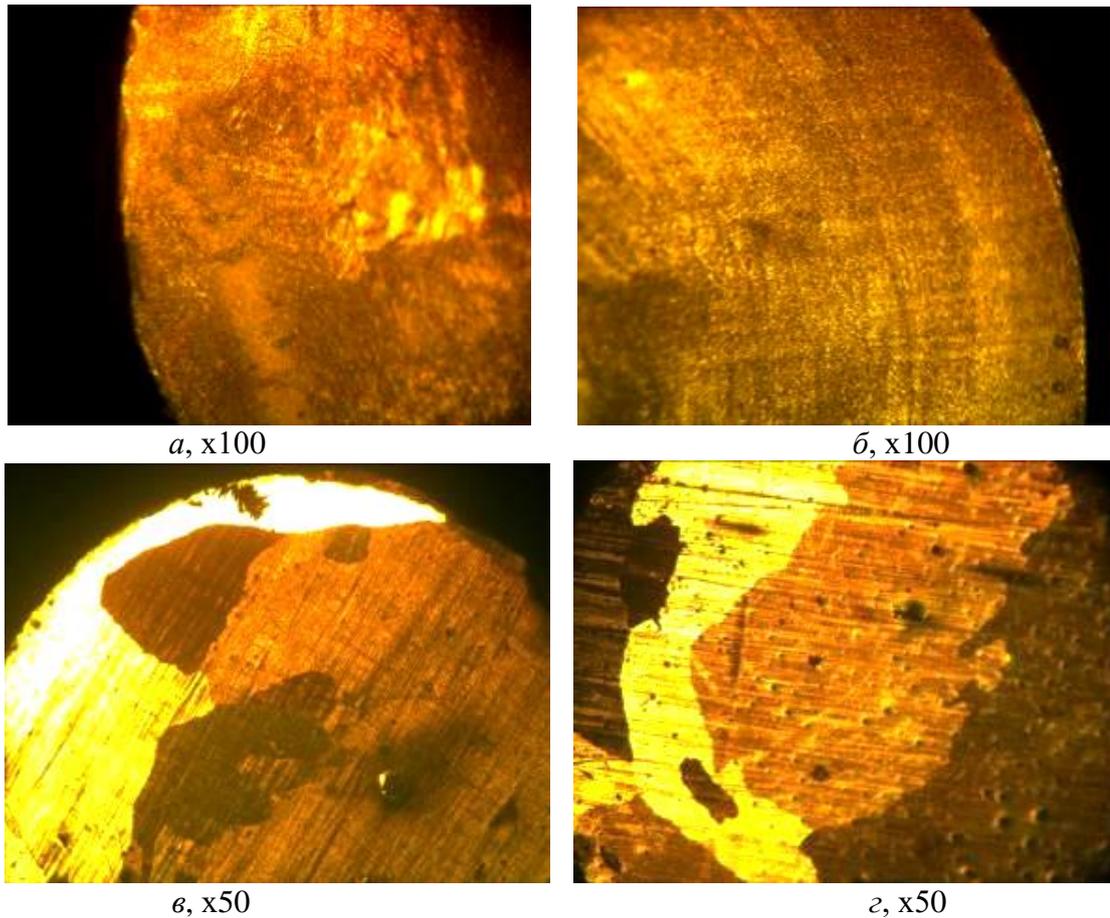


Рисунок 3.13 – Микроструктура отожженной проволоки диаметром 3 мм из сплава 01417, изготовленной из заготовки, полученной методом Конформ: *a* - $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$; *б* - $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$; *в* - $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$; *з* - $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$

При волочении заготовки диаметром 5 мм со степенями деформации порядка 20 % уже происходит значительное упрочнение металла. Дальнейшая деформации возможна до степени суммарной деформации 64% при получении проволоки диаметром 3 мм за 4 прохода. Относительное удлинение падает в 2 раза и составляет 2,3-2,7%, а временное сопротивление разрыву - 236-229 МПа. После отжига проволоки диаметром 3 мм при различных температурах 250, 300, 350 °C в течение 1 часа пластичность холоднодеформированных полуфабрикатов практически не увеличилась (относительное удлинение 1,1-2,3%), при этом прочность снизилась до 204 МПа. Повышение температуры отжига до 400-600 °C позволило увеличить относительное удлинение до значений 15-20 %, но при этом временное сопротивление разрыву снизилось до 118 МПа. При этом, если при температурах 350 и 400 °C показатели прочностных свойств имеют практически одинаковые значения, то с увеличением температуры отжига до 500 и 600 °C они снижаются практически в 2 раза из-за рекристаллизации и роста зерна. Различные режимы отжига (см. таблицу 3.12) позволяют повысить пластичность металла до значений 9-15 %.

В таблице 3.13 представлены механические свойства проволоки диаметром 0,5-2,0 мм.

Таблица 3.13 – Механические свойства проволоки диаметром 0,5 - 2,0 мм из сплава 01417, изготовленной из заготовки, полученной с применением установки Конформ

Диаметр, мм, состояние и режим от- жига	Механические свойства		
	Временное сопротив- ление разрыву σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %
2,00, отожженное $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	131	107	14,4
	130	104	14,4
	130	99	15,1
1,90, нагартованное	218	211	3,8
1,78, нагартованное	204	201	3,3
1,58, нагартованное	202	200	2,9
1,48, нагартованное	204	198	2,8
1,38, нагартованное	203	173	2,7
1,18, нагартованное	201	162	2,5
0,87, нагартованное	203	181	3,1
0,79, нагартованное	205	173	3,0
0,74, нагартованное	206	176	2,9
0,66, нагартованное	207	171	2,8
0,60, нагартованное	207	172	2,5
	203	177	2,0
	203	178	1,5
0,50, нагартованное	206	189	1,5
	204	182	2,0
	205	177	2,1
0,50, отожженное $T = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	206	169	1,9
	194	175	1,0
	193	32	2,0
0,50, отожженное $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	196	180	2,1
	179	167	6,0
	182	170	3,0
0,50, отожженное $T = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	179	169	4,5
	159	143	8,0
	157	137	8,1
0,50, отожженное $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	157	146	9,0
	159	136	15,0
	157	135	13,2
0,50, отожженное $T = 450\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1\text{ час}$	156	131	14,1

Предварительно проволока была подвергнута отжигу по режиму: температура 450 °С, время выдержки 1 час. Следует отметить, что волочение проволоки прошло без обрывов, а проволока имела хорошее качество поверхности. Уровень механических свойств проволоки диаметром от 1,9 до 3,0 мм составил: временное сопротивление разрыву от 186 до 211 МПа, предел текучести от 182 до 210 МПа, относительное удлинение от 2,3 до 3,7 %. После отжига проволока имела прочность $\sigma_b = 186-193$ МПа и удлинение $\delta = 2,1-5,3$ %. Дальнейшая деформация до получения проволоки диаметром 0,5 мм (маршрут волочения представлен в таблице 3.14) привела к более значительному разбросу по прочности (184-288 МПа), при этом пластичность изменялась от 1 до 4,1 %. Никакой определенной зависимости механических свойств от диаметра проволоки на этом этапе волочения не было установлено. Проволока диаметром 0,5 мм в нагартованном состоянии имела показатели $\sigma_b = 203-210$ МПа и $\delta = 1,5-2,0$ %. Последующий окончательный отжиг проволоки при температуре 450 °С и времени выдержки 1 час привел к закономерному снижению временного сопротивления разрыву до 156-159 МПа и повышению значений относительного удлинения до 13-15 %, т.е. достижению требуемых механических свойств проволоки согласно ТУ 1-809-1038-2018.

Таблица 3.14 – Маршрут волочения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417

Диаметр проволоки, мм	Вытяжка	Обжатие, %	Обжатие между отжигами, %
2,00	1,323	24,4	
1,83	1,11	23,8	
1,60	1,15	12,1	
1,50	1,07	18,2	
1,36	1,11	18,3	
1,23	1,11	25,4	
1,06	1,16	10,3	75,5
1,00	1,06	17,3	
0,91	1,10	21,3	
0,81	1,13	18,3	
0,73	1,11	19,9	
0,66	1,12	14,7	
0,60	1,08	17,3	
0,55	1,10	17,4	
0,50	1,10		52,8

Таким образом, разработаны режимы непрерывного прессования заготовки диаметром 5 мм из сплава 01417 и ее волочения, а также промежуточного и окончательного отжигов, которые позволяют получить проволоку диаметром 0,5 мм с требуемым уровнем механических свойств.

3.4. Исследование структуры и механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением установки совмещенной прокатки-прессования и волочения

Для исследований использовали непрерывнолитую заготовку ЭМК диаметром 12 мм (см. раздел 3.1) из опытного сплава. Для отработки режимов деформации проведены экспериментальные исследования [104-109] на установке СПП-200, технические характеристики которой представлены в таблице 3.15.

В качестве метода непрерывного прессования применяли совмещенную прокатку-прессование [24]. При проведении экспериментальных исследований задавали технологические и деформационные параметры, определенные в результате аналитических исследований и моделирования процесса СПП (см. главу 2). Экспериментальные исследования осуществляли следующим образом. Заготовки были нагреты в индукционной печи до температуры 550 °С, а валки и матрица - до температуры 200 °С. Далее нагретые заготовки были направлены в калибр валков, где происходила осадка металла по высоте при прокатке. Скорость вращения валков составляла 4 и 8 оборотов в минуту. Затем металл распрессовывался и выдавливался через матрицу. В результате был получен прессованный пруток диаметром 5 мм.

Таблица 3.15 – Технические характеристики установки СПП-200

Базовая длина бочки валка, мм	240
Диаметр шейки вала, мм	100
Частота вращения валка, об/мин	4, 8, 14
Мощность электродвигателя, кВт	19
Начальный диаметр валков, мм:	200
с выступом	214
с канавкой	164
Размеры калибра в наименьшем сечении, мм	7×15
Передаточное число редуктора, ед.	240
Максимальное усилие прижима, кН	300
Момент на выходном валу, кН·м	22
Рабочее давление гидростанции, кгс/см ²	200÷500

Для замера силовых показателей применяли тензометрическую аппаратуру (рисунок 3.14), а именно датчики силы CWW-50 CWW-100 (рисунок 3.14, а, б) с максимально допусти-

мым усилием сжатия 500 кН и 1 МН. Для регистрации полученных значений силовых параметров использовали измерительную станцию фирмы ZetLab, модель ZET 017-T8 (рисунок 3.14, в).



Рисунок 3.14 – Аппаратура для контроля силовых показателей:

а – датчики силы CWW-50; *б* – датчики силы CWW-100; *в* - тензостанция ZET 017-T8

Результаты экспериментальных исследований силовых параметров по получению прутков диаметром 5 мм из заготовки диаметром 12 мм в сравнении с расчетными данными представлены в таблице 3.16. Из таблицы 3.16 видно, что с увеличением частоты вращения валков с 4 до 8 об/мин происходит незначительный рост сил, действующих на матрицу и валки, что подтверждается данными расчетов, погрешность которых не превышает 10%. Оценку механических свойств полученных образцов проводили на испытательной машине марки «Walter + Bai AG» в соответствии с ГОСТ 1497-84 для прутков и ГОСТ 10446-80 для проволоки. Удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76.

Таблица 3.16 – Энергосиловые параметры СПП при получении прутков из сплава 01417

Сила, кН	ξ , с ⁻¹	Расчетные данные	Экспериментальные данные	Отклонение, %
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

Металлографические исследования структуры полученных прутков (рисунок 3.15) из непрерывнолитой заготовки (рисунок 3.15, а) показали, что наряду с равномерной мелкозернистой структурой металла (рисунок 3.15, б), в некоторых исследуемых образцах были обнаружены включения в виде пластин серого цвета (рисунок 3.15, в). Однако по сравнению с прутками, отпрессованными на установке Конформ, их величина незначительна и не превышает 7 мкм. Анализ микроструктуры позволил сделать вывод о равномерном и дисперсном распределении алюминидов Al-PЗМ.

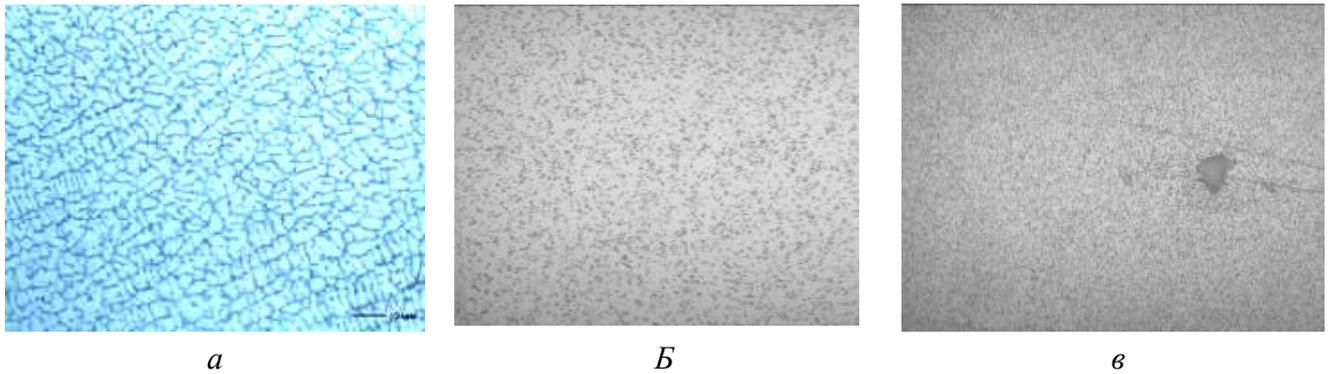


Рисунок 3.15 – Микроструктура полуфабрикатов из сплава 01417, полученных методом литья в ЭМК и последующей прокаткой-прессованием на установке СПП-200, x1000:

a – после литья; *b* – после деформации; *v* - после деформации с включениями

Механические свойства образцов, изготовленных из полученных на установке СПП-200 прутков диаметром 5 мм, в сравнении со свойствами непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм, приведены в таблице 3.17. Сравнительный анализ полученных значений механических свойств полученных прутков показал, что прочностные свойства прутков, полученных на установке Конформ выше, так как температура обработки при реализации метода СПП выше и полученные характеристики свойств относятся к горячепрессованному состоянию металла. Далее из прутков, полученных методом СПП, изготавливали проволоку диаметром 0,5 мм с помощью двух способов:

- 1 способ - волочение на цепном стане с промежуточным отжигом;
- 2 способ - сортовая прокатка с промежуточным отжигом и последующим волочением.

Маршруты деформации металла приведены в таблицах 3.18, 3.19.

Таблица 3.17 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 после СПП

Номер образца	Состояние	Механические свойства		
		Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %
1	литое	159	97	23,0
	деформированное	176	163	20,1
	деформированное	171	155	20,3
	деформированное	167	144	22,0
4	деформированное	166	145	21,1
Образец с поверхностными дефектами				
5	деформированное	175	160	8,2

Таблица 3.18 – Маршрут волочения проволоки из сплава 01417

№ прохода	Диаметр проволоки, мм	Единичный коэффициент вытяжки	Суммарный коэффициент вытяжки	Суммарное обжатие, %
	5,00	-	-	-
1	4,80	1,09	1,09	7,8
2	4,50	1,14	1,23	19,0
3	4,00	1,27	1,56	36,0
4	3,60	1,23	1,93	48,2
5	3,30	1,19	2,30	56,4
6	3,00	1,21	2,78	64,0
7	2,80	1,15	3,19	68,6
8*	2,48	1,27	4,06	75,4
9	2,30	1,27	4,06	0
10	2,20	1,16	4,73	14,0
11	2,00	1,09	5,17	21,3
12	1,80	1,21	6,25	35,0
13	1,60	1,23	7,72	47,3
14	1,55	1,27	9,77	58,4
15	1,50	1,07	10,41	60,9
16	1,45	1,07	11,11	63,4
17	1,40	1,07	11,89	65,8
18	1,35	1,07	12,76	68,1
19	1,30	1,08	13,72	70,4
20	1,25	1,08	14,79	72,5
21	1,20	1,08	16,00	74,6
22	1,15	1,09	17,36	76,6
23	1,10	1,09	18,90	78,5
24	1,05	1,09	20,66	80,3
25	1,00	1,10	22,68	82,1
26	0,95	1,10	25,00	83,7
27	0,90	1,11	27,70	85,3
28	0,85	1,11	30,86	86,8
29	0,80	1,12	34,60	88,3
30	0,75	1,13	39,06	89,6
31	0,70	1,14	44,44	90,9
32	0,65	1,15	51,02	92,0
33	0,60	1,16	59,17	93,1
34	0,55	1,17	69,44	94,1
35	0,50	1,19	82,64	95,1

* - промежуточный отжиг при температуре 500 °С, время выдержки 1 час

Сортовую прокатку горячепрессованной заготовки проводили на стане AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200x130(таблица 3.20).

Таблица 3.19 – Маршрут сортовой прокатки и волочения проволоки из сплава 01417

№ про- хода	Размер прутка или диаметр проволоки, мм	Единичный коэффициент вытяжки	Суммарный коэффициент вытяжки	Суммарное обжатие, %
	Ø 5,00	-	-	-
1	□ 4,20	1,11	1,11	10,1
2	□ 4,00	1,10	1,23	18,5
3	□ 3,60	1,23	1,51	34,0
4	□ 3,40	1,12	1,70	41,1
5	□ 3,20	1,13	1,92	47,8
6	□ 3,10	1,07	2,04	51,0
7	□ 2,70	1,32	2,69	62,9
8	□ 2,50	1,17	3,14	68,2
9	□ 2,30	1,18	3,71	73,0
10 *	□ 2,20	1,09	4,05	75,3
11	□ 2,2	1,00	4,05	0
12	□ 2,00	1,21	4,91	17,4
13	□ 1,90	1,11	5,44	25,4
14	□ 1,60	1,41	7,67	47,1
15	□ 1,50	1,14	8,72	53,5
16	□ 1,40	1,15	10,01	59,5
17	□ 1,30	1,16	11,61	65,1
18	□ 1,20	1,17	13,63	70,2
19	□ 1,10	1,19	16,22	75,0
20	□ 1,00	1,21	19,63	79,3
21	□ 1,35	0,70	13,72	70,4
22	□ 1,30	1,08	14,79	72,6
23	□ 1,25	1,08	16,00	74,7
24	□ 1,20	1,09	17,36	76,6
25	□ 1,15	1,09	18,90	78,6
26	□ 1,10	1,09	20,66	80,4
27	□ 1,05	1,10	22,68	82,1
28	□ 1,00	1,10	25,00	83,8
29	Ø 0,95	1,11	27,70	85,4
30	Ø 0,90	1,11	30,86	86,9
31	Ø 0,85	1,12	34,60	88,3
32	Ø 0,80	1,13	39,06	89,6
33	Ø 0,75	1,14	44,44	90,9
34	Ø 0,70	1,15	51,02	92,1
35	Ø 0,65	1,16	59,17	93,1
36	Ø 0,60	1,17	69,44	94,2
37	Ø 0,55	1,19	82,64	95,1
38	Ø 0,50	1,21	99,99	95,9

* - промежуточный отжиг при температуре 500 °С и времени выдержки 1 час

Механические свойства прутка оказались достаточными для значительной холодной деформации (более 95%), поэтому понадобился всего один промежуточный отжиг для восстановления пластичности металла. Механические свойства проволоки при различных режимах окончательного отжига приведены в таблице 3.21

Таблица 3.20 – Технические характеристики прокатного стана AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200x130

Характеристики	Значения характеристик
Количество калибров	38
Мощность двигателя, кВт	4,8
Допустимая сила прокатки, кН	60
Диаметр валков, мм	130
Длина бочки валков, мм	200+180
Скорость прокатки, м/мин	12,5 – 26

Таблица 3.21 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм, изготовленной из прутков, полученных на установке СПП-200

Состояние	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Удельное электросопротивление ρ , Ом·мм ² /м
СПП, T=550 °C, 4 об/мин, волочение			
нагартованное	250	1,3	0,03183
отожженное, режим №1 (350°C, 1 ч)	152	13,0	0,02924
отожженное, режим №2 (400°C, 1 ч)	144	14,3	0,02931
отожженное, режим №3 (450°C, 1 ч)	143	15,9	0,02923
отожженное, режим №4 (500°C, 1 ч)	142	16,3	0,02914
СПП, T=550 °C, 4 об/мин, сортовая прокатка + волочение			
нагартованное	250	1,1	0,03381
отожженное, режим №1 (350°C, 1 ч)	155	13,8	0,02996
отожженное, режим №2 (400°C, 1 ч)	148	15,7	0,02937
отожженное, режим №3 (450°C, 1 ч)	146	18,0	0,02919
отожженное, режим №4 (500°C, 1 ч)	137	19,1	0,02902
СПП, T=550 °C, 8 об/мин, волочение			
нагартованное	209	1,1	0,03093
отожженное, режим №1 (350°C, 1 ч)	136	13,5	0,03054
отожженное, режим №2 (400°C, 1 ч)	129	20,1	0,03018
отожженное, режим №3 (450°C, 1 ч)	123	23,3	0,02947
отожженное, режим №4 (500°C, 1 ч)	120	28,8	0,02911
СПП, T=550 °C, 8 об/мин, сортовая прокатка + волочение			
нагартованное	221	1,4	0,03173
отожженное, режим №1 (350°C, 1 ч)	139	18,5	0,02949
отожженное, режим №2 (400°C, 1 ч)	133	19,5	0,02940
отожженное, режим №3 (450°C, 1 ч)	129	23,4	0,02924
отожженное, режим №4 (500°C, 1 ч)	128	23,6	0,02904
ТУ 1-809-1038-2018 для отожженной проволоки диаметром 0,5 мм	142,5	8,0	0,0320

Закономерности их изменения при увеличении степени деформации (рисунок 3.16) по первому и второму способам соответствуют традиционным представлениям теории ОМД.

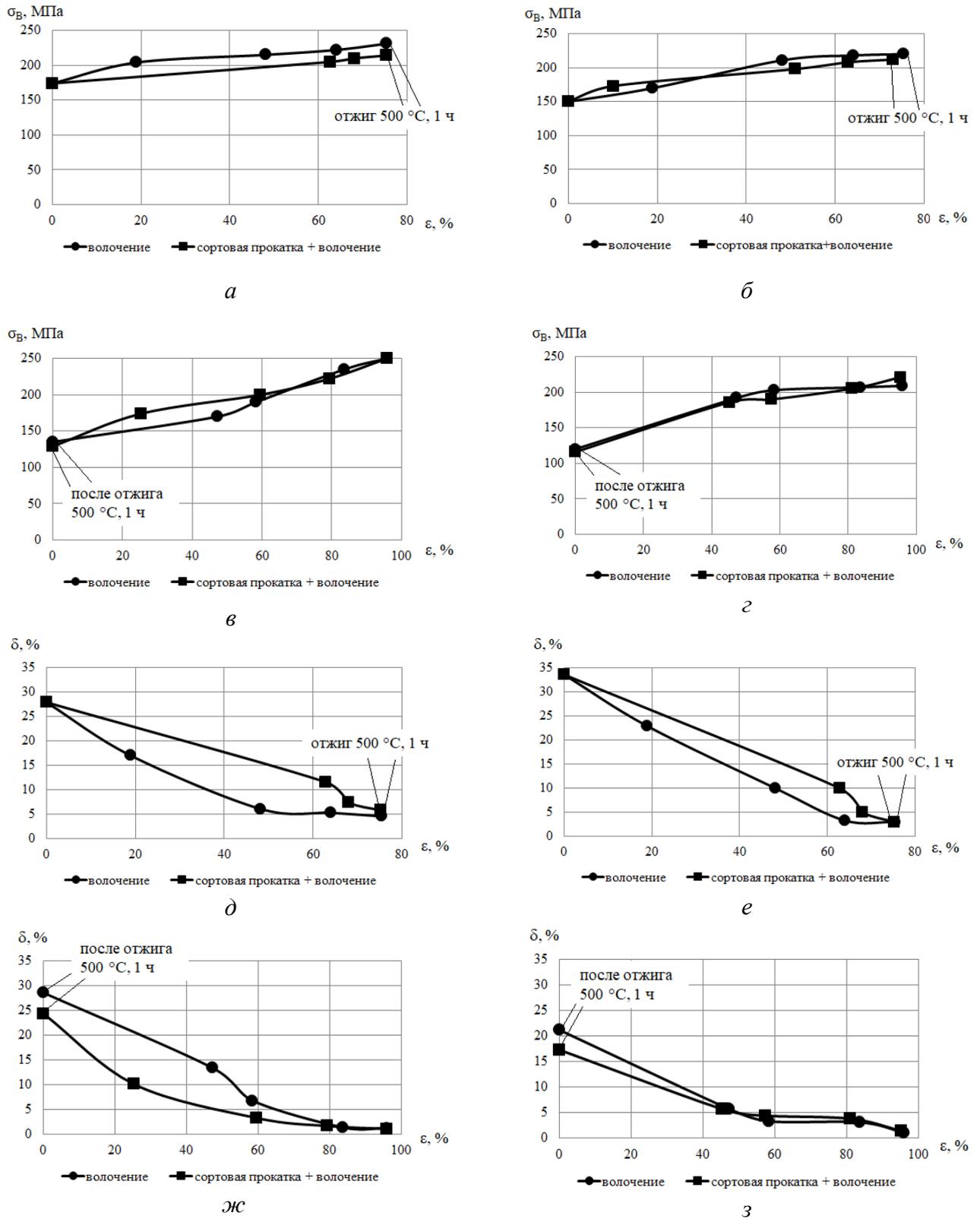


Рисунок 3.16 - Механические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 при частоте вращения валков установки СПП: а, в, д, ж – 4 об/мин; б, г, е, з – 8 об/мин

На следующем этапе проводили исследования микроструктуры деформированных полуфабрикатов в виде прутков после СПП и проволоки, полученной по 1 и 2 способам (рисунок 3.17 и таблица 3.22).

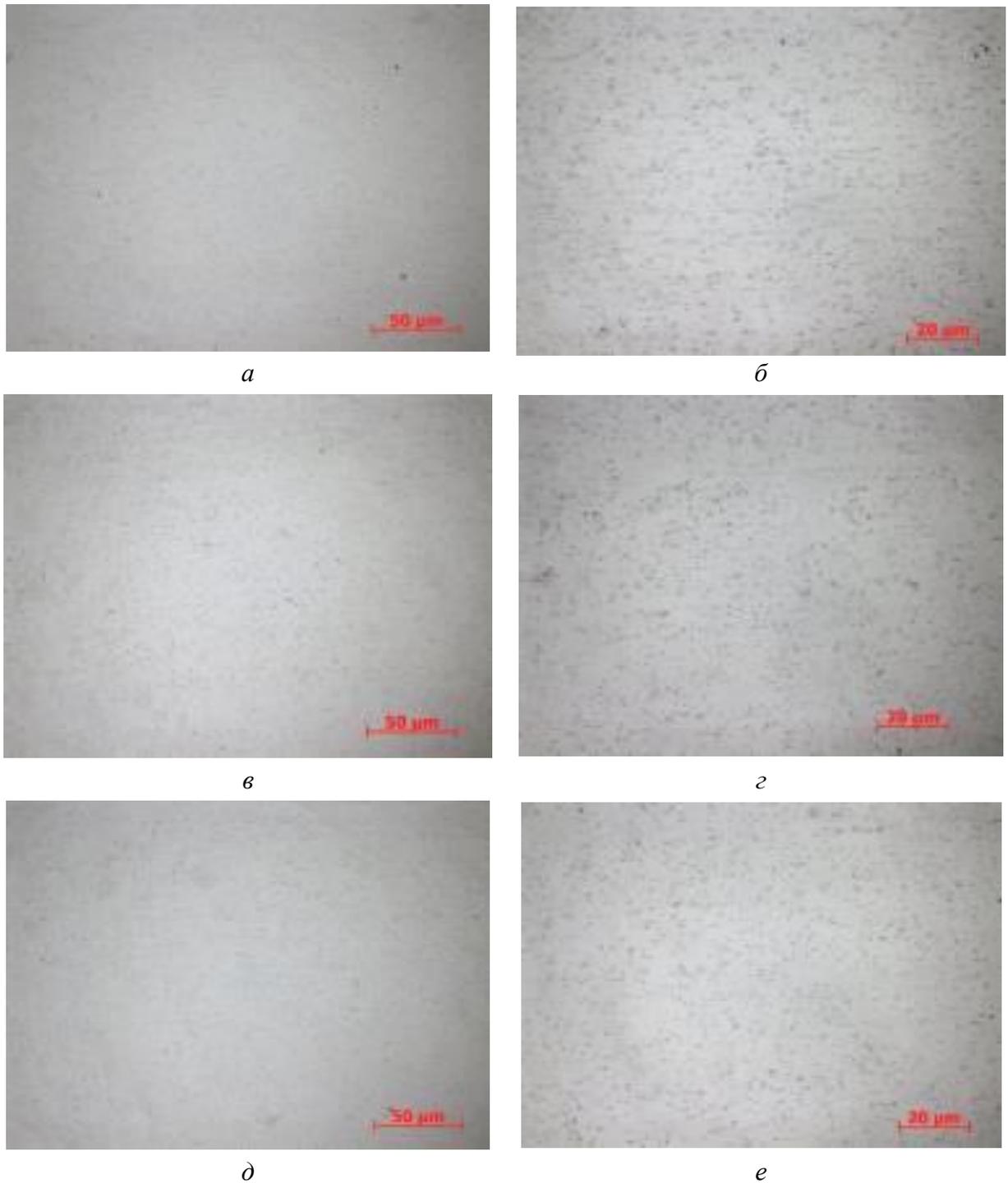
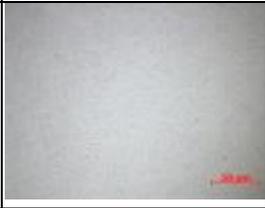
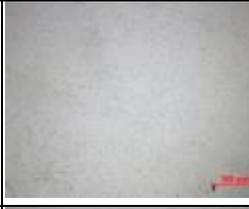
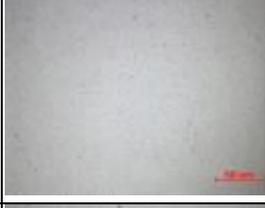


Рисунок 3.17 - Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 01417:

а, б – пруток диаметром 5 мм после СПП; *в, з* – проволока диаметром 2,5 мм после волочения; *д, е* – проволока диаметром 2,2 мм после сортовой прокатки; *а, в, д* - $\times 500$; *б, з, е* - $\times 1000$

Таблица 3.22 - Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в деформированном и отожженном состояниях, полученной по 1 и 2 способам

	ЭМК + СПП + волочение			ЭМК + СПП + сортовая прокатка + волочение	
	×500	×1000		×500	×1000
после деформации			после деформации		
1 режим после отжига 350 °С, 1ч			1 режим после отжига 350 °С, 1ч		
2 режим после отжига 400 °С, 1ч			2 режим после отжига 400 °С, 1ч		
3 режим после отжига 450 °С, 1ч			3 режим после отжига 450 °С, 1ч		
4 режим после отжига 500 °С, 1ч			4 режим после отжига 500 °С, 1ч		

Во всех деформированных образцах микроструктура представляет собой алюминиевый твердый раствор, а эвтектическая фаза (α +Al₄M) имеет округлую форму и равномерно распределена в объеме металла. В процессе сортовой прокатки и волочения прутка не происходит изменения размера и формы фаз, их расположения и количества, подавляющее большинство частиц имеет размер, не превышающий 1 мкм. С увеличением степени деформации структура остается неизменной. Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм, полученная по двум маршрутам, аналогична структуре прутка диаметром 5 мм.

Отжиг проволоки по 4 режимам не приводит к видимым изменениям размера и формы частиц интерметаллидов. Зеренную структуру проволоки не оценивали в связи с тем, что из-за малого сечения нанести оксидную пленку не представлялось возможным.

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) в режиме обратно рассеянных электронов показал, что в структуре деформированных полуфабрикатов присутствуют эвтектические частицы, содержащие Ce (до 14%) и La (до 8%).

Проволока, изготовленная вторым способом из прутка, полученного на установке СПП со скоростью валков 4 оборота в минуту, с последующей сортовой прокаткой и волочением, после отжига по режимам 1, 2, 3 обладает требуемым комплексом механических и электрических свойств в соответствии с ТУ 1-809-1038-2018. Отжиг проволоки по режиму 4 (температура 500 °С, длительность 1 ч.) приводит к снижению временного сопротивления разрыву до значения 137 МПа и росту пластических свойств (относительное удлинение составляет 19,1 %). Еще более высокую пластичность (относительное удлинение 23,6-28,8%) имеет проволока, изготовленная из заготовки, полученной на установке СПП с скоростью 8 оборотов в минуту, что позволяют вести дальнейшую холодную деформацию металла до получения проволоки диаметром порядка 0,1-0,2 мм. Полученные значения электросопротивления для проволоки диаметром 0,5 мм (см. таблицу 3.22) удовлетворяют ТУ 1-809-1038-2018 по всем режимам обработки.

Исследования, проведенные по оценке влияния режимов деформационной и термической обработки на механические и электрофизические свойства проволоки электротехнического назначения из сплава 01417 системы Al-P3M, позволили сделать следующие выводы:

- для реализации метода СПП целесообразно использовать полученную в ЭМК непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм, имеющую однородную по сечению и длине структуру и высокую пластичность;
- применение технологической схемы ЭМК+СПП с последующим волочением, либо сортовой прокаткой и волочением, позволяет получить требуемый уровень прочностных и пластических свойств, а также значений электросопротивления;
- комплексом требуемых ТУ 1-809-1038-2018 механических и электрических свойств характеризуется проволока диаметром 0,5 мм, полученная с применением операций литья в ЭМК, непрерывного прессования методом СПП и волочения, отоженная при температурах 350-450°С и времени выдержки 1 ч;
- увеличение скорости деформации (частоты вращения валков) при СПП позволяет получить заготовку с более высокими пластическими характеристиками, что также дает более высокие значения пластичности проволоки диаметром 0,5 мм после отжига, независимо от того, каким способом была получена проволока.

3.5. Выводы по главе

1. В результате исследования влияния скорости кристаллизации и температуры расплава на структуру и свойства непрерывнолитых полуфабрикатов из сплава 01417 установлены оптимальные режимы получения таких слитков методом ЭМК ($T_{л} = 740 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $V_{кр} = 10 \text{ мм/с}$) и их диаметр (12 мм), наиболее подходящих для последующей обработки с помощью методов непрерывного прессования и волочения.

2. Сравнительный анализ комплекса физико-механических свойств проволоки из сплава 01417, полученной из непрерывнолитой заготовки по технологии непрерывного литья в ЭМК, и последующих сортов прокатки и волочения, показал, что он сопоставим с уровнем свойств проволоки, полученной по традиционной гранульной технологии.

3. В процессе экспериментальных исследований разработаны режимы обработки металла и опробована следующая технологическая схема получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417: литье длинномерного слитка диаметром 12 мм в ЭМК при $T_{л} = 740 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $V_{кр} = 10 \text{ мм/с}$; последующее ее непрерывное прессование на установках Конформ, либо СПП до диаметра 5 мм; сортовая прокатки и волочение холоднодеформированных полуфабрикатов с промежуточным отжигом при температуре $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа и окончательным отжигом проволоки диаметром 0,5 мм при температуре $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа.

4. Установлено, что применение предложенной технологической схемы позволяет получать для проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 следующие показатели прочностных и пластических свойств: в нагартованном состоянии $\sigma_{в} = 203-210 \text{ МПа}$ и $\delta = 2,5-4,0 \text{ } \%$; в отожженном состоянии $\sigma_{в} = 143-155 \text{ МПа}$ и $\delta = 13-18 \text{ } \%$. Значения электросопротивления, полученные при применении разработанной технологии, находятся в диапазоне $0,02919 - 0,03054 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ в зависимости от режима обработки и отжига.

5. Применение предложенной технологической схемы с использованием методов непрерывного прессования заготовки, отлитой в ЭМК, на установках Конформ и СПП обеспечивает получение требуемых ТУ 1-809-1038-2018 значений механических и электрических свойств для проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417.

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА 01417 И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проведены с целью практической проверки результатов исследований и отработки промышленной технологии производства проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм по ТУ-1-809-1038-2018 в отожжённом состоянии. Приведенные выше результаты лабораторных исследований дали возможность рекомендовать в качестве исходного материала непрерывнолитую заготовку, отлитую в электромагнитный кристаллизатор, а для волочения - прутки диаметром 5 мм, полученный из этого длинномерного слитка с применением методов непрерывного прессования. Для испытаний применялось промышленное оборудование с использованием установки Конформ с диаметром колеса 300 мм СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель) и установки СПП-400, размещенной на ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск).

4.1. Материалы и оборудование для проведения опытно-промышленных исследований

Для проведения опытно-промышленных испытаний на установке Конформ использовали непрерывнолитую заготовку ЭМК из сплава 01417, химический состав указан в таблице 3.1, диаметром 12 мм в виде бухты с габаритами 300x1000x1000 мм общим весом 300 кг (рисунок 4.1), полученную на действующем технологическом оборудовании ООО «НПЦ Магнитная гидродинамика». Механические свойства заготовки, следующие: предел прочности 212-214 МПа, относительное удлинение 8-9 %. Удельное электросопротивление - 0,03610 Ом·мм²/м.

В качестве оборудования для проведения опытно-промышленных испытаний методом Конформ применили уникальное технологическое оборудование, а именно установку непрерывного прессования Конформ TLJ 300 (рисунок 4.2), технические характеристики которой приведены в таблице 4.1.

Заправку установки Конформ металлом производили по стандартной отработанной технологии согласно заводской технологической инструкции. В процессе испытаний установлено, что наружный диаметр непрерывнолитой заготовки нестабилен по длине, при этом отклонения от номинального размера составляют от 0,5 до 1,5 мм.



Рисунок 4.1 - Опытная бухта непрерывнолитой заготовки из сплава 01417, отлитая методом ЭМК



Рисунок 4.2 – Промышленная установка Конформ TLJ 300

Таблица 4.1 – Технические характеристики промышленной установки Конформ TLJ 300

Параметр	Значение
Номинальный диаметр колеса экструзии, мм	300
Номинальный вращающий момент, кНм	63
Частота вращения, об/мин	2-12,5
Мощность основного двигателя, кВт	90
Диаметр заготовки, мм	12,0÷13,0 ± 0,2
Максимальная ширина изделия, мм	30
Минимальная толщина изделия, мм	1,2
Минимальный диаметр, мм	2,65

Тонкое волочение проволоки до диаметра 0,5 мм в условиях СОАО «Гомелькабель» проводили на промышленном агрегате типа HESF 5/3 компании «MAG» (рисунок 4.3), технические характеристики которого приведены в таблице 4.2.



Рисунок 4.3 – Общий вид агрегата типа HESF 5/3

Таблица 4.2 – Технические характеристики промышленного агрегата HESF 5/3

Параметр	Значение
Диаметр, мм	0,45 - 1,0
Скорость, м/мин	0 - 650
Номинальная мощность, кВт	209

В качестве оборудования для проведения опытно-промышленных испытаний на ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) методом совмещенной прокатки-прессования использовали уникальную установку СПП-400 (рисунок 4.4), с техническими характеристиками, представленными в таблице 4.3.



Рисунок 4.4 – Общий вид установки СПП-400

Таблица 4.3 – Технические характеристики установки СПП-400

Параметр	Значение
Мощность двигателя, кВт	18,5
Длина бочки валков, мм	250
Начальный диаметр валков, мм	400
Диаметр шейки валка, мм	260
Усилие прижимного гидроцилиндра, кН	400
Частота вращения валков, об/мин	4; 8
Момент прокатки, кНм	35
Усилие прижимного гидроцилиндра, кН	400

Последующее волочение проволоки до диаметра 0,5 мм после непрерывного прессования на опытно-промышленной установке СПП-400 проводили в условиях ООО «Альянс-2008» (г. Красноярск) на многопроходном волочильном стане мощностью 110 кВт.

На каждом этапе технологии определяли механические свойства прутков и проволоки при комнатной температуре на испытательных машинах LFM усилием 400 кН и 20 кН и в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Микроструктуру металла исследовали с помощью оптического микроскопа марки «Olympus», светового микроскопа «Ахіо» и растрового электронного сканирующего микроскопа «EVO 50» с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy 350.

Удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76.

4.2. Результаты исследований структуры и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях с применением установки Конформ TLJ 300

Для исследования возможности получения тонкой проволоки диаметром 0,5 мм в условиях СОАО «Гомелькабель» провели опытное прессование на установке Конформ TLJ 300 при температуре 400 °С непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм, полученной в ЭМК. В результате было получено 88 кг опытного прутка диаметром 2,65 мм. Далее получали проволоку диаметром 0,5 мм на агрегате HESF 5/3.

Таким образом, технология получения проволоки включала следующие этапы:

- получение непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм с помощью ЭМК;
- получение заготовки для волочения диаметром 2,65 мм (двухточковое прессование) на установке Конформ TLJ 300;
- отжиг заготовки в проходной печи при температуре 400 °С;
- волочение заготовки до диаметра проволоки 0,5 мм на агрегате HESF 5/3.

Коэффициент вытяжки при прессовании непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм двух прутков диаметром 2,65 мм составил 10,3, а при волочении проволоки до диаметра 0,5 мм обжатие достигало 96,4 %. Был применен промежуточный отжиг в проходной печи при температуре 400 °С. Температура прутков на выходе из матрицы составляла 300-310 °С. Маршруты волочения и обжатия по переходам при получении проволоки приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Маршруты волочения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 по различным режимам, полученной с применением установки Конформ TLJ 300

Номер перехода	Режим 1 «Гомелькабель»		Режим 2 «Альянс 2008»	
	Диаметр, мм	Обжатие по переходам, %	Диаметр, мм	Обжатие по переходам, %
	2,650	-	2,650	-
1	2,512	20,6	2,440	16,3
2	2,239	20,6	2,232	16,1
3	1,995	20,6	2,045	16,2
4	1,778	20,5	1,872	16,1
5	1,585	20,5	1,715	16,1
6	1,413	20,6	1,571	16,2
7	1,259	20,6	1,438	16,2
8	1,122	20,6	1,316	16,2
9	1,000	20,6	1,205	16,2
10	0,891	20,6	1,103	16,2
11	0,794	20,5	1,010	16,1
12	0,708	20,6	0,925	16,2
13	0,631	20,7	0,847	16,3
14	0,562	18,3	0,775	16,1
15	0,500		0,710	16,2
16			0,650	16,2
17			0,545	16,1
18			0,500	

Так как на агрегате HESF 5/3 СОАО «Гомелькабель» использовали только действующие в производстве режимы волочения (режим 1), часть полученных заготовок диаметром 2,65 мм подвергли волочению на ООО «Альянс 2008» по предложенному маршруту (режим 2) со средним обжатием за проход 16 %.

Результаты исследования микроструктуры прутка (рисунок 4.5) в поперечном направлении (рисунок 4.5, а) показали, что в процессе прессования слитка на установке Конформ устра-

няются последствия дендритной ликвации. Вместо дендритных ячеек наблюдается равномерное распределение алюминидов РЗМ по всему диаметру образца (рисунок 4.5, б).

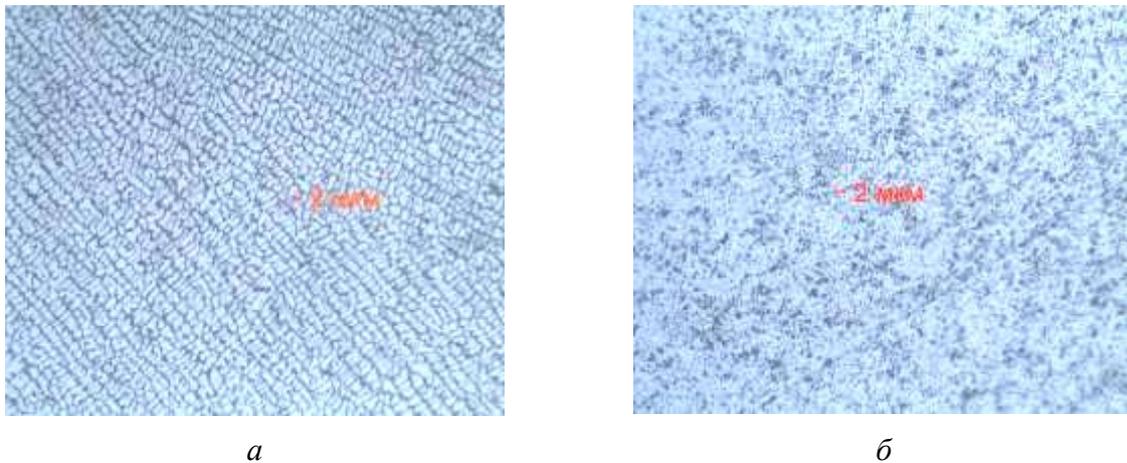


Рисунок 4.5 – Микроструктура непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм (а) и прессованных прутков диаметром 2,65 мм (б)

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры нагартованной проволоки диаметром 0,5 мм (рисунок 4.6) проводили для определения размера частиц алюминидов РЗМ и их распределения по сечению проволоки из сплава 01417, полученной в промышленных условиях.

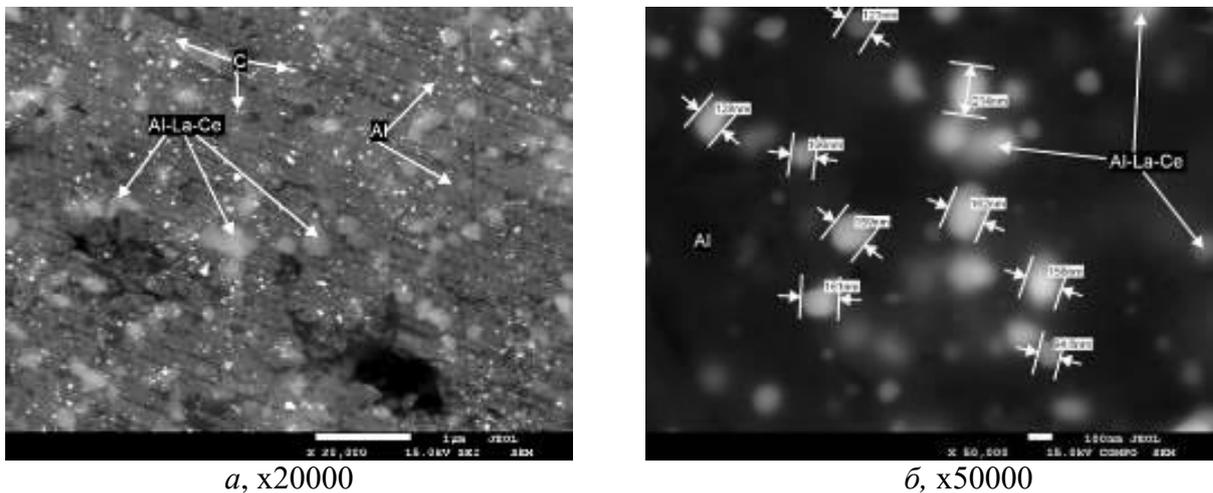


Рисунок 4.6 – Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм в нагартованном состоянии после волочения: а - с использованием SEI контраста, б – с использованием композиционного контраста COMPO

Эти данные были необходимы для определения их влияния на физико-механические свойства проволоки и обоснование выбора режима ее окончательного отжига. Микроструктура проволоки при увеличении 20000 крат (рисунок 4.6, а) характеризуется наличием дисперсных и

достаточно равномерно распределенных алюминидов РЗМ на фоне алюминиевого твердого раствора. Определение размера частиц алюминидов при увеличении 50000 (рисунок 4.6, б) показало, что они составляют 96–214 нм. На рисунке 4.7 представлены результаты определения элементного состава проволоки и микроструктура с использованием COMPO и SEI контраста. Матрица состоит из алюминия, а светлые частицы имеют являются алюминидами РЗМ.

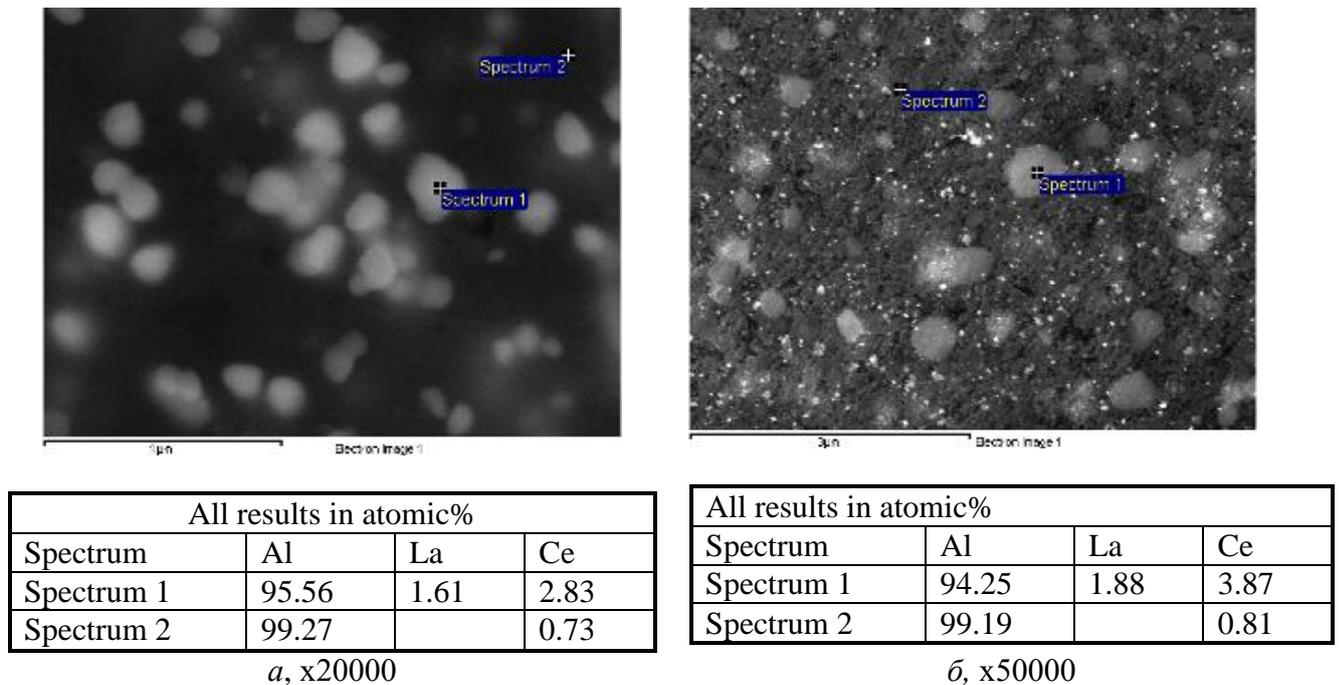


Рисунок 4.7 – Элементный состав и микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в нагартованном состоянии после волочения: *a* - с использованием SEI контраста, *b* – с использованием композиционного контраста COMPO

Определение механических свойств проведены на испытательной машине усилием 20 кН. Установлено что применение установки Конформ TLJ 300 привело к увеличению механических свойств полученного прутка диаметром 2,65 мм, а относительное удлинение увеличивается в 2 раза соответственно, что может свидетельствовать о приобретении сплавом 01417 высокой технологической пластичности (таблица 4.5). Анализ таблицы 4.5 показывает, что в нагартованном состоянии проволока диаметром 0,5 мм сплава 01417 соответствует ТУ-1-809-1038-2018. В промышленных условиях были опробованы следующие режимы окончательного отжига проволоки (температура T , длительность τ): $T=400^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ часа; $T=450^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ часа; $T=500^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ час и $T=500^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ часа. Образцы проволоки имели требуемые ТУ-1-809-1038-2018 механические и электрофизические свойства только при температуре 500°C . В остальных случаях данные по удельному электросопротивлению превышали требуемые значения.

Таблица 4.5 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, полученной по режиму 1 с применением установки Конформ TLJ 300

Состояние проволоки, режим отжиг	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м
Нагартованное	271	1,0	0,03392
	295	1,0	
Отожженное T=400°C, τ =2 часа	259	2,1	0,03229
	253	1,9	
	248	1,8	
Отожженное T=450°C, τ =2 часа	221	3,2	0,03202
	212	2,3	
	208	6,08	
Отожженное T=500°C, τ = 1 час	199	13,2	0,03199
	202	10,8	
	201	10,3	
Отожженное T=500°C, τ =2 часа	195	10,3	0,03193
	194	10,5	
	192	14,7	
ТУ 1-809-1038-2018	142,5	8,0	0,03200

Отжиг проволоки, намотанной на катушки, при температуре 500 °С и длительности 2 и 4 часа в производственных условиях садочной печи СДО8.10.5/12,5 показал, что данные режимы термообработки позволяют получить требуемые физико-механические свойства.

Проведенные испытания проволоки, полученной по режиму 2 (таблица 4.6), подтвердили, что требуемый комплекс механических и электрических свойств может быть достигнут при температуре 500 °С и длительности выдержки 2 и 4 часа.

Таблица 4.6 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, полученной по режиму 2 с применением установки Конформ TLJ 300

Режим отжига	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м
Отожженное T=500 °С, τ = 1 час	185	9,7	0,03201
	184	8,3	
	182	9,4	
Отожженное T=500 °С, τ = 2 часа	182	17,7	0,03184
	176	11,8	
Отожженное T=500 °С, τ = 4 часа	170	17,4	0,03178
	169	13,5	
	170	15,6	
ТУ 1-809-1038-2018	142,5	8,0	0,03200

Таким образом, в промышленных условиях СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель) опробована технологическая схема обработки непрерывнолитой заготовки с применением ЭМК и получено положительное заключение о возможности изготовления проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм на установке непрерывного прессования Конформ (Приложение А).

4.3. Результаты исследований свойств и структуры деформированных полуфабрикатов, полученных в промышленных условиях с применением установки СПП-400

На предприятиях ООО «Завод современных материалов» и ООО «Альянс 2008» были проведены опытно-промышленные исследования по получению проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм с заданным комплексом физико-механических свойств. На основании расчета силовых затрат и реализуемости процесса СПП (см. гл. 2), а также рекомендаций по режимам обработки и отжига (см. гл. 3, раздел 4.2) были выбраны размеры непрерывнолитой заготовки, температурные и технологические параметры для деформации металла. В связи с этим для реализации технологии в условиях опытно-промышленного производства ООО «Завод современных материалов» для установки СПП-400 потребовалась разработка и создание новой конструкции валкового и прессового инструмента, а именно комплекта валков с выступом и канавкой (рисунок 4.8), а также комплекта матриц для прессования (рисунок 4.9).

На установке СПП-400 обработке подвергалась непрерывнолитая заготовка диаметром 18 мм из сплава 01417 (вес бухты составлял 100 кг), полученная методом ЭМК, из которой получили длинномерный горячепрессованный пруток диаметром 9 мм. Затем было проведено волочение до диаметра 0,5 мм с промежуточными отжигами. Применение процесса СПП обеспечило способность слитков к волочению, которое проходило стабильно, без обрывов и проволока имела блестящую качественную поверхность. Возможность процесса СПП для малопластичных сплавов на данной промышленной установке ограничивает крутящий момент на валках, поэтому вытяжка при прессовании была ограничена величиной 8,6. Из анализа проведенных работ по прессованию образцов сплава 01417 было выявлено также, что скорость прессования существенно влияет на качество пресс-изделия. Для поиска оптимальных условий на первом этапе исследований выбрали максимальную частоту вращения валков 8 об/мин при температуре заготовки $T_z = 550$ °С и температуре валков $T_v = 200$ °С. Процесс совмещенной прокатки-прессования прошел стабильно, но такие температурно-скоростные условия привели к образованию температурных трещин по всему сечению прессованного прутка. Поэтому в дальнейшем снизили частоту вращения валков до 4 об/м и после повторения опытов получили прутки диаметром 9 мм без температурных трещин. Таким образом, удалось экспериментальным путем

определить оптимальные технологические параметры процесса СПП для данного сплава, которые не приводили к образованию описанных выше дефектов.

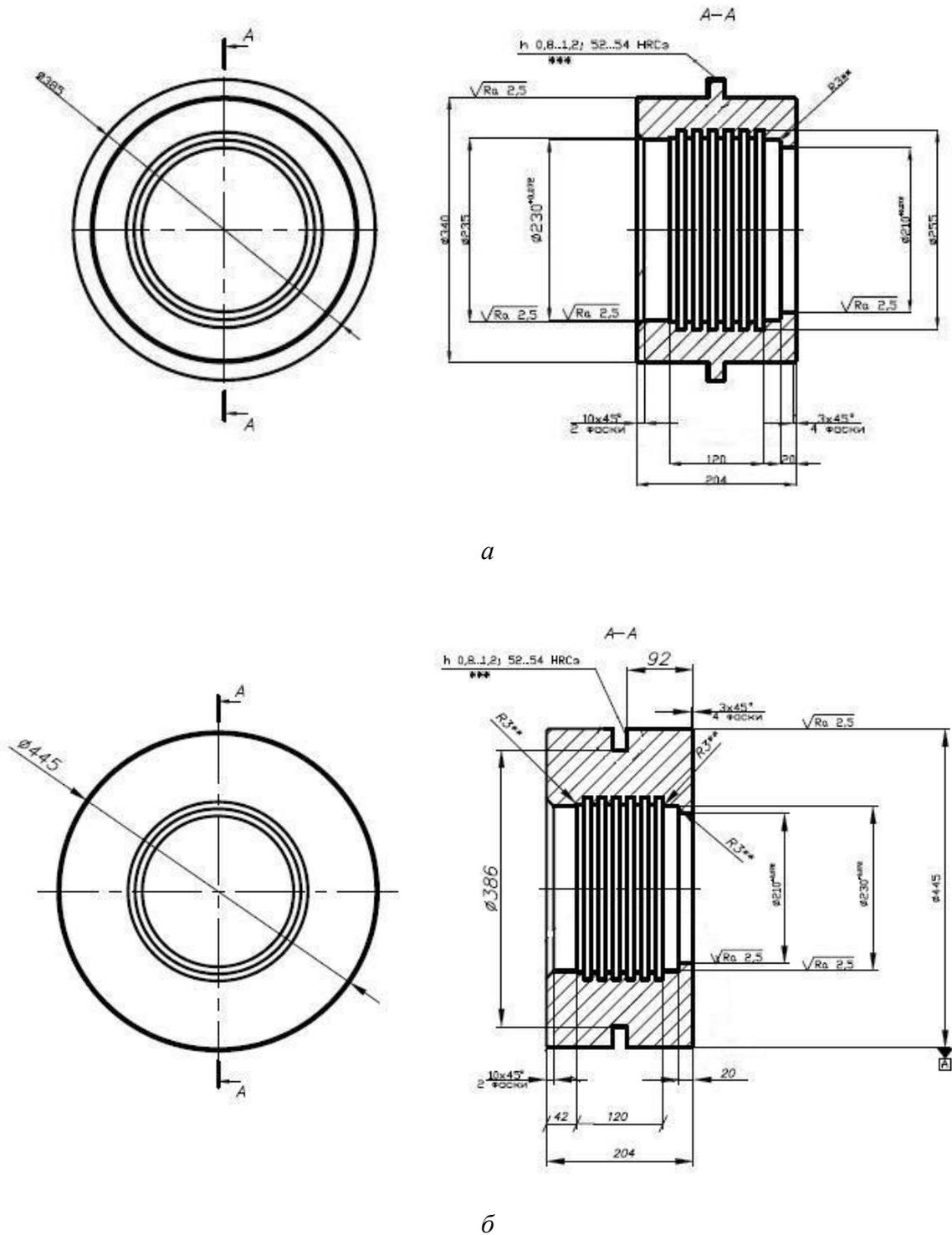


Рисунок 4.8 – Валковый инструмент для установки СПП-400:

а – валок с выступом; *б* – валок с канавкой

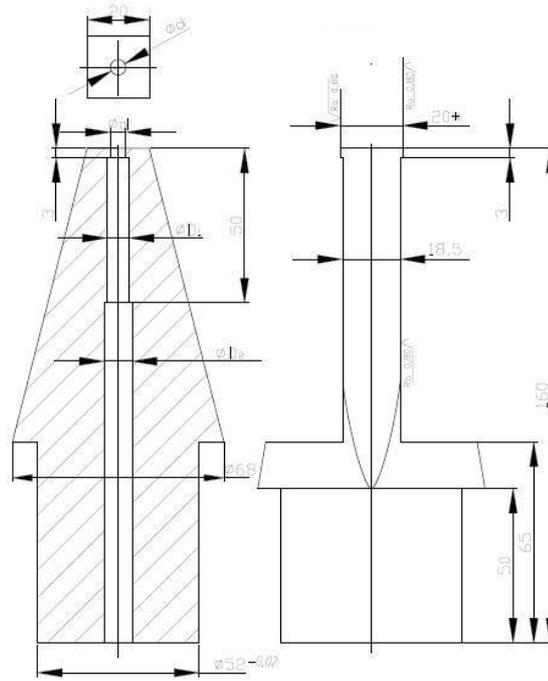


Рисунок 4.9 – Прессовый инструмент для установки СПП-400

Исследование микроструктуры литых и деформированных полуфабрикатов (рисунок 4.10) показало следующее. Микроструктура исходной непрерывнолитой заготовки диаметром 18 мм из сплава 01417 (рисунок 4.10, *а*) представлена в сечении образца мелкими интерметаллидными включениями с размерами 0,008x0,003; 0,005x0,002; 0,01x0,002; 0,007x0,002; 0,017x0,011 мм. В структуре горячедеформированной заготовки диаметром 9 мм после прокатки-прессования (рисунок 4.10, *б*) также присутствуют мелкие интерметаллиды размерами 0,006x0,003; 0,006x0,004; 0,015x0,005; 0,010x0,007 мм.



а



б

Рисунок 4.10 - Микроструктура непрерывнолитой заготовки (*а*) и горячедеформированного прутка после СПП (*б*), x200

В промышленных условиях ООО «Альянс 2008» была разработана программа эксперимента, представленная в таблице 4.7. Температура промежуточных отжигов составляла 470 °С при длительности выдержки 1 час, далее следовало охлаждение на воздухе.

Таблица 4.7 – Программа эксперимента для получения проволоки из прутка, полученного на установке СПП-400

Номер операции	Название операции	Маршрут волочения	Обжатие, %	
			за переход	между отжигами
1.	Волочение (8 переходов)	9,0→8,0→7,0→6,0→5,0→4,45→4,0→3,6→3,0	21,0→23,4→26,5→30,6 20,8→19,2→19,0→30,6	88,9
2.	Отжиг	-	-	-
3.	Волочение (7 переходов)	3,0→2,6→2,25→2,0→1,8→1,6→1,4→1,2	24,9→25,1→21,0→19,0 21,0→23,4→26,5	84,0
4.	Отжиг	-	-	-
5.	Волочение (3 перехода)	1,2→1,0→0,9→0,8	30,6→19,0→21,0	55,0
6.	Отжиг	-	-	-
7.	Волочение (5 переходов)	0,8→0,73→0,66→0,59→0,54→0,5	16,7→18,3→20,1→16,2→14,3	0,8→0,5мм 61%

Результаты испытаний механических свойств проволоки на разных этапах волочения и после окончательного отжига по разным режимам представлены в таблице 4.8. В целом волочение проволоки из исходной заготовки, изготовленной на установке СПП-400, позволило получить на диаметре 0,5 мм требуемый уровень механических свойств, а разработанный маршрут волочения, по которому была получена проволока, был опробован в промышленных условиях предприятия ООО «Альянс 2008».

Результаты исследований показали также, что проволока диаметром 0,5 мм в нагартованном состоянии имеет низкую пластичность (см. таблицу 4.8), при этом относительное удлинение металла не превышает 1,3 %, что не соответствует ТУ 1 809 1038 2018, так как эти значения должны быть не менее 8%.

Поэтому для получения необходимого уровня пластических свойств провели исследования различных режимов окончательного отжига (таблица 4.9). Необходимо также было оценить, какую минимальную степень деформации необходимо реализовать, чтобы получить требуемый уровень прочности и пластичности на нагартованной проволоке между отжигами.

Таблица 4.8 - Механические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава 01417, полученных с применением установки СПП-400

Полуфабрикат	Механические свойства		
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Прутки диаметром 9,0 мм после СПП	143,2	83	31,2
	143,5	87	31,9
Прутки диаметром 7,0 мм	168	147	15,6
	157	150	16,8
	165	145	14,3
Прутки диаметром 6,0 мм	187	168	12,2
	170	167	11,0
	175	155	12,4
Проволока диаметром 3,0 мм после отжига (T=420 °C, τ =5 часов)	129	91	23,3
	130	88	22,4
	131	96	23,2
Проволока диаметром 1,8 мм	192	189	12,8
	193	191	12,7
	203	196	11,7
Проволока диаметром 1,6 мм	234	140	3,8
	232	138	3,7
	238	136	4,0
Проволока диаметром 1,2 мм в нагартованном состоянии	246	147	1,2
	242	150	1,5
	243	152	1,9
Проволока диаметром 1,2 мм после отжига (T=350 °C, τ =5 часов)	129	105	11,9
	127	105	15,2
	127	103	12,4
Проволока диаметром 1,2 мм после отжига (T=400 °C, τ =5 часов)	120	64	18,4
	119	65	17,8
	122	63	18,1
Проволока диаметром 0,5 мм в нагартованном состоянии	257	242	1,3
	260	243	1,2
	262	238	1,0
Проволока диаметром 0,5 мм после отжига (T=500 °C, τ =4 часа)	162	-	16,5
	157	-	16,8
ТУ 1-809-1038-2018	142,5	-	8,0

Предложенный маршрут волочения, в котором использовались высокие степени деформации между проходами (см. таблицу 4.7), дал возможность получить промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм (рисунок 4.11) с требуемым уровнем свойств при использовании окончательного отжига по разным режимам.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства проволоки 0,5 мм из сплава 01417, полученной с применением установки СПП-400, при различных режимах отжига

Состояние и режимы отжига	Механические свойства			Удельное электросопротивление, Ом мм ² /м
	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	
Нагартованное	257	242	1,3	0,03151
	260	243	1,2	0,03157
	262	238	1,0	0,03153
Отожженное (Т=350 °С, τ=4 часа)	162	-	13,0	0,03140
	164	-	13,3	0,03136
Отожженное (Т=400 °С, τ=4 часа)	160	-	14,4	0,03134
	159	-	14,2	0,03137
Отожженное (Т=450 °С, τ=4 часа)	160	-	15,6	0,03138
	157	-	15,2	0,03143
	159	-	15,2	0,03142
Отожженное (Т=500 °С, τ=4 часа)	162	-	16,5	0,03139
	157	-	16,8	0,03132
ТУ 1-809-1038-2018	142,5	-	8,0	0,03200



Рисунок 4.11. Опытные партии проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в катушках

Результаты исследования механических свойств позволяют сделать вывод, что увеличение степени суммарной деформации до значений 72-84 % приводит к резкому снижению, как прочностных, так и пластических свойств металла на разных маршрутах. При этом наблюдается тенденция снижения механических свойств при понижении температуры отжига. В связи с этим установлено, что температура промежуточного отжига не должна быть ниже 420 °С. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что полученная проволока из сплава 01417 по технологической схеме ЭМК-СПП-волочение в части механических свойств и удельного электросопротивления, замеренных при комнатной температуре, в полной мере соответствует ТУ 1-809-1038-2018.

По разработанной технологии на ОАО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) на установке СПП-400 получены опытные партии горячепрессованных прутков диаметром 9 мм

из сплава 01417, а на ООО «Альянс 2008» из них изготовлены опытные партии проволоки диаметром 0,5 мм (Приложение Б).

Для независимых испытаний свойств в соответствии с ГОСТ 10446 проведены замеры временного сопротивления разрыву (предела прочности), относительного удлинения и удельного электросопротивления при комнатной температуре для 5 катушек полученной проволоки в АО «ОКБ Кабельной промышленности» (АО «ОКБ КП» г. Москва. Результаты испытаний подтвердили вывод о соответствии физико-механических свойств проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 ТУ 1-809-1038-2018 (Приложение В).

Исследование термостойкости проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 проводилось 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 ТУ 1-809-1038-2018 (Приложение Г).

Таким образом, результаты независимой экспертизы АО «ОКБ КП» г. Москва и протоколы квалификационных испытаний ООО «ИК ЦТО» г. Новосибирск подтверждают сделанные выводы о полном соответствии полученной проволоки в части механических свойств, удельного электросопротивления и термостойкости требованиям ТУ 1-809-1038-2018.

4.4. Выводы по главе

1. Проведены испытания на промышленном оборудовании СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель) по производству опытных партий проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01470 из длинномерного слитка диаметром 12 мм, полученного с помощью ЭМК, и использованием установки Конформ TLJ 300 для изготовления заготовки для волочения диаметром 2,65 мм (прессование в два канала). При этом были опробованы производственные режимы обработки металла при непрерывном прессовании и волочении, а также режимы промежуточного и окончательного отжига. Выявлено, что образцы проволоки имели комплекс требуемых ТУ-1-809-1038-2018 механических и электрофизических свойств только при температуре окончательного отжига 500 °С и длительности 4 час.
2. Проведены испытания на промышленном оборудовании ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) по изготовлению опытных партий проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01470 из длинномерного слитка диаметром 18 мм, полученного с помощью ЭМК, и использованием установки СПП-400 для получения заготовки для волочения диаметром 9 мм. При этом были разработаны деформационные режимы непрерывного прессования и

маршруты волочения, а также режимы промежуточного и окончательного отжига. Выявлено, что полученная по предлагаемой технологической схеме ЭМК-СПП-волочение проволока диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в полной мере удовлетворяет требованиям технических условий.

3. Полученные опытно-промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм были переданы для проведения независимых испытаний механических, электрических свойств и термостойкости в АО «ОКБ КП» (г. Москва) и ООО «ИК ЦТО» (г. Новосибирск), где было подтверждено, что полученная по двум исследуемым технологиям проволока диаметром 0,5 мм из сплава 01417 имеет в отожженном состоянии требуемый ТУ 1-809-1038-2018 комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ тенденций развития, оборудования и технологий производства длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al-PЗМ 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 электромагнитный кристаллизатор, и получены графические зависимости сопротивления деформации металла от скорости и степени деформации в заданных условиями 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 окон-

чательных 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 отпрессовали в два канала заготовки для волочения диаметром 2,65 мм, из которых дальнейшим волочением изготовили опытную партию проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01470, свойства которой при разработанных параметрах окончательного отжига (температура 500 °С и выдержка 4 часа) соответствовали 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, отпрессовали пруток 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), а также протоколами испытаний механических, электрических свойств и термостойкости, выполненных АО «ОКБ Кабельной промышленности» (г. Москва) и ООО «ИК ЦТО» (г. Новосибирск).
12. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Metallургия и аспирантов по специальности 05.16.05 Обработка металлов давлением (Приложение Д).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров, М. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М. Федоров // *Металлоснабжение и сбыт.* – 2002. – С. 86–91.
2. Чернавина, Д.А. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Д.А. Чернавина, Е.А. Чернавин, А.В. Фаллер, М.Ю. Зданович // *Молодой ученый.* – 2018. – №17. – С. 206–210.
3. Горбунов, Ю.А. Развитие производства проката и кабельно-проводниковой продукции из алюминиевых сплавов на заводах РФ / Ю.А. Горбунов // *Сб. докладов пятого международного конгресса «Цветные металлы».* – 2013. – С. 573-577.
4. Белый, Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий / Д.И. Белый // *Кабели и Провода.* – 2012. – № 1. – С. 8–15.
5. Официальный сайт Открытого акционерного общества «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.okbkr.ru/publications/523/> (дата обращения 28.02.2020).
6. Добаткин, В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин. – М.: *Металлургия*, 1981. – 175 с.
7. Добаткин, В.И. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин, В.М. Федоров. – М.: *ВИЛС*. 1995. – 341 с.
8. Колпашников, А.И. Гранулированные материалы / А.И. Колпашников, А.В. Ефремов. – М.: *Металлургия*, 1977. – 240 с.
9. Северденко, В.П. Прокатка гранул алюминиевых сплавов / В.П. Северденко, Н.В. Шепельский, Ю.А. Горбунов, В.З. Жилкин. – Минск: *Наука и техника*, 1978. – 216 с.
10. Северденко, В.П. Обработка давлением гранул алюминиевых сплавов / В.П. Северденко, Н.В. Шепельский, В.З. Жилкин. – М.: *Металлургия*, 1980. – 219 с.
11. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин. – М.: *Металлургия*, 1964. – 344 с.
12. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: *Металлургия*, 1980. – 319 с.
13. Ерманок, М.З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов / М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. – М.: *Металлургия*, 1977. – 264 с.
14. Гильденгорн, М.С. Непрерывное прессование труб, профилей и проволоки способом Конформ / М.С. Гильденгорн, В.В. Селиванов // *Технология легких сплавов.* – 1987. – № 4. – С.67–83.
15. Бережной, В.Л. Прессование с активным действием сил трения / В.Л. Бережной, В.Н. Щерба, А.И. Батурин. – М.: *Металлургия*, 1988. – 296 с.

16. Зиновьев, А.В. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / А.В. Зиновьев, А.И. Колпашников, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1992. – 511 с.
17. Щерба, В.Н. Прессование алюминиевых сплавов / В.Н. Щерба. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2001. – 768 с.
18. Рудской, А.И. Теория и технологии прокатного производства / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – учебное пособие. – Санкт Петербург: "Наука, 2005. – 542 с.
19. Гун, Г.С. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: монография / Г.С. Гун, М.В. Чукин. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. – 324 с.
20. Рааб, Г.И. Разработка и исследование метода СЛИПП-ИПД для получения алюминиевых полуфабрикатов высокого качества/ Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, Р.З. Валиев // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2014. - №3. – С. 309–315.
21. Логинов, Ю.Н. Возникновение зон неконтактной деформации в процессе прокатки-прессования пористого прутка / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов, Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2017. – № 3. – С. 38 – 41.
22. Жилкин, В.З. Исследование некоторых параметров непрерывного прессования по методу Конформ / В.З. Жилкин, Ю.В. Горохов, В.М. Сергеев, Ф.С. Гилевич // Технология легких сплавов. – 1984. – №7. – С. 10 – 15.
23. Корнилов, В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов/ В.Н. Корнилов. – Красноярск: Изд-во педагогического института, 1993. – 216 с.
24. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
25. Горохов, Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 224 с.
26. Сидельников, С.Б. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации–деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. фе-дер. ун-т, 2015. – 180 с.
27. Grandfield, J.F. Application of a new hot tearing analysis to horizontal direct chill cast magnesium alloy AZ91/ J.F. Grandfield, C.J. Davidson, J.A. Taylor // Light Metals. – 2001 – №1 – P. 895–901.
28. Hao, H. Improvement of casting speed and billet quality of direct chill cast aluminum wrought alloy with combination of slit mold and electromagnetic coil / H. Hao, X. Zhang, Sh. Yao // Materials Transactions. – 2007. –№. 8. – P. 2194 – 2201.

29. Tani, M. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting/ M. Tani, M. Toh, K. Tsunenari // Nippon steel technical report. – 2013. – №. 1. – P. 56–61.
30. Zuo, Yu. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Yu. Zuo, Ji. Cui, D. Mou, Q. Zhu, X. Wang, L. Li // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – № 24. – P. 2408–2413.
31. Liao, H. Microstructure Evolution of Al-0.35%Si-0.2%Mg-0.3%Ce Alloy During Hot Extrusion and Its Contributions to Performances / H. Liao, Yu. Wu, Y. Wang. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015 – № 6. – P. 2503–2510.
32. Liao, H. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys/ H. Liao, Y. Liu, C. Lü, Q. Wang // Journal of Materials Research. – 2017 – №.3. – P. 566–574.
33. Shi, Z. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al–1Fe binary alloys / Z. Shi, K. Gao, Y. Shi, Y. Wang // Materials Science and Engineering. – 2017. – № 632. – P.62–71.
34. Meng, Zh. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al–Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl–KCl melts/ Zh. Meng, W. Haoyu, H. Wei, Zh. Milin, L. Yunna, W. Yanli, X. Yun, M. Fuqiu, Zh. Xingmei. // Sci China Chem. – 2014. – № 57(11). – P. 1477–1482.
35. Официальный сайт ANALYTICRESEARCHGROUP (ARG). Российский рынок самолетов и вертолетов: комплексный анализ и прогноз. Декабрь, 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marketing.rbc.ru/research/40888/> (дата обращения 28.02.2020).
36. Официальный сайт Airbus SE, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.airbus.com/innovation> (дата обращения 28.02.2020).
37. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 1, Под общ. Ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
38. Шмаков, Ю.В. Исследование закономерностей и разработка научных основ технологии производства полуфабрикатов из гранулируемых алюминиевых сплавов для изделий ответственного назначения: дис. ... докт. тех. наук: 05.16.06 / Шмаков Юрий Васильевич. – Москва, 1997 – 456 с.
39. Авдулов, А.А. Отличительные особенности структуры и свойств длинномерных слитков малого сечения из алюминиевых сплавов, отлитых в электромагнитный кристаллизатор/ А. А. Авдулов, Г.П. Усынина, Н.В. Сергеев, И.С. Гудков// Цветные металлы. – 2017. – №7.– С.73-77.
40. Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. – Л.: «Энергия», 1970. – 272 с.
41. Бояков, С.А. Математическое и физическое моделирование линейных индукционных машин для цветной металлургии / С.А. Бояков, Е.А. Головенко, Т.А. Боякова // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Сборник статей. – 2003. – С.11.

42. Первухин, М.В. Быстрая кристаллизация высоколегированных алюминиевых сплавов в электромагнитном поле / М.В. Первухин, Д.К. Фигуровский, Е.А. Головенко, Н.В. Сергеев, М.Ю. Хацаюк // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 47–51.
43. Бочвар, А.А. Металловедение / А.А. Бочвар. – М.: «Металлургиздат», 1956. 495 с.
44. Золоторевский, В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. / В.С. Золоторевский, Н.А. Белов. – М.: «МИСиС», 2005. – 376 с.
45. Ефимов, В.А. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
46. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – Санкт Петербург: БГТУ, 2001. – 105 с.
47. Гершуни, Г.З. Устойчивость конвективных течений / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
48. Первухин, М.В. Математическое моделирование устройств индукционного нагрева: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Первухин Михаил Викторович. – Красноярск, 2000. – 150 с.
49. Стафиевская, В.В. Установки с линейными индукционными машинами для перемешивания и транспортировки жидких металлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Стафиевская Валерия Валентиновна. – Красноярск, 2000.–131 с.
50. Кабаков, З.К. Методология обоснования параметров устройства кондуктивного электромагнитного перемешивания для повышения качества непрерывнолитых заготовок / З.К. Кабаков, Ю.А. Самойлович, В.Ф. Чирихин // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 1. – С. 76–78.
51. Рогачиков, Ю.М. Кристаллизатор–электромагнитный перемешиватель современный синтез механического и электротехнического оборудования для получения высококачественных непрерывнолитых заготовок / Ю.М. Рогачиков, В.Г. Грачев, Л.И. Кузьмина, И.Н. Шифрин, Б.Н. Сивак // Оборудование. – 2007. – № 5. – С. 10–14.
52. Грачев, В.Г. Математическое моделирование МГД процессов в потоке жидкого металла при электромагнитном перемешивании в установках ПНРС / В.Г. Грачев, Б.А. Сивак, С.В. Зарубин, В.Г. Фисенко, А.А. Соловьев // Metallurg. – 2008. – № 4. – С. 45–50.
53. Сергеев, Н. В. Электромагнитный кристаллизатор для получения прутковой заготовки из сплавов алюминия: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/ Сергеев Николай Вячеславович. – Красноярск, 2005. – 144 с.
54. Пат. 48836 Российская Федерация. МПК В 22 D 11/04 Устройство для непрерывного литья слитков в электромагнитном поле [текст] / Первухин М.В., Тимофеев В.Н., Христинич Р.М. [и

др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 20050116058/22; заявл. 26.05.2005; опубл. 10.11.2005. – 9 с. : ил

55. Ворошилов, Д.С. Разработка технологии получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-P3M с применением методов совмещенной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Ворошилов Денис Сергеевич. – Красноярск, 2012. – 20 с.

56. Довженко, Н.Н. Экспериментальные исследования совмещенных процессов обработки для получения прутков и проволоки из алюминиевого сплава 01417 / Довженко Н.Н, Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Лопатина Е.С., Киселев А.Л. // Прогрессивные технологии пластической деформации. Сборник трудов международной конференции. МИСиС, 2009. – С. 308–314.

57. Ворошилов, Д.С. Перспективные технологии обработки алюминиевого сплава 01417 / Ворошилов Д.С., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С.// Материаловедение и металлофизика легких сплавов. Международная научная школа для молодежи: сборник научных статей. Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 152–154

58. Сидельников, С.Б. Исследование технологии получения деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава алюминия с редкоземельными металлами с помощью совмещенных методов обработки /С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Д.С. Ворошилов, Е.С. Лопатина, Л.П. Трифоненков, В.М. Беспалов // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сб. науч. трудов по итогам международной НТК. – 2011.– №13. – С. 100–104.

59. Ворошилов, Д.С. Исследование механических свойств экспериментального сплава алюминия с редкоземельными металлами / Д.С.Ворошилов, В.М. Беспалов // Молодежь и наука: в 3 т.: материалы конференции Т.3. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. – С. 158–161.

60. Сидельников, С.Б. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al - P3M, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Д.С. Ворошилов, Л.П. Трифоненков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2011. – №.2 – С. 23–28.

61. Сидельников, С.Б. Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов из низколегированных сплавов системы Al –P3M, полученных с использованием метода совмещенного литья и прокатки-прессования / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Т.А. Орелкина, Т.Н. Дроздова, В.Н. Баранов, Р.И. Галиев, Д.С. Ворошилов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. –2011. – №4. – С. 40–43.

62. Сидельников, С.Б. Получение длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al –P3M с помощью непрерывных методов обработки / С.Б. Сидельников, Н.Н.

- Довженко, Д.С. Ворошилов, Л.П. Трифоненков [и др.] // Цветные металлы –2012. – С. 794–801
63. Сидельников, С.Б. Применение сплавов системы Al-PЗМ для получения катанки электро-технического назначения / С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, А.С. Сидельников, Е.С. Лопатина, Д.С. Ворошилов // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ: Сб. материалов международной научно-практической конференции. –2014 – С. 173–176
64. Сидельников, С.Б. Прогнозирование свойств металла при совмещенной обработке сплавов системы Al-PЗМ на основе поэтапной оценки их механических характеристик / С.Б. Сидельников, Н.Н. Загиров, Е.С. Лопатина, Р.И. Галиев, Э.А. Рудницкий, Д.С. Ворошилов, А.С. Сидельников // Цветная металлургия. Известия высших учебных заведений. – 2015. – № 4. – С. 32–37.
65. Ворошилов, Д.С. Разработка технологии получения проволоки из высоколегированных сплавов системы Al-PЗМ с использованием методов совмещенной обработки / Д.С. Ворошилов, С.Б. Сидельников, Э.А. Рудницкий // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – №1. – С. 61–65.
66. Сидельников, С.Б. Исследование термостойкости деформированных полуфабрикатов из новых алюминиевых сплавов, полученных с применением совмещенных методов обработки / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, В.М. Беспалов, В.И. Кирко, В.В. Леонов, Д.С. Ворошилов // Материалы за XI международна научна практична конференция «Achievement of high school - 2015». – 2015. – № 14 – С. 3–7.
67. Ворошилов, Д.С. Исследование процесса получения и оценка свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ, полученных различными методами совмещенной обработки / Д.С. Ворошилов, С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов, А.П. Самчук, А.Л. Трифоненков // Цветные металлы и минералы 2016: Сб. тезисов докладов. – 2016. – С.272–273
68. Ворошилов, Д.С. Разработка способов и оборудования для промышленного освоения процессов получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ с применением методов совмещенной обработки / Д.С. Ворошилов, С.Б. Сидельников, О.В. Якивчук, А.П. Самчук, П.Н. Шабарин // XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering, production engineering and physics». –2017, №68. – P. 290–295.
69. Сальников, А.В. Производство катанки из твердых алюминиевых сплавов методом совмещенной прокатки-прессования / А.В. Сальников, А.В. Стрелов, М.М. Мотков // «Цветные металлы и минералы» – 2017. – С. 674 – 677.
70. Пат. 67492 Российская Федерация. МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла [текст] / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Тимофеев В.Н., Соколов Р.Е., Первухин М.В., Пещанский А.С., Телегин А.В., Виноградов О.О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2006146472/22; заявл. 25.12.2006; опубл. 27.10.2007. – 14 с.

71. Сидельников, С.Б. Моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов, И.Н. Довженко [и др.] – 2-е изд., доп. и перераб. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 218 с.

72. Бережной, В. Л. Моделирование процессов прессования с использованием конечно-элементных программ: направления развития и ограничения / В. Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2005. – № 4. – С. 129 – 136.

73. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: Учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.

74. DEFORM-3D Version 6.0 User's Manual [M]. – Columbia, Ohio: Scientific Forming Technologies Corporation, 2006.

75. Соколов, Р.Е. Разработка устройств и технологии для получения проволоки из силуминов с применением методов совмещенной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Соколов Руслан Евгеньевич. – Красноярск, 2010. – 21 с.

76. Губанов, И.Ю. Исследование контактного взаимодействия в системе «металл – инструмент» при совмещенной прокатке-прессовании для повышения эффективности производства электротехнической катанки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Губанов Иван Юрьевич. – Красноярск, 2013. – 20 с.

77. Беспалов, В.М. Исследование совмещенных процессов обработки сплавов системы Al-Zr для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Беспалов Вадим Михайлович. – Красноярск, 2015. – 20 с.

78. Самчук, А.П. Разработка технологии получения и исследование реологических свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов систем Al-Mg и Al-Fe с применением методов совмещенной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Самчук Антон Павлович. – Красноярск, 2018. – 24 с.

79. Sidelnikov, S. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex / S. Sidelnikov, R. Sokolov, D. Voroshilov, M. Motkov, V. Bepalov, M. Voroshilova, S. Sokolova, E. Rudnitskiy, O. Lebedeva, V Borisyyuk. // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 861. – P. 540–546.

80. Пат. 130708 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/22. Установка для испытания на скручивание [текст] / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Грищенко Н.А., Самчук А.П., Губанов И.Ю., Лопатина Е.С., Галиев Р.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образова-

ния «Сибирский федеральный университет». – № 2013110265; заявл.07.03.2013; опубл. 27.07.2013, Бюл. №21. – 9 с.

81. Грищенко, Н.А. Механические свойства алюминиевых сплавов /Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов, Е.С. Лопатина, Р.И. Галиев // Красноярск: Сиб.федер. ун-т, 2012. – 196 с.

82. Сидельников, С.Б. Технология прокатки: учебник / Сидельников С.Б., Константинов И.Л., Ворошилов Д.С. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 180 с.

83. ТУ 1-809-1038-2018 «Проволока электротехническая из алюминиевого сплава марки 01417». Взамен ТУ 1-809-1038-96 введ. 13.06.2018. – М.: ОАО «ВИЛС», 2018. – 11 с.

84. Пат. 2100136 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья и прессования [текст] / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ешкин А.В.; заявитель и патентообладатель Сидельников С.Б. – № 95121390/02; заявл.19.12.1995; опубл. 27.12.1997, Бюл. №36. – 8 с.

85. Пат. 67492 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования [Текст] / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Тимофеев В. Н., Соколов Р. Е., Первухин М. В., Беляев С. В., Пещанский А. С., Телегин А. В., Виноградов О. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2006146472/22; заявл.25.12.2006; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. – 14 с.

86. Пат. 1785459 Российская Федерация, МПК В 21 С 25/00, В 21 С 23/00. Устройство для непрерывного прессования металла [Текст] / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Загиров Н.Н.; заявитель и патентообладатель Довженко Н.Н. – № 4789145; заявл.07.02.1990; опубл. 13.12.1992, Бюл. № 48. – 2 с.

87. Пат. 102313 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей [Текст] / Беляев С.В., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Довженко И.Н. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2010135543/02; заявл. 24.08.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. –12 с.

88. Пат. 102542 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей [Текст] / Беляев С.В., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Губанов И.Ю., Ворошилов Д.С., Киселев А.Л., Галиев Р.И., Гладков Е.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – №2010134857/02; заявл. 20.08.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. – 14 с.

89. Пат. 101390 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Устройство для непрерывной про-

катки и прессования [Текст] / Беляев С.В., Сидельников С.Б., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Губанов И. Ю., Ворошилов Д.С., Киселев А.Л., Широков П.О, Салатов А.В., Галиев Р. И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – №2010134856/02; заявл. 20.08.20; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2. – 20 с.

90. Пат. 119267 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования профилей [Текст] / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Кирко В.И., Лопатина Е.С., Губанов И.Ю., Соколов Р.Е., Падалка В.А., Баранов В.Н., Маслов И.Ю., Киселев А.Л., Беспалов В.М., Мотков М.М., Трифоненков А.Л.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – №2012111077/02; заявл.22.03.2012; опубл. 20.08.2012, Бюл. №23. – 16 с.

91. Пат. 128529 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов [Текст] / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, В.М. Беспалов [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2012147083/02; заявл.11.06.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №15. – 14 с.

92. Пат. 2486027 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования катанки [Текст] / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Беляев С.В., Беспалов В.М. [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". – № 2012100886/02; заявл.11.01.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. №18. – 8 с.

93. Пат. 2487777 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования катанки [Текст] / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Беляев С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". –№ 2012100889/02; заявл.11.01.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. №20. – 7 с.

94. Пат. 139085 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов [Текст] / Сидельников С.Б., Беспалов В.М., Довженко Н. Н., Беляев С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – №2013152037/02; заявл. 21.11.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – 10 с.

95. Пат. 138590 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/08. Устройство для непрерывной про-

катки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов [Текст] / Сидельников С.Б., Беспалов В.М., Довженко Н.Н., Беляев С.В., [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2013151729/02; заявл. 20.11.2013; опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8. – 10 с.

96. Пат. 156613 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Устройство для непрерывной прокатки-прессования полых пресс-изделий из цветных металлов и сплавов [Текст] / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Самчук А.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2015114727/02; заявл. 20.04.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. – 12 с.

97. Пат. 2556264 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В21С 23/00. Установка для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов [Текст] / Белокопытов В.И., Сидельников С. Б., Губанов И.Ю., Сидельников А.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2014104642/02; заявл. 10.02.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. – 17 с.

98. Пат. 2556264 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21С 23/00. Способ совмещенного непрерывного литья, прокатки и прессования металлической заготовки и устройство для его реализации [Текст] / Манн В.Х., Фролов В.Ф., Сальников А.В., Пелевин А. Г., Галиев Р.И., Сидоров А.Ю., Сидельников С.Б.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". – № 2016121617; заявл. 31.05.2016; опубл. 20.12.2017, Бюл. № 35 . – 17 с.

99. Пат. 2689460 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения сварочной проволоки и лигатурных прутков из цветных металлов и сплавов [Текст] / Баранов В.Н., Зенкин Е.Ю., Сидельников С.Б., Крохин А.Ю. [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". – № 2018146200; заявл. 24.12.2018; опубл. 28.05.2019, Бюл. № 16. – 8 с.

100.Пат. 2724758 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06. Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла [Текст] / Сидельников С.Б. Баранов В.Н., Старцев А.А., Гильманшина Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2019139742; заявл. 04.12.2019; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 18. – 8 с.

101.Канцельсон, М.П. Литейно-прокатные агрегаты для производства катанки из цветных ме-

таллов [Текст]: Обзор / М.П. Канцельсон. - М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. – 40 с.

102. Короткова, Н.О. 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.

103. Горохов, Ю.В. 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.

104. Сидельников, С.Б. 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.

105. Dovzhenko, N.N. 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». – 2014. – № 40. – P. 236– 239.

106. Сидельников, С.Б. Исследование технологии получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-РЗМ 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.

107. Voroshilov, D.S. 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. – P. 29–31.

108. Sidelnikov, S. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417 / S. Sidelnikov, D. Voroshilov, M. Motkov, M. Voroshilova, V. Bepalov // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 992 – P. 498–503.

109. Sidelnikov, S.B. 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. – №8. – P. 300 – 304.

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО Ректора ФГАОУ ВО «Сибирский
Федеральный университет»

« 16 »

М.И. Румянцев

2019

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
СООАО «Гомелькабель»

« 9 »

В.А. Куземченко

2019

АКТ

**промышленной апробации результатов исследований по получению тонкой проволоки
авиационного назначения из сплава 01417 методом совмещенной обработки**

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований по созданию и внедрению в производство технологии получения тонкой проволоки из непрерывно-литой заготовки ЭМК сплава 01417 с применением операций совмещенной обработки, в рамках научно-исследовательской работы 18-48-242021 ««Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-P3M с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств», поддержанной Российским фондом фундаментальных исследований, Правительством Красноярского края, Красноярским краевым фондом науки и ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», выполненной коллективом ученых института цветных металлов и материаловедения СФУ в составе С.Б. Сидельникова, Ю.В. Горохова, Д.С. Ворошилова, В.М. Беспалова, М.М. Моткова, А.П. Самчука, А.В. Дурнопьянова, Т.В. Бермешева, Д.В. Назаренко, А.С. Стригина, Н.Б. Эрдынеева, прошла промышленную апробацию. Полученные результаты подтверждают возможность использования технологии электромагнитной кристаллизации при получении непрерывного литых заготовок под тонкое волочение взамен гранульной технологии.

Технология получения тонкой проволоки была разработана в лаборатории совмещенных методов обработки ИЦМиМ СФУ и реализована на опытном участке ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» с применением промышленной установки непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор ЭМК-12, затем на установке непрерывного прессования «TLJ 300» и на линии волочения HESF 5/3 «MAG» (СООАО «Гомелькабель»).

Разработанная технология включает в себя следующие переделы:

- Непрерывное литье длинномерных заготовок диаметром 12 мм методом электромагнитной кристаллизации. (ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»)
- Деформационная обработка длинномерных заготовок на лабораторной (СФУ) и промышленной установках непрерывного прессования (СООАО «Гомелькабель») до диаметров 2,65 – 5 мм.
- Волочение проволоки до диаметра 0,5 мм с промежуточными и окончательным отжигами. (СООАО «Гомелькабель»)

По разработанной технологии изготовлены опытные партии деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки, проведен анализ их механических свойств и электропроводности. Высокие показатели их прочностных и пластических характеристик были подтверждены испытаниями механических свойств по ГОСТ-1497-84, удельного электрического сопротивления по ГОСТ-7229-76. Полученные результаты механических свойств и электропроводности в полной мере соответствуют ТУ 1-809-1038-2018.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать тонкую проволоку авиационного назначения из сплава 01417 с требуемым значением механических свойств и электропроводности.

СОГЛАСОВАНО

Руководитель проекта, д-р техн. наук, проф.
зав. кафедрой ОМД ФГАОУ ВО «Сибирский
Федеральный университет»

« 5 »

С.Б. Сидельников

2019

СОГЛАСОВАНО

Директор
ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»

« 5 »

В.Н. Тимофеев

2019




 УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный университет»

 М.В. Румянцев
 «30» _____ 2020


 УТВЕРЖДАЮ
 Директор
 ООО «Альянс-2008»

 А. Утенков
 «29» _____ 2020
 АКТ

промышленной апробации результатов исследований по получению тонкой проволоки авиационного назначения из сплава 01417 методом совмещенной обработки

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований по созданию и внедрению в производство технологии получения тонкой проволоки из непрерывно-литой заготовки ЭМК сплава 01417 с применением операций совмещенной обработки, в рамках научно-исследовательской работы 18-48-242021 «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-PZM с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств», поддержанной Российским фондом фундаментальных исследований, Правительством Красноярского края, Красноярским краевым фондом науки и ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», выполненной коллективом ученых института цветных металлов и материаловедения СФУ в составе С.Б. Сидельникова, М.М. Моткова, Д.С. Ворошилова, Р.И. Галиева, В.М. Беспалова, Е.С. Лопатиной, А.В. Дурнопольнова, Р.Е. Соколова, Т.В. Бермешева, О.В. Якивчук и студентами М.В. Ворошиловой, Д.В. Назаренко прошла промышленную апробацию. Технология получения тонкой проволоки была разработана в лаборатории совмещенных методов обработки ИЦМиМ СФУ и реализована на опытном участке ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» с применением промышленной установки непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор ЭМК-12, а также на установках совмещенной обработки СПП-200 (ФГАОУ ВО СФУ), СПП-400 (ООО «Завод современных материалов») и линии волочения (ООО «Альянс-2008»). Разработанная технология включает в себя следующие переделы:

- непрерывное литье длинномерных слитков диаметром 12 мм с использованием метода электромагнитной кристаллизации (ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»);
- их деформационная обработка на лабораторной установке СПП-200 (ФГАОУ ВО СФУ) и промышленной установке СПП-400 (ООО «Завод современных материалов») методом совмещенной прокатки-прессования для получения прутков диаметром 5 - 9 мм;
- волочение прутков для получения проволоки диаметром до 0,5 мм с промежуточными и окончательным отжигами (ООО «Альянс-2008»).

По разработанной технологии изготовлены опытные партии деформированных полуфабрикатов в виде длинномерных слитков, прутков и проволоки, проведен анализ их механических свойств и электропроводности. Высокие показатели их прочностных и пластических характеристик были подтверждены испытаниями механических свойств по ГОСТ-1497-84 и ГОСТ 10446-80, удельного электрического сопротивления по ГОСТ-7229-76. Полученные результаты механических свойств и электропроводности в полной мере соответствуют ТУ 1-809-1038-2018.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать тонкую проволоку авиационного назначения из сплава 01417 с требуемыми техническими условиями значениями механических свойств и электропроводности.

СОГЛАСОВАНО
 Руководитель проекта, д-р техн.
 наук, проф. кафедры ОМД
 ФГАОУ ВО «Сибирский
 Федеральный университет»

С.Б. Сидельников
 «23» _____ 2020

СОГЛАСОВАНО
 Директор
 ООО «НПЦ Магнитной
 гидродинамики»



 «23» _____ 2020

СОГЛАСОВАНО
 Директор
 ООО «Завод современных
 материалов»


 В.И. Зыков
 «23» _____ 2020

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора
по научной работе - главный конструктор

Лебедев В.Н.

« 5 / 11 » 2019г.

1 ноября 2019г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 1**1. Цель испытаний.**

Определение физико-механических свойств проволоки из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ на соответствие требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п. 3.14; 3.15.

2. Объект испытаний

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ «ООО НПЦ Магнитной гидродинамики»
г.Красноярск

3. Методика испытаний.

Определение механических свойств проволоки в соответствии с ГОСТ 10446, определение удельного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ 7229. Испытаниям подвергалась проволока из пяти катушек, от каждой катушки отбиралось по десять образцов длиной по 1,5м.

4. Оборудование, использованное при испытаниях.

Наименование	Инв.или зав. №	Срок аттестации/ поверки (до)
Термогигрометр ТИП ИВА-6Н	1705	13.11.2019г
Разрывная машина УТС 110МК-0,5 1-У	3	06.12.2019г.
Микроомметр тип мОм-01	2004-001	26.08.2020г.

Испытания проводились при температуре 25,3 °С, влажности 39,8 %.

3. Результаты испытаний.

Катушка № 1	\varnothing мм.	Площадь поперечного сечения, мм ²	Предел прочности МПа	Длина между кернами, мм.	Удельное электрич.сопр. Ом·мм ² /м	Относительное остаточное удлинение, %
1	0,50	0,19635	171	200	0,031	14
2	0,50	0,19635	171	200	0,031	14
3	0,50	0,19635	170	200	0,031	13
4	0,50	0,19635	171	200	0,031	13
5	0,50	0,19635	171	200	0,031	13
6	0,50	0,19635	173	200	0,031	13
7	0,50	0,19635	173	200	0,031	13
8	0,50	0,19635	173	200	0,031	12
9	0,50	0,19635	172	200	0,031	14
10	0,50	0,19635	172	200	0,031	13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п.3.14; 3.15

Начальник НИО ПИИМ

Испытания провели:

Ведущий инженер

Инженер-испытатель

 Матвеев Ю.А.

 Антипенко Е.Ю.
 Какора Е.Г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора
по научной работе - главный конструктор

Лебедев В.Н.

« 31 » Октября 2019г.

5 ноября 2019г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 2**1. Цель испытаний.**

Определение физико-механических свойств проволоки из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ на соответствие требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п. 3.14; 3.15.

2. Объект испытаний

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ «ООО НПЦ Магнитной гидродинамики» г.Красноярск

3. Методика испытаний.

Определение механических свойств проволоки в соответствии с ГОСТ 10446, определение удельного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ 7229. Испытаниям подвергалась проволока из пяти катушек, от каждой катушки отбиралось по десять образцов длиной по 1,5м.

4. Оборудование, использованное при испытаниях.

Наименование	Инв.или зав. №	Срок аттестации/ поверки (до)
Термогигрометр ТИП ИВА-6Н	1705	13.11.2019г
Разрывная машина УТС 110МК-0,5 1-У	3	06.12.2019г.
Микроомметр тип мОм-01	2004-001	26.08.2020г.

Испытания проводились при температуре 25,3 °С, влажности 39,8 %.

3. Результаты испытаний.

Катушка № 2	\varnothing мм.	Площадь поперечного сечения, мм ²	Предел прочности МПа	Длина между кернами, мм.	Удельное электрич.сопр. Ом·мм ² /м	Относительное остаточное удлинение, %
1	0,50	0,19635	173	200	0,031	15
2	0,50	0,19635	172	200	0,031	14
3	0,50	0,19635	172	200	0,031	14
4	0,50	0,19635	172	200	0,031	16
5	0,50	0,19635	172	200	0,031	14
6	0,50	0,19635	173	200	0,031	15
7	0,50	0,19635	172	200	0,031	15
8	0,50	0,19635	172	200	0,031	13
9	0,50	0,19635	171	200	0,031	14
10	0,50	0,19635	172	200	0,031	14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п.3.14; 3.15

Начальник НИО ПИИМ
Испытания провели:
Ведущий инженер
Инженер-испытатель

 Матвеев Ю.А.

 Антипенко Е.Ю.
 Какора Е.Г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора
по научной работе - главный конструктор

Лебедев В.Н.

« 30 »

2019г.

5 ноября 2019г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 3**1. Цель испытаний.**

Определение физико-механических свойств проволоки из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ на соответствие требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п. 3.14; 3.15.

2. Объект испытаний

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ «ООО НПЦ Магнитной гидродинамики»
г.Красноярск

3. Методика испытаний.

Определение механических свойств проволоки в соответствии с ГОСТ 10446, определение удельного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ 7229. Испытаниям подвергалась проволока из пяти катушек, от каждой катушки отбиралось по десять образцов длиной по 1,5м.

4. Оборудование, использованное при испытаниях.

Наименование	Инв.или зав. №	Срок аттестации/ поверки (до)
Термогигрометр ТИП ИВА-6Н	1705	13.11.2019г
Разрывная машина УТС 110МК-0,5 1-У	3	06.12.2019г.
Микроомметр тип мОм-01	2004-001	26.08.2020г.

Испытания проводились при температуре 25,3 °С, влажности 39,8 %.

3. Результаты испытаний.

Катушка № 3	\varnothing мм.	Площадь поперечного сечения, мм ²	Предел прочности МПа	Длина между кернами, мм.	Удельное электрич.сопр. Ом·мм ² /м	Относительное остаточное удлинение, %
1	0,50	0,19635	167	200	0,031	13
2	0,50	0,19635	168	200	0,031	15
3	0,50	0,19635	168	200	0,031	15
4	0,50	0,19635	168	200	0,031	15
5	0,50	0,19635	168	200	0,031	16
6	0,50	0,19635	168	200	0,031	13
7	0,50	0,19635	169	200	0,031	15
8	0,50	0,19635	169	200	0,031	14
9	0,50	0,19635	169	200	0,031	14
10	0,50	0,19635	169	200	0,031	13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п.3.14; 3.15

Начальник НИО ПИИМ

Испытания провели:

Ведущий инженер

Инженер-испытатель

Матвеев Ю.А.

Антипенко Е.Ю.

Какора Е.Г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора
по научной работе - главный конструктор
Лебедев В.Н.

2019г.

5 ноября 2019г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 4**1. Цель испытаний.**

Определение физико-механических свойств проволоки из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ на соответствие требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п. 3.14; 3.15.

2. Объект испытаний

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ «ООО НПЦ Магнитной гидродинамики»
г.Красноярск

3. Методика испытаний.

Определение механических свойств проволоки в соответствии с ГОСТ 10446, определение удельного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ 7229. Испытаниям подвергалась проволока из пяти катушек, от каждой катушки отбиралось по десять образцов длиной по 1,5м.

4. Оборудование, использованное при испытаниях.

Наименование	Инв.или зав. №	Срок аттестации/ поверки (до)
Термогигрометр ТИП ИВА-6Н	1705	13.11.2019г
Разрывная машина УТС 110МК-0,5 1-У	3	06.12.2019г.
Микроомметр тип МОм-01	2004-001	26.08.2020г.

Испытания проводились при температуре 25,3 °С, влажности 39,8 %.

3. Результаты испытаний.

Катушка № 4	\varnothing мм.	Площадь поперечного сечения, мм ²	Предел прочности МПа	Длина между кернами, мм.	Удельное электрич.сопр. Ом·мм ² /м	Относительное остаточное удлинение, %
1	0,50	0,19635	174	200	0,031	14
2	0,50	0,19635	172	200	0,031	15
3	0,50	0,19635	171	200	0,031	15
4	0,50	0,19635	172	200	0,031	14
5	0,50	0,19635	173	200	0,031	14
6	0,50	0,19635	174	200	0,031	11
7	0,50	0,19635	174	200	0,031	14
8	0,50	0,19635	174	200	0,031	16
9	0,50	0,19635	173	200	0,031	13
10	0,50	0,19635	174	200	0,031	14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п.3.14; 3.15

Начальник НИО ПИИМ

Испытания провели:

Ведущий инженер

Инженер-испытатель

Матвеев Ю.А.

Антипенко Е.Ю.

Какора Е.Г.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального директора
по научной работе - главный конструктор

Лебедев В.Н.

2019г.

5 ноября 2019г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 5**1. Цель испытаний.**

Определение физико-механических свойств проволоки из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ на соответствие требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п. 3.14; 3.15.

2. Объект испытаний

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ «ООО НПЦ Магнитной гидродинамики»
г.Красноярск

3. Методика испытаний.

Определение механических свойств проволоки в соответствии с ГОСТ 10446, определение удельного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ 7229. Испытаниям подвергалась проволока из пяти катушек, от каждой катушки отбиралось по десять образцов длиной по 1,5м.

4. Оборудование, использованное при испытаниях.

Наименование	Инв.или зав. №	Срок аттестации/ поверки (до)
Термогигрометр ТИП ИВА-6Н	1705	13.11.2019г
Разрывная машина УТС 110МК-0,5 1-У	3	06.12.2019г.
Микроомметр тип МОм-01	2004-001	26.08.2020г.

Испытания проводились при температуре 25,3 °С, влажности 39,8 %.

3. Результаты испытаний.

Катушка № 5	\varnothing мм.	Площадь поперечного сечения, мм ²	Предел прочности МПа	Длина между кернами, мм.	Удельное электрич.сопр. Ом·мм ² /м	Относительное остаточное удлинение, %
1	0,50	0,19635	170	200	0,031	15
2	0,50	0,19635	170	200	0,031	14
3	0,50	0,19635	170	200	0,031	11
4	0,50	0,19635	170	200	0,031	16
5	0,50	0,19635	170	200	0,031	15
6	0,50	0,19635	170	200	0,031	16
7	0,50	0,19635	169	200	0,031	14
8	0,50	0,19635	170	200	0,031	16
9	0,50	0,19635	170	200	0,031	14
10	0,50	0,19635	171	200	0,031	13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проволока из сплава 01417 $\varnothing 0,5$ соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018, п.3.14; 3.15

Начальник НИО ПИИМ

Испытания провели:

Ведущий инженер

Инженер-испытатель

Матвеев Ю.А.

Антипенко Е.Ю.

Какора Е.Г.



Исследовательский Комплекс
Центра Технологического
Обеспечения

ООО «ИК ЦТО»
630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, Инженерная, 20
Тел.: +7 (383) 344-94-13
Эл. почта: info@ikcto.ru
www.ikcto.ru

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Лаборатория механических и климатических испытаний образцов, материалов и компонентов (ИЛ ООО «ИК ЦТО»)

Аттестат аккредитации
№ ИЛ-135 от 10.04.2017 г.
Действителен до 10.04.2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ИЛ ООО «ИК ЦТО»


(подпись) Абалымов В. Р.
(фамилия, инициалы)

«15» сентября 2020 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ **№ ИЛ ООО «ИК ЦТО» /1116-2020 от - 01.09.2020**

Листов 9 (Девять)
(общее кол-во листов с приложениями)

**Запрещается частичная или полная перепечатка протокола без разрешения
ИЛ ООО «ИК ЦТО»**

**Результаты испытаний распространяются только на образцы продукции,
прошедшие испытания**

1. ЗАКАЗЧИК: ООО «НПЦ Магнитной Гидродинамики», 660074, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 9А, помещение 225.
2. ОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ: Договор №35 от 02.07.2020.
3. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ: Проволока алюминиевая 01417.
4. ИЗГОТОВИТЕЛЬ: ООО «НПЦ Магнитной Гидродинамики», 660074, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 9А, помещение 225.
5. ВИД ИСПЫТАНИЙ: Экспертиза (на соответствие ТУ 1-809-1038-2018).
6. КОЛИЧЕСТВО ИСПЫТАННЫХ ОБРАЗЦОВ: 30 (Тридцать).
7. КОМПЛЕКТНОСТЬ: 6 (Шесть) комплектов по 5 образцов:
№1 - Образцы без выдержки;
№2 - Образцы после выдержки в течение 1 часа, при температуре 180 °С;
№3 - Образцы после выдержки в течение 1 часа, при температуре 240 °С;
№4 - Образцы после выдержки в течение 1 часа, при температуре 310 °С;
№5 - Образцы после выдержки в течение 400 часов, при температуре 180 °С;
№6 - Образцы после выдержки в течение 400 часов, при температуре 240 °С.
8. РЕГИСТРАЦИОННЫЙ НОМЕР: 20-013.
9. ДАТА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ: Испытания проведены с 03.08.2020 г. по 15.10.2020 г.
10. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ: Определение термостойки проволоки по методике ГОСТ Р МЭК 62004.
11. МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ: Лаборатория механических и климатических испытаний образцов, материалов и компонентов авиационной техники ООО «Исследовательский Комплекс Центра Технологического Обеспечения», 630090, г. Новосибирск, ул. Инженерная, д. 20, тел. +7 (383) 344-94-03. Аттестат аккредитации представлен в приложении 1.
12. УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ: Температура воздуха в лаборатории +23,2(±2) °С. Относительная влажность в лаборатории 55(±10) %. Атмосферное давление 750(±5) мм. рт. ст.
13. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ:
Определение термостойкости проволоки по ГОСТ Р МЭК 62004:
- Выдержка образцов при нагреве в соответствии с п.7;
- Испытания на растяжение (согласно методике ГОСТ 10446);
- Определение удельного электросопротивления (УЭС) (согласно методике ГОСТ 7229).
Критерии отказа в соответствии с требованиями ТУ 1-809-1038-2018: временное сопротивление разрыву <142,5 МПа; относительное удлинение <8%; удельное электросопротивление >0,0320 Ом*мм²/м.

14. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ:

Наименование оборудования	Инвентарный номер	№ аттестата / свидетельства о поверке / калибровке, дата	Действительно до
Сушильный шкаф ПРО ШС 35/350-120	021613001	Аттестат № 142-2020 от 03.08.2020 г.	02.08.2021 г.
Штангенциркуль	002711004	565159 от 28.04.2020 г.	27.04.2021 г.
Микрометр	002111001	565161 от 28.04.2020 г.	27.04.2021 г.
Машина испытательная универсальная УТ модификации УТ-01-0005	000111001	536281 от 02.12.2019 г.	01.12.2020 г.
Гигрометр психометрический ВИТ-2	Зав. №Д4697/15	16.08.2018 г.	08.2021 г.
Измеритель сопротивления жил кабеля КИС	Зав. №368	271851/135374-2018 07.11.2018 г.	11.2020 г.
Линейка ЛМ-1000	Зав. №39	07.07.2020 г.	07.2021 г.
Микрометр МК Ц25	Зав. №00010882	26.02.2020 г.	07.2021 г.

15. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ:

15.1. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ:

Измеренный диаметр проволоки 0,492 мм. Вид образца в захватах испытательной машины показан на рисунке 1. Постоянная скорость нагружения при испытании составила 0,2 мм/с.

Результаты определения предела прочности и относительного удлинения образцов для каждого режима температурной выдержки представлены в таблицах 1 – 6

Сводные данные средних значений по результатам испытаний всех комплектов образцов представлены в таблице 7.

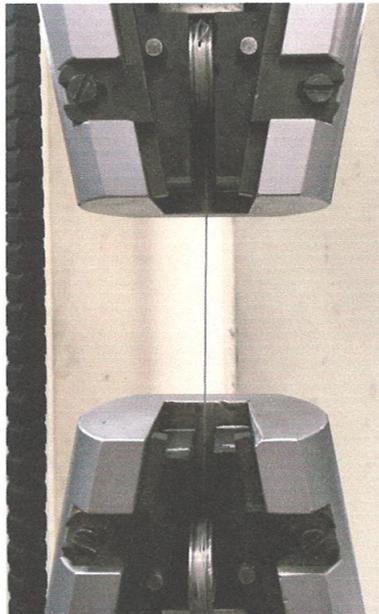


Рисунок 1. Вид образца в захватах испытательной машины

Таблица 1. Результаты испытаний образцов комплекта №1

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
1.1	183	14,5
1.2	182	16,3
1.3	187	16,0
1.4	187	17,9
1.5	187	16,7
Среднее значение	185	16,3
Стандартное отклонение	2	1,2

Таблица 2. Результаты испытаний образцов комплекта №2

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
2.1	178	17,0
2.2	177	14,8
2.3	178	15,5
2.4	177	16,8
2.5	181	16,1
Среднее значение	179	15,9
Стандартное отклонение	2	0,8

Таблица 3. Результаты испытаний образцов комплекта №3

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
3.1	178	14,4
3.2	181	15,8
3.3	177	18,4
3.4	177	16,0
3.5	176	17,3
Среднее значение	177	16,1
Стандартное отклонение	2	1,5

Таблица 4. Результаты испытаний образцов комплекта №4

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
4.1	190	15,1
4.2	186	17,4
4.3	187	15,7
4.4	182	17,2
4.5	187	16,9
Среднее значение	186	16,5
Стандартное отклонение	3	1,0

Таблица 5. Результаты испытаний образцов комплекта №5

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
5.1	183	18,4
5.2	189	18,4
5.3	186	18,8
5.4	195	19,0
5.5	195	18,5
Среднее значение	189	18,6
Стандартное отклонение	5	0,2

Таблица 6. Результаты испытаний образцов комплекта №6

№ образца	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
6.1	179	14,8
6.2	184	16,2
6.3	183	14,7
6.4	173	17,1
6.5	179	15,5
Среднее значение	180	15,7
Стандартное отклонение	4	1,0

Таблица 7. Сводные данные средних значений по результатам испытаний всех комплектов образцов

№ комплекта	Время выдержки, ч	Температура выдержки, °С	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
1	-	-	185	16,3
2	1	180	179	15,9
3	1	240	177	16,1
4	1	310	186	16,5
5	400	180	189	18,6
6	400	240	180	15,7

15.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ:

Измерение удельного электросопротивления производилось в испытательной лаборатории АНО «СибНИЦ» (Приложение 2).

Результаты измерения удельного электросопротивления представлены в таблице 8 и в приложении 3.

Таблица 8. Результаты измерения УЭС

Номер комплекта	Выдержка		Диаметр, мм		Сечение, мм ² Факт.	Длина, мм	УЭС, пересчитанное на температуру 20 °С, Ом*мм ² /м	
	Температура, °С	Время, ч	Нормир.	Факт.			Нормир., не более	Факт.
1	-	-	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03175
	-	-	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	-	-	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03183
2	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03174
	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03168
	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03172
3	180	400	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03163
	180	400	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03149
	180	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03175
4	240	1	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03177
	240	1	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	240	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03148
5	240	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	240	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03177
	240	400	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03162
6	310	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03171
	310	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03150
	310	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03156

16. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предоставленная на экспертизу проволока соответствует требованиям ТУ 1-809-1038-2018 после испытания образцов на термостойкость по методике ГОСТ Р МЭК 62004, в части механических свойств и удельного электросопротивления.

Ф.И.О. лиц, проводивших испытания	Подписи
Никулин Владимир Васильевич	

Протокол испытаний по определению УЭС
в испытательной лаборатории АНО «СибНИЦ»

Автономная некоммерческая организация
«Сибирский Независимый Испытательный Центр»
Испытательная лаборатория
наименование лаборатории

ПРОТОКОЛ № 11240
от 15 октября 2020 года

1. Объект испытаний: провода алюминийевая электротехническая из алюминийевого сплава
марки 01417Н ЭМК – 0,5 ТУ 1-809-1038-2018
2. Метод испытания: ГОСТ 7229
3. Дата доставки образца в лабораторию: 14.10.2020 г.
4. Дата проведения испытаний: 14.10.2020 г. - 15.10.2020 г.
5. Условия проведения испытаний: $t_{\text{исп}} = 24,0^{\circ}\text{C} - 25,5^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{сред}} = 53\%$, $P_{\text{сред}} = 722 \text{ мм рт.ст.} - 723 \text{ мм рт.ст.}$
6. Средства измерения: перечень СИ, использованных при проведении испытаний, приведен в таблице 1

Таблица 1

Наименование, тип	Заводской номер	Диапазон измерений	Данные об аттестации, поверке (даты предыдущей и последующей аттестации или поверки)	Точностные характеристики СИ
Гигрометр психрометрический ВИТ-2	Д4697/15	(15 ... 40) °C (20 ... 90) %	08.2017 – 08.2021	ПГ ± 0,2 °C ПГ ± 5 %
Барометр aneroid М – 67	3424	(600 ... 790) мм рт. ст.	02.2019 – 02.2021	ПГ ± 0,8 мм рт.ст.
Измеритель сопротивления жил кабеля КИС	368	(0,000005 + 170,00) Ом	11.2018 – 11.2020	ПГ ± 0,2 %
Линейка ЛМ-1000	39	(0 ... 1000) мм	07.2020 – 07.2021	ЦД 1 мм
Микрометр МК Ц25	00010882	(0 ... 25) мм	07.2020 – 07.2021	ЦД 0,001 мм

7. Результаты испытаний: результаты испытаний представлены в таблице 2

Таблица 2

Номер комплекта	Выдержка		Диаметр, мм		Сечение, мм ²	Длина, м	Удельное электрическое сопротивление постоянному току, пересчитанное на температуру 20 °C, Ом·мм ² /м	
	температура, °C	время, ч	нормир	факт.			нормир., не более	факт.
1	–	–	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03175
	–	–	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	–	–	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03183
2	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03174
	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03168
	180	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03172
3	180	400	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03163
	180	400	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03149
	180	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03175
4	240	1	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03177
	240	1	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	240	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03148
5	240	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03178
	240	400	0,5	0,492	0,190	1	0,0320	0,03177
	240	400	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03162
6	310	1	0,5	0,491	0,189	1	0,0320	0,03171
	310	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03150
	310	1	0,5	0,490	0,188	1	0,0320	0,03156

Исправления и дополнения протокола, после подписания, не допускаются. Протокол распространяется на образцы, подвергнутые испытаниям. Информация, указанная в протоколе, является конфиденциальной. Частичное воспроизведение протокола, без письменного разрешения АНО «СибНИЦ», запрещено.

Образцы представлены заказчиком, испытательная лаборатория не осуществляла и не несет ответственности за стадию отбора образцов, окончательные результаты относятся к предоставленным заказчиком образцам.



Шеметова О.А.

Лаборант

Кожевникова Т.Г.

