

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Ворошилов Денис Сергеевич

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АІ-РЗМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор
Сидельников Сергей Борисович

Красноярск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ	15
1.1. Методологические основы реализации процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров.....	15
1.2. Анализ современных тенденций развития производства полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов, выбор сплавов и технологий их обработки.....	17
1.2.1. Тенденции развития производства полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов.....	17
1.2.2. Описание свойств выбранных для исследования сплавов.....	23
1.2.3. Обзор технологий и конструкций устройств для обработки сплавов системы Al-PЗМ.....	36
1.2.4. Анализ возможных технологических схем и оборудования для получения деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ.....	39
1.3. Анализ результатов теоретических исследований формоизменения металла и температурных условий процесса совмещенной прокатки-прессования.....	43
1.4. Выводы и постановка задач.....	46
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	48
2.1. Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричного процесса СПП с одним приводным валком.....	48
2.2. Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричного процесса СПП с двумя приводными валками с использованием заготовки круглого сечения.....	62
2.3. Математическое моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах.....	65
2.4. Выводы по главе.....	86

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-PZM С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	87
3.1. Исследование реологических свойств, оборудование и методика проведения экспериментальных исследований.....	87
3.2. Моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования.....	92
3.3. Результаты экспериментальных исследований.....	97
3.4. Исследование структуры литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов.....	102
3.5. Выводы по главе.....	106
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-PZM С СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕРИЯ И ЛАНТАНА 1%.....	108
4.1. Исследование реологических свойств, оборудование и методика проведения экспериментальных исследований.....	108
4.2. Моделирование процесса СПП.....	110
4.3. Результаты экспериментальных исследований.....	114
4.4. Исследование структуры литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов.....	119
4.5. Выводы по главе.....	128
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-PZM С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ И ПРЕССОВАНИЯ	130
5.1. Методика проведения экспериментальных исследований методом БПП.....	130
5.2. Результаты экспериментальных исследований по получению прутков из сплава 01417 методом БПП и разработка новой технологии получения проволоки из этих прутков.....	133
5.3. Результаты экспериментальных исследований по получению прутков из сплава Al-1% PZM методом БПП и разработка новой технологии получения проволоки из этих прутков.....	147
5.4. Выводы по главе.....	179

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg, ЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	181
6.1. Исследование реологических свойств сплава 1580.....	181
6.2. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований.....	185
6.3. Моделирование процесса совмещенной обработки сплава 1580.....	188
6.4. Результаты экспериментальных исследований.....	191
6.5. Исследование структуры и свойств деформированных, отожженных и сварных полуфабрикатов.....	196
6.6. Выводы по главе.....	208
7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ..	210
7.1. Новые технические решения для совмещенной обработки алюминиевых сплавов.....	210
7.2. Опытно-промышленное опробование разработанной технологии получения проволоки из сплава 01417 с применением установки СПП-400.....	228
7.3. Выводы по главе.....	235
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	237
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	239
Приложение А.....	266
Приложение Б.....	267
Приложение В.....	268
Приложение Г.....	269
Приложение Д.....	270
Приложение Е.....	273
Приложение Ж.....	274
Приложение И.....	275

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. До настоящего времени в области металлообработки для производства проволоки малого поперечного сечения из алюминиевых сплавов на всех этапах технологического процесса (получение слитков, прессование или прокатка, волочение, термообработка) преимущественно используется энерго- и металлоемкое формообразующее оборудование и многoperеходные процессы деформации металла [1-5]. Использование традиционных технологий обработки крупных слитков требует значительных затрат энергии и труда, что приводит к значительным потерям металла на различных стадиях металлургического процесса. Кроме того, эти технологии становятся не эффективными при небольших партиях заказов, что в последнее время является особенностью производства проволоки из алюминиевых сплавов системы Al-PЗМ (редкоземельные металлы), особенно для производства кабельной продукции ответственного назначения [1-5]. Кроме того, такие технологии могут быть использованы для получения из этих сплавов сварочной проволоки, проволоки для 3D печати и т.п. [1-5]. Для отечественной промышленности, богатой металлургическими предприятиями, разработка энергоэффективных технологий представляет собой ключевую задачу, как в контексте уменьшения энергоемкости, так и в плане повышения ценовой конкурентоспособности. В последние годы бурно развивается технология производства заготовок методами совмещенной обработки [1-5]. Так, например, непрерывностью, характеризуется высокой мобильностью, гибкостью перехода между различными типоразмерами, а также относительно высокой производительностью отличаются технологии получения слитков малого поперечного сечения, изготавливаемые с помощью электромагнитного кристаллизатора [1-5]. Последующая интеграция их с устройствами совмещенной прокатки-прессования (СПП) позволяет существенно повысить технико-экономические показатели и получать заготовки для волочения требуемых размеров. Немаловажно, что при этом свойства таких заготовок характеризуются повышенными показателями прочности и пластичности длинномерных полуфабрикатов из известных алюминиевых сплавов, что дает возможность усовершенствовать процесс последующего волочения за счет ужесточения режимов обжатий и снижения количества отжигов. Практически такой же технико-экономический эффект дают технологии, совмещающие литье, прокатку и прессование в одном технологическом агрегате [6, 7]. Эти технологии отличаются также тем, что производительность и выход годного готового металла при их реализации значительно выше, чем при применении традиционных технологий обработки. Пример - прессование с помощью горизонтальных гидравлических прессов. Для реализации таких

технологий могут применяться различные методы, например, получивший развитие в последнее время метод совмещенного литья и прокатки-прессования [1].

Научная работа многих отечественных и зарубежных ученых сосредоточена на исследованиях комбинированных и совмещенных процессов, которые основаны на методах литья, прокатки, прессования и волочения, а также на теоретических аспектах этих процессов. К числу выдающихся ученых, внесших значительный вклад в теорию и практику этих процессов, относятся Б. Авитцур, В.Л. Бережной, А.И. Батулин, Н.А. Белов, С.В. Беляев, А.А. Богатов, В.Н. Выдрин, М.С. Гильденгорн, Э. Герман, Ю.В. Горохов, Д. Грин, Р. Гржиб, Г.С. Гун, Н.Н. Довженко, А.В. Зиновьев, А.Г. Колесников, В.Н. Корнилов, Ю.Н. Логинов, И.П. Мазур, А.М. Песин, И.Н. Потапов, В.К. Смирнов, Л.Г. Степанский, А.И. Целиков, С.Н. Черняк, В.Н. Шеркунов, В.Н. Щерба и другие [1-23].

В то же время появление новых технологий требует более глубокого и всестороннего изучения особенностей формоизменения и напряженно-деформированного состояния металлов при разработке и реализации комбинированных и совмещенных методов обработки. Например, практическое применение новых технологий требует теоретических исследований и моделирования формоизменения и температурно-скоростного режима в процессе совмещенной прокатки и прессования круглых заготовок в закрытом ящичном калибре. Это тем более важно, так как в качестве такой заготовки для организации непрерывного процесса обработки может использоваться круглый слиток малого поперечного сечения, полученный с помощью электромагнитного кристаллизатора.

Еще одной научной проблемой является разработка технологических режимов волочения для получения проволоки малых диаметров. Особенно это важно для получения проволоки из алюминиевых сплавов, обладающих высокой термостойкостью, электропроводностью и малым удельным весом, так как, например, одной из ключевых задач в авиастроении является снижение веса летательных аппаратов при сохранении заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств.

Объектом исследований в работе, таким образом, являются технологические процессы и оборудование для получения проволоки из алюминиевых сплавов системы А1-РЗМ.

Таким образом, создание научно обоснованных технических и технологических решений, направленных на использование совмещенных процессов и конструкций модульного оборудования для увеличения эффективности производства пресс-изделий из алюминия и его сплавов, представляет собой важную научно-техническую задачу, которая нуждается в незамедлительном решении. Для этого разработаны и приведены в диссертации методологические и теоретические основы процессов совмещенной обработки, составляющие

научные основы для производства проволоки технического назначения из сплавов системы Al-P3M.

Данное утверждение подтверждается тем, что выполненная работа входит в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899, с изм. и доп. согласно Указу Президента РФ от 16.12.2015 г. № 623, п. 7. Транспортные и космические системы), а также в перечень критических технологий Российской Федерации (утвержден Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899, п. 24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения).

Представленная работа выполнялась в рамках программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки» (13.G25.31.0083) и «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al-Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» (03.G25.31.0265); государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» «Развитие физико-химических основ ресурсосберегающих технологий производства цветных, рассеянных и редкоземельных металлов, создание новых материалов на их основе» (FSRZ-2020-0013); госбюджетной НИР «Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, полученных с применением новых методов литья, прокатки и прессования»; гранта РНФ «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов из низколегированных алюминиевых сплавов системы Al-P3M для производства кабельнопроводниковой продукции с использованием различных совмещенных методов обработки и исследование их реологических характеристик» (23-29-00028); гранта РФФИ: «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-P3M с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств» (18-48-242021).

Целью работы является разработка комплекса технических и технологических решений для создания энергоэффективных и материалосберегающих технологий производства проволоки малых сечений из сплавов системы Al-P3M на базе применения совмещенных процессов обработки, обеспечивающих экономию энергоресурсов, повышение выхода годного металла и производительности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи.

1. Разработка новых технических решений для совмещенной обработки алюминиевых сплавов системы Al-PЗМ и выбор сплавов для исследований.
2. Разработка методологических и теоретических основ процесса совмещенной прокатки-прессования при использовании одного приводного вала и заготовки круглого поперечного сечения.
3. Создание комплекса компьютерных моделей, анализ и получение новых данных по технологическим параметрам совмещенных процессов прокатки, прессования и волочения при использовании заготовки круглого поперечного сечения и процесса БПП для двух исследуемых сплавов системы Al-PЗМ.
4. Проведение экспериментальных исследований для этих сплавов с оценкой параметров термомеханической обработки с целью получения длинномерных литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов из исследуемых сплавов.
5. Оценка физико-механических свойств длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов на всех технологических переделах.
6. Разработка технологии и получение опытных партий проволоки электротехнического назначения диаметром 0,3-0,5 мм из сплавов системы Al-PЗМ с различным содержанием церия и лантана, а также опытных партий сварочной проволоки диаметром 3 мм из сплавов 01570 и 1580.
7. Практическое применение полученных результатов исследований для производства проволоки из исследуемых сплавов.

Структурная схема диссертационной работы приведена на рис. В.1.



Рисунок В1. Структурная схема диссертационной работы

Научная новизна и теоретическая значимость:

1. В рамках развития научных основ совмещенной прокатки-прессования длинномерных деформируемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов впервые разработана теоретическая база для исследований процессов деформации заготовки прямоугольного поперечного сечения при использовании одного приводного валка и заготовки круглого поперечного сечения при использовании двух приводных валков в закрытых ящичных калибрах, включающая методику определения реализуемости процесса СПП, оценку формоизменения металла, расчет температурно-скоростных и энергосиловых параметров с использованием предложенных формул и результатов компьютерного моделирования.
2. С применением вариационных методов разработана математическая модель процесса совмещенной прокатки-прессования в закрытых ящичных калибрах заготовки круглого поперечного сечения, с помощью которой впервые были получены новые научные знания комплекса геометрических, технологических и энергосиловых параметров этого процесса, что позволило реализовать его практическое использование для обработки исследуемых сплавов системы Al-PZM.
3. С помощью методов осадки и кручения получены новые данные и построены регрессионные модели реологических свойств для исследуемых сплавов, которые дали возможность выполнить компьютерное моделирование изучаемых процессов совмещенной обработки.
4. Путем конечно-элементного моделирования установлены закономерности формоизменения металла, распределения температуры, скоростей течения и энергосиловых параметров по длине очага деформации процесса СПП при использовании заготовки круглого поперечного сечения для процесса получения прутков из сплавов системы Al-PZM, отличающихся различным содержанием церия и лантана.
5. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-PZM, полученных методом СПП и последующим волочением с применением отжигов, что позволило достичь регламентированных техническими условиями комплекса механических и электрических свойств.
6. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-PZM, полученных методом БПП и последующим волочением, что позволило снизить трудоемкость при получении проволоки малых сечений из сплава 01417.
7. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-Mg с различным содержанием скандия, полученных методом БПП и последующим волочением с применением отжигов, что

позволило достичь требуемого комплекса физико-механических свойств.

Практическую значимость имеют следующие результаты работы:

1. Создана методика реализации последовательности разработки процессов прокатки, прессования, волочения и термообработки длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, с применением которой проведены всесторонние исследования технологии получения проволоки технического назначения из 4 сплавов системы Al-PZM.
2. Разработаны компьютерные модели изучаемых процессов обработки, которые в дальнейшем были использованы для анализа формоизменения, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процессов совмещенной обработки сплавов алюминия с PZM.
3. Разработаны и исследованы режимы получения из заготовок круглого сечения после ЭМК из сплава 01417 диаметром 12 и 18 мм длинномерных деформированных полуфабрикатов методами СПП и волочения с промежуточными отжигами, которые позволили реализовать новую энергосберегающую технологию производства проволоки на установках совмещенной обработки.
4. С использованием результатов моделирования и экспериментальных исследований разработан комплекс ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из исследуемых сплавов системы Al-PZM с применением совмещенных методов обработки, что позволяет снизить энергоемкость на 30-50 % и увеличить выход годного металла на 18-20 % по сравнению с традиционной технологией прямого горячего прессования на гидравлических прессах.
5. Разработаны технологические, деформационные и температурно-скоростные режимы непрерывного прессования для установок СПП-400 и СПП-200 и проведены испытания в условиях ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) с целью изготовления опытных партий деформированных полуфабрикатов малого диаметра из сплавов Al-PZM из непрерывнолитой заготовки после ЭМК круглого поперечного сечения методом СПП и из расплава методом БПП.
6. Получены опытно-промышленные партии проволоки малого поперечного сечения (диаметр 0,3 мм) из сплава 01417, которые прошли независимые испытания механических, электрических свойств и термостойкости, и установлено их соответствие ТУ 1-809-1038-2018.
7. Установлены рациональные деформационные режимы бесслитковой прокатки-прессования при получении заготовки под последующее волочение сварочной проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия (сплавы 1580 и 01570).
8. Предложена технологическая схема получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия, которая состоит из трех технологических процессов (БПП, сортовой прокатки и волочения и отжига),

позволяющих получить сварочную проволоку диаметром 3 мм по ГОСТ 7871-2019 и качественные сварные швы при ее применении, что позволяет обеспечить прочность (временное сопротивление) на уровне 75-85% от прочности основного металла.

9. Создан ряд технических и технологических решений, защищенных патентами РФ (№2457914, №2570684, № 2689460, №2724758, №2792327, №2847204), на основе которых спроектирован инструмент и изготовлена установка для совмещенной обработки алюминиевых сплавов, отличающиеся тем, что их применение позволяет снизить трудо- и энергоемкость, повысить производительность процесса непрерывной прокатки-прессования и качество получаемых профилей, а также позволяет получать деформированные полуфабрикаты из заготовок круглого поперечного сечения малопластичных металлов и сплавов с высоким уровнем механических свойств.

Реализация работы в промышленности. Результаты исследований прошли апробацию на следующих промышленных предприятиях: ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск), АО «Красмаш» (г. Красноярск), СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель, Республика Беларусь) (Приложение А-Е). Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технологий совмещенной обработки только для изготовления проволоки из сплава 01417 составил 7215500 руб в год (Приложение Ж).

Результаты работы внедрены в учебный процесс для подготовки магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» (программа 22.04.02.05 «Обработка металлов давлением») и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4. (05.16.05) «Обработка металлов давлением» (Приложение И).

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием проверенных наукой методов теории обработки металлов давлением, математических и статистических моделей, а также результатами лабораторных и заводских испытаний, которые отражают реальные производственные условия.

Для проведения исследований использовались основные законы теории обработки металлов давлением, а также экспериментальные методики для определения параметров деформирования. Свойства металла анализировались через испытания на растяжение и кручение, а его микроструктура изучалась с применением металлографических методов. Моделирование процесса деформации проводилось с помощью метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты численного моделирования и экспериментально-аналитической оценки параметров процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре для исследуемого сплава;
- 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 методом СПП из сплава 01417 с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств;
- технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 2,0 мм из сплава Al+1%РЗМ с применением методов СПП и БПП с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств;
- технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 3,0 мм из сплавов 01570 и 1580 с применением метода БПП с заданным уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств.

Основные результаты диссертационной работы изложены и обсуждены на российских, международных конференциях и конгрессах, таких как «XV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering» (г. Ченстохова, Республика Польша, 2014 г.); «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2017, 2019 г.); «Magnitogorsk Rolling Practice» (г. Магнитогорск, 2019, 2023, 2024 г.); «Наука и технологии» (г. Миасс, 2023 г.), «Инновации и прорывные наукоемкие технологии в развитии промышленности и образования» (г. Рудный, Республика Казахстан, 2024 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 39 публикациях, в том числе 1 монографии, 10 статьях из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 22 статьях в изданиях, входящих в международную базу Scopus, и 6 патентах.

Настоящая работа является продолжением комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре обработки металлов давлением института цветных металлов (ИЦМ) ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ).

Проведенные работы осуществлялись совместно с соавторами, при этом в диссертацию включены результаты исследований, которые составляют ту часть, которая получена непосредственно автором или при его ведущем участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения. Содержит 275 страниц машинописного текста, 141 рисунок, 62 таблицы, библиографический список из 261 наименования и 8 приложений.

Автор выражает глубокую благодарность своему учителю и научному консультанту, доктору технических наук, Заслуженному изобретателю Российской Федерации, профессору С.Б. Сидельникову.

Отдельную благодарность автор выражает ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики» в лице директора, доктора технических наук, профессора В.Н. Тимофеева, и начальника отдела технологий и новых продуктов, кандидата технических наук М.М. Моткова за помощь в апробации результатов исследований.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

В последнее время процессы совмещенной обработки с применением операций литья, деформации металла и термообработки получают все большее развитие для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов [1, 15, 20-23]. Наиболее значимое применение они получили при обработке алюминиевых сплавов. Поэтому в данной главе разработаны и приводятся методологические основы реализации процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов. В соответствии с ними показана последовательность разработки технологических процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров из сплавов алюминия с переходными металлами [1]. Каждый из этапов включает аналитические, теоретические и экспериментальные исследования процессов получения заготовок методом непрерывного литья, их деформацию путем применения совмещенной прокатки-прессования и дальнейшего волочения полученных прутков до заданных размеров проволоки.

Материалы главы опубликованы в работе [1].

1.1. Методологические основы реализации процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров

Для разработки и исследования процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов сформулированы следующие основные этапы реализации технологии, имеющие методологическую направленность.

Методика реализации последовательности разработки технологических процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров включает следующие этапы.

1. Анализ современных тенденций развития производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов.
2. Анализ фазового и структурного состояния выбранных для исследования сплавов, выбор легирующих элементов с помощью диаграмм состояния и количественного соотношения основного металла и легирующих элементов.
3. Проведение патентного поиска на составы алюминиевых сплавов и конструкций устройств для их совмещенной обработки и выбор перспективных для использования в промышленности сплавов и способов деформации металла.

4. Анализ результатов теоретических исследований формоизменения металла и температурных условий процесса совмещенной прокатки-прессования.
5. Описание возможных технологических схем и выбор оборудования для получения деформированных полуфабрикатов совмещенными методами.
6. Теоретические исследования процесса совмещенной прокатки-прессования.
7. Моделирование режимов и подготовка рекомендаций по выбору термомодеформационных и скоростных параметров совмещенной обработки для исследуемого сплава.
8. Расчет реализуемости процессов совмещенной обработки исследуемых сплавов, деформационных режимов и силовых затрат, сравнение результатов расчета с результатами моделирования и выбор технологических параметров для проведения экспериментальных исследований.
9. Проектирование инструмента, подготовка установки совмещенной обработки и аппаратуры для замера энергосиловых параметров изучаемых процессов с учетом особенностей деформации и свойств исследуемых сплавов.
10. Получение опытного сплава и изучение свойств литых полуфабрикатов, корректировка количества легирующих элементов в сплаве и их соотношения.
11. Разработка последовательности технологических операций обработки для получения проволоки заданных размеров.
12. Получение опытных партий длинномерных деформированных полуфабрикатов и исследование их структуры и уровня физико-механических свойств.
13. Назначение режимов термообработки деформированных полуфабрикатов.
14. Изучение закономерностей формирования свойств готовых изделий в зависимости от особенностей технологии и последовательности этапов получения деформированных полуфабрикатов.
15. Корректировка режимов обработки с целью получения уровня заданных свойств.
16. Промышленное опробование разработанной технологии и проверка на соответствие уровня физико-механических свойств полученных полуфабрикатов требованиям стандартов или технических условий.

1.2. Анализ современных тенденций развития производства полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов, выбор сплавов и технологий их обработки

1.2.1. Тенденции развития производства полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов

Исследование научно-технической и патентной литературы [1-70] продемонстрировало, что в качестве перспективных материалов для производства проволоки в различных отраслях промышленности следует учитывать две группы алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами (РЗМ):

1. **сплавы системы Al-Ce-La** [1-5, 7, 26-55, 57-65, 68];
2. **сплавы системы Al-Mg-Sc** [1, 6, 8, 67-68].

Сплавы первой группы в основном используются для производства электротехнической проволоки, включая проводку ответственного назначения, требующих повышенных механических характеристик и устойчивости к высоким температурам. К сплавам из второй группы относятся материалы, применяемые для производства проволоки, как сварочной, так и лигатурной.

Редкоземельные металлы (РЗМ) были впервые обнаружены в 1788 году. Однако до 1950 года ежегодное мировое производство и потребление РЗМ составляло менее 5000 тонн оксидов редкоземельных металлов, и до 1960 года они редко использовались в повседневной жизни [71-75]. Со второй половины XX столетия применение РЗМ существенно распространилось на повседневную жизнь, такую как нефтедобыча и связанные с ней области, различные компьютерные системы и телевизионные экраны. Глобальное потребление и производство РЗМ значительно увеличилось в последующие десятилетия (рисунок 1.1) [75].

Общая стоимость продуктов по всему миру, содержащих РЗМ, составляет не менее 1,5–2 триллионов долларов США (долл. США), формируя почти 5% мирового валового национального продукта (если рассматривать только 2009 год) [72]. Этот переход приведет к значительному росту спроса на РЗМ в ближайшие годы [73, 74]. Эта тенденция будет стимулировать рост спроса на производство РЗМ во всем мире, что потребует создания долгосрочной устойчивой цепочки поставок [75].

В 2016 году мировое производство РЗМ составило 126 000 метрических тонн (рисунок 1.2) [75, 78], которое в основном обеспечивал Китай (85%) и Австралия (10%), а остальная часть была распределена между Бразилией, Малайзией, Вьетнамом, Российской Федерацией и Индией. Кроме того, стоит принимать во внимание такой существенный фактор, как осуществление незаконной добычи и производства в южной части Китая [75].

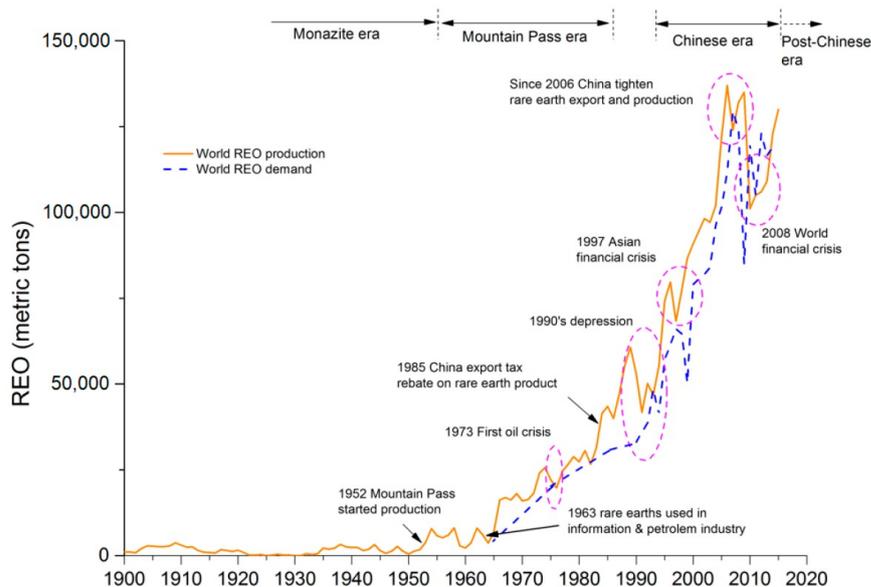


Рисунок 1.1 – Мировое производство и спрос РЗМ [76-78]

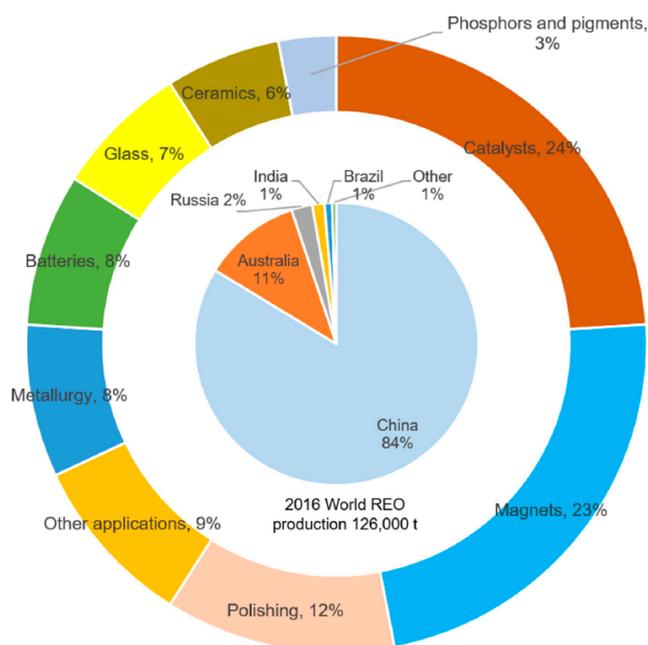


Рисунок 1.2 – Мировое производство/потребление РЗМ [75, 78]

Хотя невозможно представить единую модель, незаконное производство, по оценкам, достигает 20% легального производства в Китае [75, 79]. В настоящее время выявлено более 200 РЗМ-содержащих минералов [80, 81]; тем не менее, большая часть мирового производства РЗМ в настоящее время происходит из четырех минералов: бастназит, монацит, ксенотим и лопарит [82]. Наибольшая доля мирового производства редкоземельных минералов приходится на китайский бастназит, за ним следуют монацит из Австралии и Индии, лопарит из Российской

Федерации и ксенотим из Малайзии. Эти редкоземельные минералы в основном связаны с магматическими породами (щелочными породами и карбонатитами) [75].

Кроме того, другие экономически ценные минералы РЗМ встречаются в равнинных месторождениях, пегматитах, железисто-медно-золотых, морских фосфатах и остаточных отложениях глубокого выветривания магматических пород [83]. Среди этих минералов легкие минералы РЗМ составляют самый большой сегмент, в то время как тяжелые минералы РЗМ в настоящее время в основном добываются из ионно-адсорбционных глин на юге Китая, причем в этом регионе, в частности, сосредоточено и нелегальное производство [75].

Основываясь на опубликованных данных [75], общий объем глобальных ресурсов РЗМ составляет 478 млн. т оксидов РЗМ, расположенных в Китае (164 млн. т), Бразилии (55 млн. т), Австралии (49 млн. т), Российской Федерации (48 млн. т) и Гренландии (43 млн. т), оставшиеся 119 млн. т распространены в Канаде, Швеции, США, Вьетнаме и др. (рисунок 1. 3).

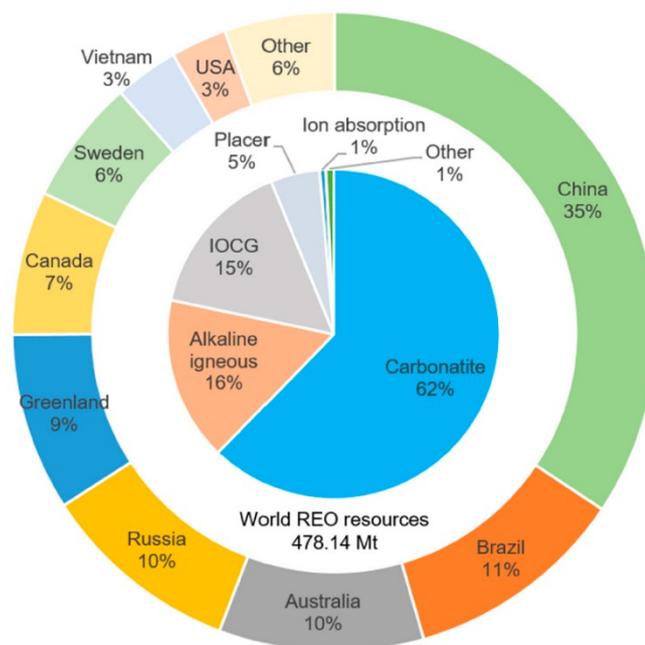


Рисунок 1.3 – Распределение глобальных редкоземельных ресурсов по основным типам месторождений и странам [75]

Эти ресурсы могут поставлять глобальные РЗМ с текущей производительностью (130 тыс. т/год оксидов РЗМ) в течение более ста лет.

Данные о концентрации отдельных РЗМ в настоящее время доступны не для всех месторождений, поскольку большинство из них находится на ранних стадиях разработки. Однако 59 из 178 месторождений РЗМ достигли стадии разработки (либо находятся в стадии разведки, либо технико-экономической оценки), и их распределение РЗМ отображено в

литературе; ресурсы, соответствующие 59 месторождениям РЗМ, составляют 276 млн. т оксида РЗМ, что эквивалентно 58% от общих ресурсов 178 месторождений (рис. 1.4).

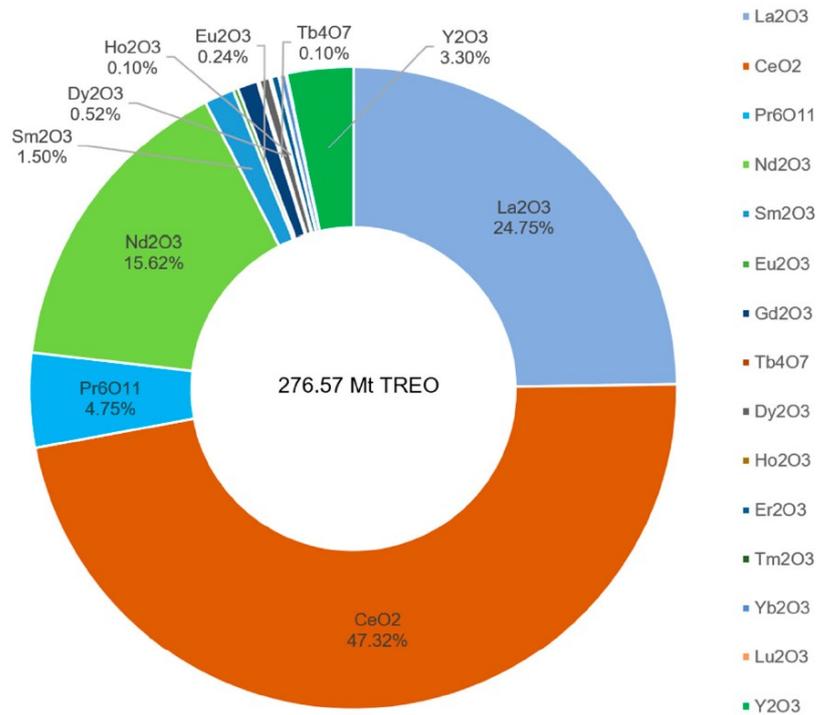


Рисунок 1.4 – Ресурсы оксидов РЗМ для 59 месторождений на продвинутой стадии разработки [75]

Исходя из этих данных, церий (Ce) является наиболее распространенным РЗМ (~ 130 млн. т), за которым следуют лантан (La) (~ 68 млн. т), неодим (Nd) (~ 43 млн. т), празеодим (Pr) (~ 13 млн. т) и иттрий (Y) (~ 9 млн. т).

Изменение требований потребителей к механическим свойствам деформируемых полуфабрикатов, используемых в силовых кабелях и токопроводящих жилах, привело к резкому росту потребления электротехнической продукции из алюминиевых сплавов. В катанке для изготовления проводов и кабелей из имеющихся на рынке сплавов АВЕ в качестве легирующих добавок используются кремний и магний, которые улучшают прочностные характеристики, но значительно снижают проводимость проволоки. Чтобы минимизировать потери электроэнергии во время ее передачи, требуется создание новых алюминиевых сплавов, обладающих высокой прочностью и хорошими электропроводными характеристиками. Перспективы расширения рынка проводов с новыми свойствами - это, прежде всего, замена выработавших свой ресурс алюминиевых ЛЭП и переход ЛЭП на изолированные провода и провода со специальными свойствами (устойчивость к погодным условиям, обледенению, сильным вибрациям, высоким или низким температурам). Поскольку провода из алюминиевых

сплавов дешевле медных, то в качестве альтернативы рассматривается возможность замены некоторых медных кабелей, применяемых в силовых сетях, на кабели, изготовленные из инновационных алюминиевых сплавов.

Современная электрокабельная индустрия широко использует алюминиевые сплавы. Данные сплавы обеспечивают очень ценное сочетание свойств: механические, физические, химические (коррозионные). Также эти сплавы имеют относительно высокую степень технологичности и хорошо поддаются методам обработки металлов давлением. Для электротехнической промышленности алюминий и его сплавы с добавлением редкоземельных металлов ценятся, прежде всего, за низкое электросопротивление, что обуславливает их широкое применение в странах с развивающейся экономикой, особенно в секторах, где этот показатель является ключевым фактором. В развивающихся и развитых странах, в том числе и в Российской Федерации, электротехническая промышленность занимает значительную долю в области потребления алюминия. Значительные объемы полуфабрикатов в виде различной алюминиевой проволоки широко используются для изготовления проводов воздушных линий электропередач (ЛЭП) (рис. 1.5).

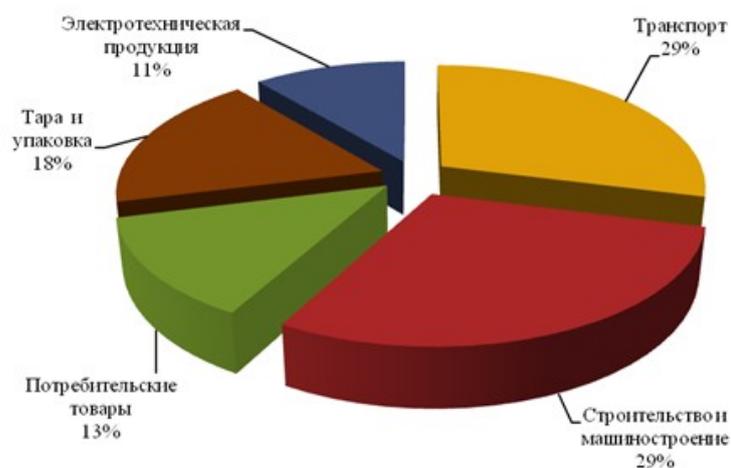


Рисунок 1.5 – Диаграмма потребления алюминия в Российской Федерации [84-86]

Потребление алюминия в мире и Российской Федерации неуклонно растет каждый год. Примерно 90% алюминия, используемого в энергетической сфере, приходится на электротехническую (кабельную) индустрию, а также 14% от всех объемов потребления этого металла (см. рис. 1.6). В странах с развитой экономикой спрос на алюминий растет благодаря расширению автопрома, в то время как в развивающихся государствах он увеличивается за счет развития строительства и электротехнической промышленности (рисунок 1.7) [87].

Редкоземельные элементы, такие как церий, лантан и празеодим, представляют большой интерес в качестве добавок к проводящим материалам, особенно к алюминиевым проводящим

материалам, поскольку они оказывают положительное влияние на алюминиевые сплавы [33]. При этом основными полуфабрикатами являются плоские и цилиндрические слитки, литейные сплавы и электротехническая катанка.

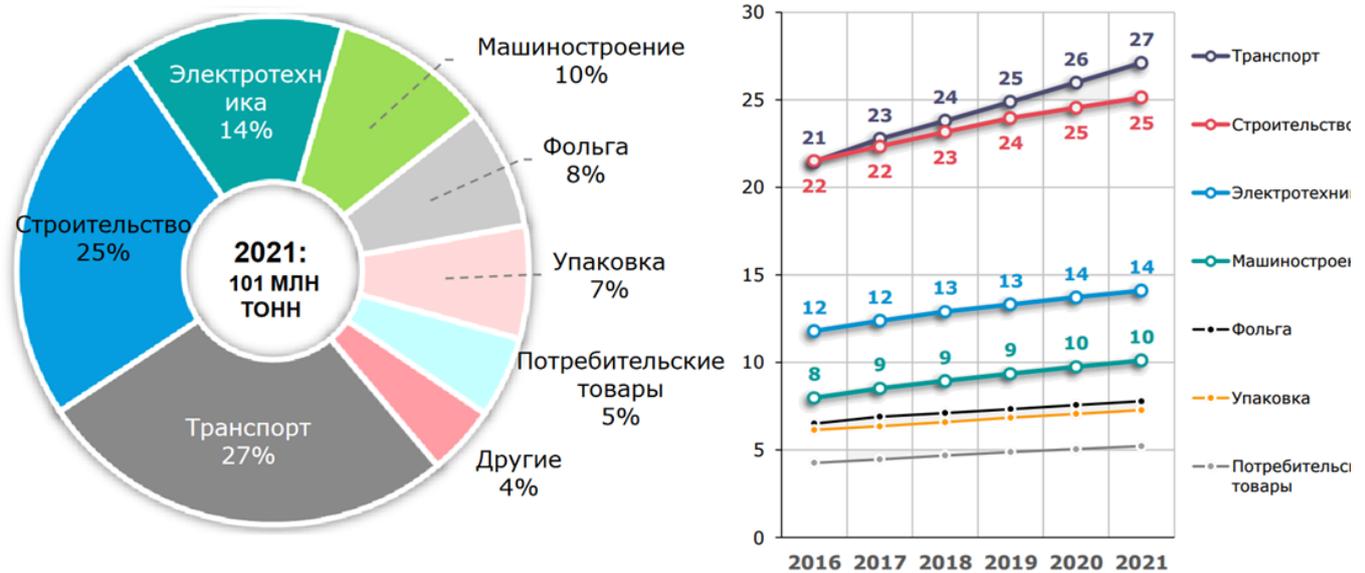


Рисунок 1.6 – Структура потребления алюминия по различным отраслям



Рисунок 1.7 – Структура производства различных полуфабрикатов из сплавов алюминия

Для выбора сплавов в соответствии с предложенной методикой необходим анализ фазового состояния соответствующих систем и количественного соотношения основного металла и легирующих элементов.

1.2.2. Описание свойств выбранных для исследования сплавов

Анализ диаграмм фазовых равновесий для сплавов системы Al-Ce-La показал следующее.

Диаграммы фазовых равновесий алюминия с церием, лантаном и празеодимом представлены на рис. 1.8-1.10. При их образовании и в зависимости от выбранного способа кристаллизации сплавов эти металлы формируют с алюминием аналогичные системы. Их взаимодействие с алюминием происходит по схожему механизму.

Наличие редкоземельных металлов в виде крупных частиц указывает на нерациональное расходование этих дорогостоящих компонентов. Отсюда следует, что для получения алюминиевых сплавов, имеющих в своем составе различные РЗМ, необходимо использовать различные технические приемы. Одно из основных направлений этих приемов – это получение различных соединений, содержащих интерметаллиды с РЗМ, в присутствии избытка алюминия имеющих высокодисперсное состояние.

Поэтому наиболее эффективного легирования РЗМ можно добиться, используя небольшие количества этих компонентов, вводя их в сплавы Al-РЗМ при приготовлении сплава. Соединения типа $Al_{11}Ce_3$ кристаллизуются при температуре $1240^{\circ}C$ и находятся в равновесии с твердым раствором. В ходе проходящих эвтектических реакций при температуре $640^{\circ}C$ в сплавах алюминия, содержащих РЗМ в количестве нескольких атомных процентов (или меньше), происходит кристаллизация, и возникают интерметаллидные соединения алюминия с этими РЗМ.

Соединение $Al_{11}Ce_3$ имеет плавную линию и крутой ее подъем жидкой фазы в растворе алюминия на диаграмме. Это дает достижение равновесия в концентрации сразу, как образовались ядра интерметаллидов. При этом далее рост этих ядер останавливается. Возникает раствор почти чистого алюминия, так как при эвтектической температуре растворимость РЗМ (того же церия, лантана и празеодима) не будет более 0,01%-ат. Данная особенность при кристаллизации позволяет получать интерметаллидные частицы размером частиц до нескольких микрон в подобных сплавах, вплоть до размера менее 1 мкм по большей части.

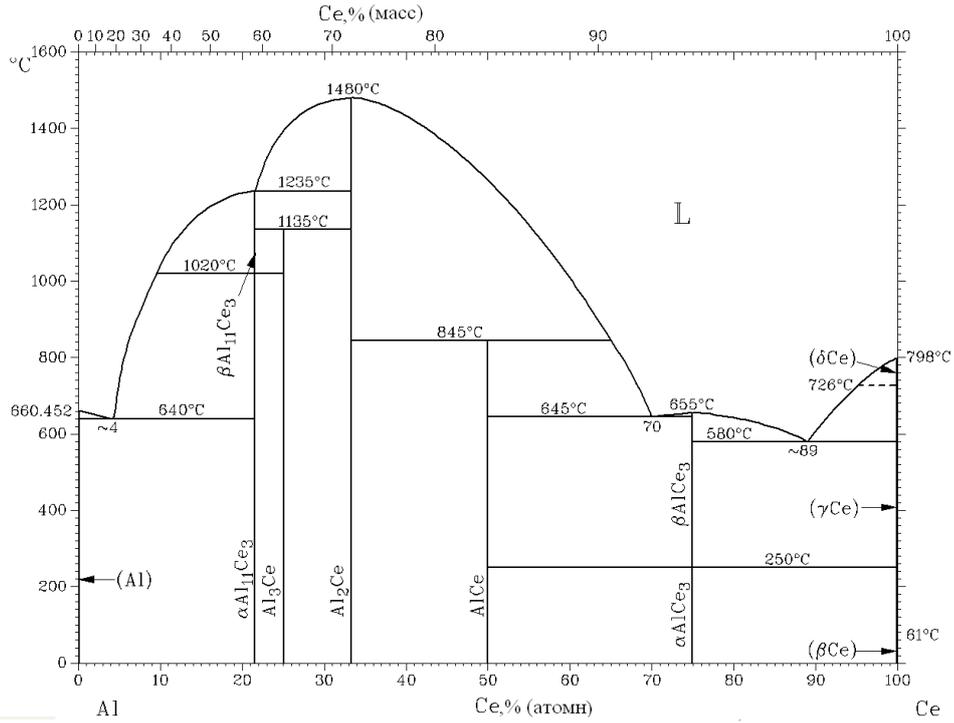


Рисунок 1.8 – Диаграмма фазового равновесия в системе алюминий – церий

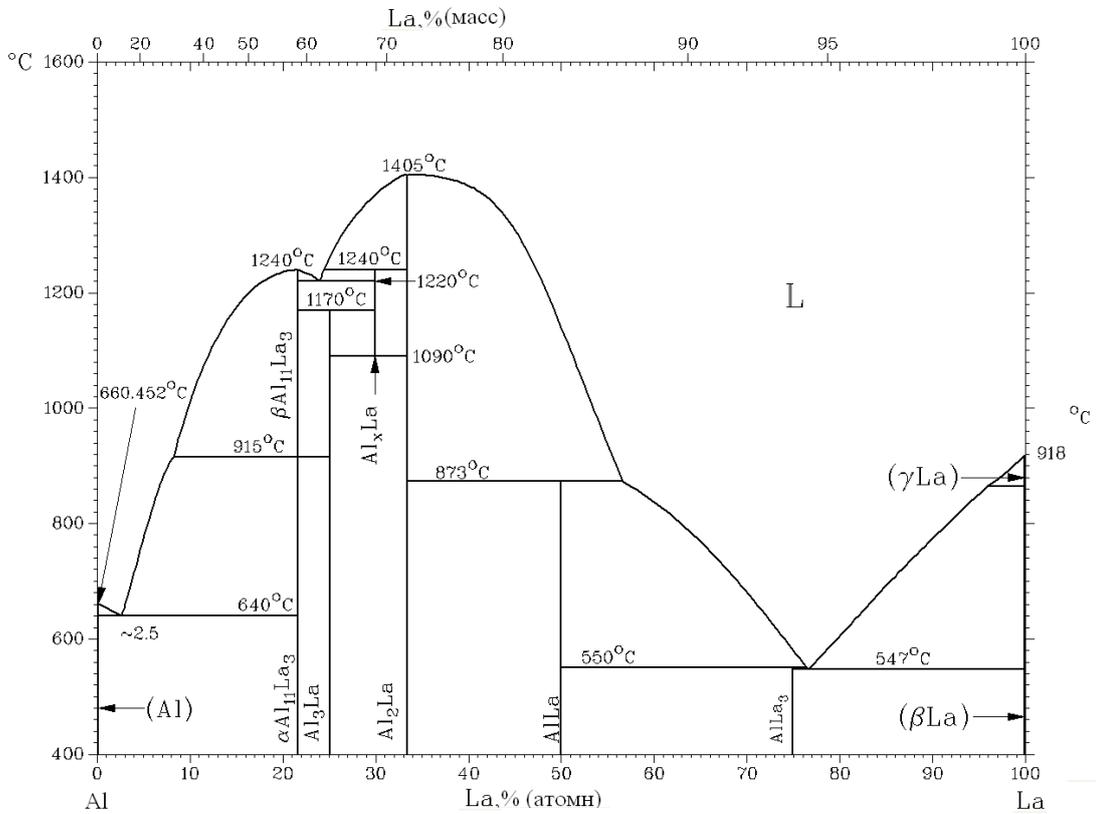


Рисунок 1.9 – Диаграмма фазового равновесия в системе алюминий – лантан

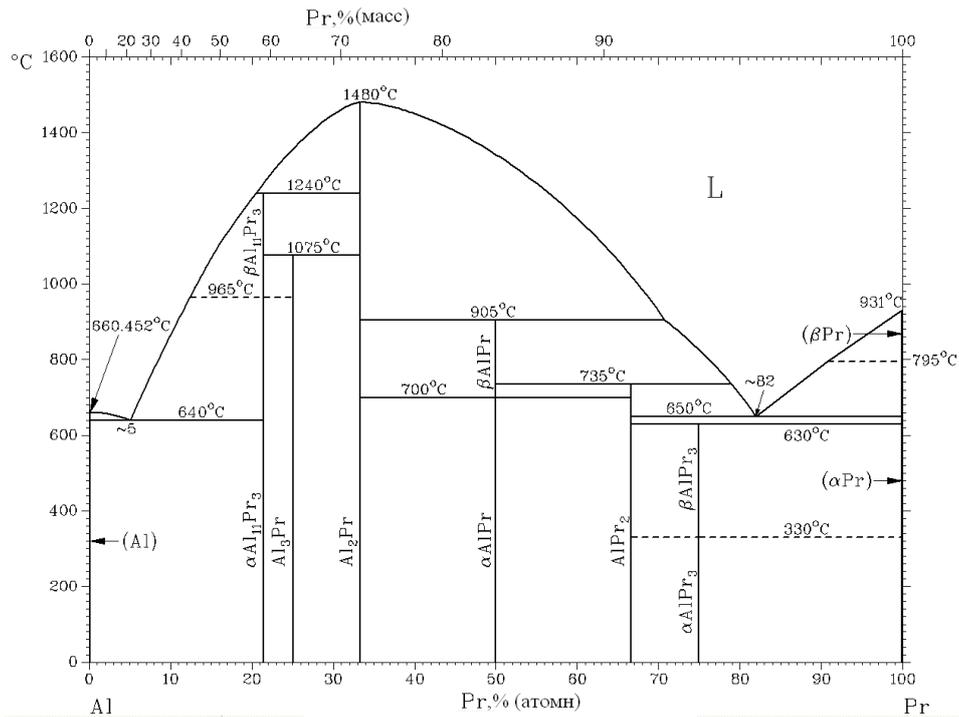


Рисунок 1.10 – Диаграмма фазового равновесия в системе алюминий – празеодим

Из-за низкого содержания РЗМ прочность также увеличивается, а электропроводность может практически не отличаться от электропроводности чистого алюминия. Высокие скорости кристаллизации в процессе изготовления заготовок, предназначенных для последующей деформации, способны вызывать формирование пересыщенных твердых растворов. Это требует гетерогенизационного нагрева, во время которого метастабильные пересыщенные твердые растворы разрушаются, высвобождая высокодисперсные интерметаллические соединения, уже находящиеся в твердом состоянии, и снижая концентрацию твердого раствора алюминия. Затем процесс осуществляется гетерогенным способом. Во многих случаях гетерогенизационный нагрев совмещается с тепловой обработкой под давлением, поэтому при проведении такой обработки необходимо учитывать возможность протекания гетерогенизационных процессов.

Редкоземельные металлы могут уменьшать размеры зерен, изменять микроструктуру, улучшать распределение фаз включения, улучшать проводимость и удалять вредные примеси Si и Fe [34-37, 43]. Ранее было выявлено [38], что содержание Се от 0,05 до 0,16 мас.% в алюминиевом сплаве выгодно для увеличения электрической проводимости и временного сопротивления, поскольку Се снижает растворимость твердых примесных элементов (Fe, Si) в алюминиевой матрице. В работе [39] утверждается, что временное сопротивление сплава Al–Mg–Si–Zr–La, приготовленного на основе сплава AA6201, уменьшилось, а электропроводность

улучшилась, когда содержание добавки La превысило 0,2 мас.%, что может быть компромиссом между прочностью и электропроводностью. В ходе недавних исследований [40] обнаружено, что когда содержание La не превышает 0,3 мас.%, электропроводность сплава Al–La может поддерживать высокий уровень - 60,35% международного стандарта IACS из-за осаждения соединений, содержащих La, Si и Fe. Авторы работы [41] выяснили, что максимальная электропроводность литого промышленного чистого алюминия составляет 59,7% IACS с добавлением 0,2 мас.% Ce. Термообработка по режиму T7 может дополнительно улучшить электропроводность до 60,7% IACS, основным механизмом которой является эволюция вторичных фаз после введения Ce. При проведении исследований режимов термообработки [42] сплав Al–Ce отжигали и выдерживали при высокой температуре и обнаружили, что редкоземельный элемент играет важную роль в рекристаллизации сплава Al–Ce. Данные, полученные в работе [44] показывают, что добавление редкоземельного элемента Ce в алюминиевый сплав увеличивает временное сопротивление. Содержание Si оказывает большое влияние на его проводимость. Из вышеизложенного следует, что соответствующее содержание добавок La или Ce имеет преимущества в удалении вредных примесей Si и Fe, раскислении, дегидрогенизации и измельчении зерен, улучшении прочности на растяжение и относительного удлинения алюминиевых сплавов [45-49]. Тем не менее, в литературных источниках почти нет сообщений о разнице между La и Ce в качестве добавки к алюминиевым сплавам для получения эффекта улучшения уровня электропроводности. На рисунке 1.11 показана электропроводность сплавов Al–xLa и Al–xCe (где $x = 0,075-1,0\%$) [33].

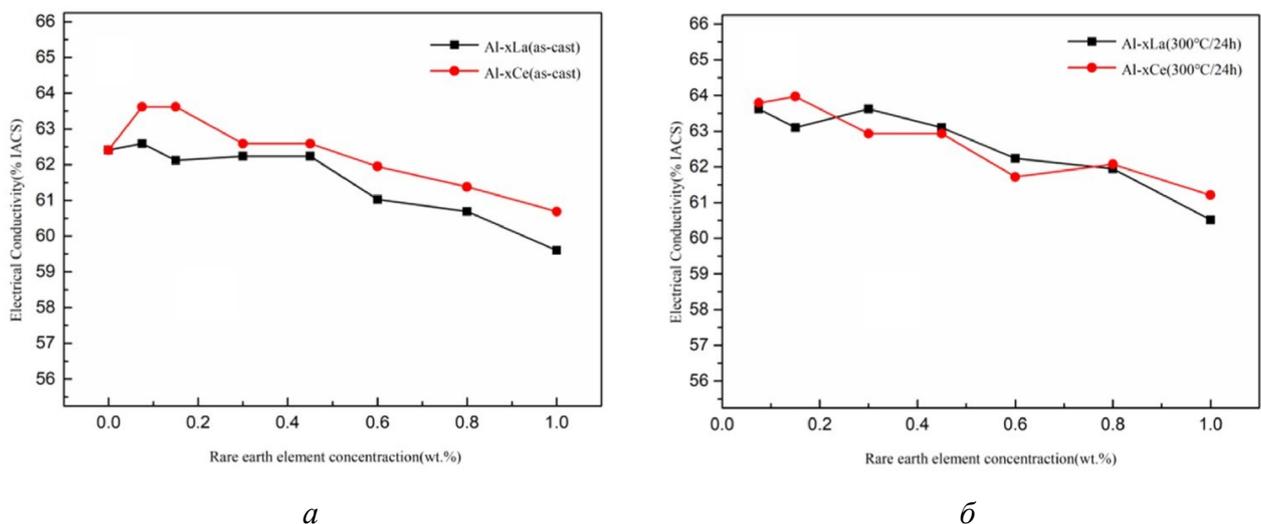


Рисунок 1.11 – Электропроводность образцов сплавов системы Al–La и Al–Ce с содержанием РЗМ 0,075-1,0%: *а* – литое состояние, *б* – отожженное при 300 °С в течение 24 часов

В литом сплаве (рисунок 1.11, *a*) сплав Al–Ce имеет более высокую проводимость, чем сплав Al–La того же состава. Когда содержание Ce составляет 0,15%, электропроводность сплава Al–Ce достигает наибольшего значения IACS 63,62%.

Когда содержание La и Ce в сплавах превышает 0,45%, проводимость сплавов ниже, чем у чистого алюминия. Однако после термообработки при 300 °C в течение 24 ч (рис. 1.11, *b*) электропроводность всех сплавов увеличивается, и сплав Al–La проявляет такую же электропроводность, что и сплав Al–Ce. Наилучшая электропроводность обоих сплавов может превышать 63,5% IACS. Для сплава Al–La проводимость после термообработки, очевидно, выше, чем у литого сплава. Однако для сплава Al–Ce проводимость после термообработки существенно не отличается от проводимости литого сплава.

На рисунке 1.12 показан график зависимости временного сопротивления сплавов системы Al–La и Al–Ce от содержания РЗМ [33].

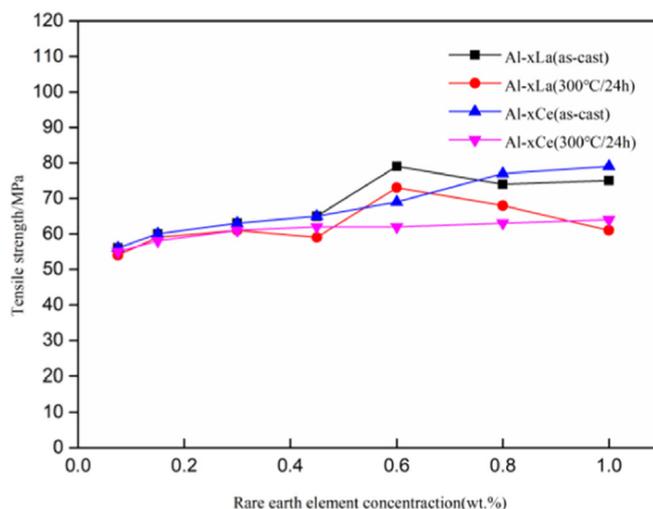


Рисунок 1.12 – Временное сопротивление образцов из сплавов системы Al–La и Al–Ce с содержанием РЗМ 0,075-1,0% в литом и отожженном состоянии

Прочностные свойства улучшаются с увеличением содержания La и Ce, а временное сопротивление как Al–La, так и Al–Ce-сплавов несколько уменьшается после термообработки при 300 °C в течение 24 часов.

В литературных источниках имеются данные по результатам исследования растровой электронной микроскопии сплавов системы Al–La и Al–Ce с содержанием РЗМ 0,3-0,8% в литом и отожженном состоянии [33]. Содержание La и Ce в остаточных фазах увеличивается после термической обработки при 300 °C в течение 24 ч, поскольку большое количество редкоземельных элементов не может быстро осаждаться из твердого раствора в алюминиевой матрице в процессе литья, а редкоземельные элементы растворяются в сплаве и будут повторно осаждаться из матрицы в ходе процесса термообработки.

Церий обеспечивает сильную очистку от примесей Fe и Si в алюминиевой матрице, что приводит к образованию соединений Al-Fe-Si-Ce, а не твердого раствора в алюминиевой матрице. Для La его способность к очистке от примесей немного слабее, чем у Ce, поэтому в алюминиевой матрице содержится больше атомов твердого раствора, что приводит к более низкой проводимости по сравнению с добавкой Ce. После термообработки при 300 °C в течение 24 ч для сплавов Al-La и Al-Ce большинство атомов твердого раствора могут полностью выпасть в осадок из алюминиевой матрицы. Это является основной причиной одинакового проявления токопроводящих свойств у данных сплавов.

Другой причиной разной проводимости является распределение вторичных фаз. Вторая фаза литого сплава Al-La непрерывно распределяется на границах зерен, где количество осажденных частиц увеличивается с увеличением добавления La. Вторая фаза литого сплава Al-Ce распространяется в форме частиц в виде коротких стержней в матрице, когда количество добавленного Ce мало. Кроме того, вторая фаза концентрируется на границах зерен, когда количество добавляемого Ce велико. После термообработки при 300 °C в течение 24 ч вторая фаза сплавов Al-La и Al-Ce имеет форму частиц из коротких стержней в алюминиевой матрице.

Микроструктурные характеристики показывают, что добавление Ce усиливает образование бинарных, тройных или четвертичных соединений Ce, Si, Fe и Al, которые богаты Ce, Si и Fe [28]. На основании расчета постоянной решетки и экспериментальных наблюдений добавление Ce в сплав Al приводит к уменьшению содержания растворенного Fe и Si в растворе Al [33, 28]. Раствор Ce в растворе Al является исключением, очевидно отличающимся от других примесных атомов, включающих La, Fe, Si и т. д., и довольно похож на чистый алюминий [28].

Существуют две возможные причины значительного улучшения проводимости при добавлении Ce в сплавы Al. Во-первых, добавление Ce приводит к уменьшению содержания растворенного Fe и Si в растворе Al, уменьшая статическое искажение решетки в растворе Al и, следовательно, увеличивая среднюю длину свободного прохода [50]. Во-вторых, вызванное Ce изменение структуры энергетической зоны электронов решетки Al, отличной от других примесных атомов, может усилить эффективное число электронов [28].

Применение высоколегированных сплавов системы Al-PЗМ также дает значительные преимущества, если требуется повысить прочностные свойства сплава, хотя при этом и происходит снижение электропроводности [51-55]. В работе [51] сообщается о решающей роли морфологии интерметаллической фазы $Al_{11}PЗМ_3$ и межфазной поверхности Al/ $Al_{11}PЗМ_3$, до пластической деформации, электрических и механических свойств и термостойкости алюминиевых сплавов. Образцы литого сплава Al-4.5 (Ce + La), подвергнутые

сфероидизирующему отжигу и без него, подвергали кручению под высоким давлением при комнатной температуре с последующим отжигом при 230 °С, 280 °С и 400 °С в течение 1 ч. Было показано, что изменение исходной структуры сплава и уменьшение площади межфазной поверхности влияют на распределение интерметаллических частиц, распределение супердисперсных зерен, плотность дислокаций и образование пересыщенных твердых растворов Се и La в алюминии после кручения под высоким давлением. Оптимальное сочетание прочности (временное сопротивление 430 МПа) и проводимости (55,9% международного стандарта IACS) было получено после сфероидизирующего отжига, кручения под высоким давлением и температуры отжига 230 °С.

Добавки небольшого количества РЗМ до 4,5% достаточно для достижения баланса по временному сопротивлению до 500 МПа и электропроводности до 52,2% в соответствии с IACS при кручения с высоким давлением при комнатной температуре и последующим отжигом при 280 °С.

Кроме того, было обнаружено, что сфероидизирующий отжиг перед пластической деформацией оказывает улучшающее действие как на свойства, так и на морфологию фазы как до, так и после деформации. Она изменяет микроструктуру сплава, превращая интерметаллические пластины в сферические частицы, что приводит к уменьшению общей площади межфазной поверхности и бимодальному распределению мелких частиц после кручения под высоким давлением.

Уменьшение общей площади межфазной поверхности, обусловленное сфероидизацией, приводит к неспособности сплава образовывать пересыщенный твердый раствор Се и La в Al во время кручения под давлением. Диффузия Се и La в Al, протекающая при комнатной температуре, становится возможной во время кручения при комнатной температуре в основном из-за чрезмерной концентрации вакансий [51]. К таким элементам относятся редкоземельные и переходные металлы, такие как цирконий, иттрий, никель, марганец, железо и кобальт [96].

Одним из наиболее распространенных сплавов, нашедших широкое применение при производстве электропроводки для летательных аппаратов, выступает сплав 01417. Он содержит редкоземельные металлы (РЗМ) в диапазоне 7,0–9,0% и предполагает эксплуатацию проводки из него при температуре +250°С. Снижение веса системы энергопитания при применении сплава возможно от 100 до 300 кг, а выигрыш по электропроводности может достигать 30 %, если сравнить с медью. Химический состав сплава регулируется техническими условиями (ТУ) 1-809-1038-2018. Содержание основных компонентов и контролируемых примесей в лигатуре соответствует требованиям, указанным в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Химический состав сплава 01417, % масс.

Основные элементы		Контролируемых примесей, не более			
Al	РЗМ: Ce, La, Pr	Fe	Si	прочие, каждый	прочие, всего
основа	7,0 – 9,0	0,6	0,3	0,2	0,4

Согласно ТУ 1-809-1038-2018, прочность на растяжение и электротехнические характеристики проволоки из сплава 01417 следующие: временное сопротивление, минимальное значение, составляет 140 МПа после отжига и 196 МПа после нагартовки; удельное электрическое сопротивление (ρ) не превышает 0,03200 Ом·мм²/м; относительное удлинение (δ) должно быть не меньше 8%; прочность при растяжении при температуре 250°С находится в диапазоне 100-120 МПа.

В последнее время ведутся поиски химических составов алюминиевых сплавов с пониженным содержанием редкоземельных металлов, в частности церия и лантана под температуру эксплуатации до 150 °С. При этом ее стоимость будет значительно ниже, чем проволоки из сплава 01417. На сегодняшний день ведутся активные разработки по получению полуфабрикатов из сплавов системы Al-Ce-La в виде проволоки, прутков и катанки.

Отличительной особенностью диаграмм состояния алюминия и РЗМ является малая взаимная растворимость в твердом состоянии [88-90]. Небольшая растворимость РЗМ в твердом алюминии объясняется неблагоприятностью основных факторов, определяющих образование твердых растворов.

Особенность сплавов, изготовленных на основе алюминия путем легирования переходными металлами, заключается в том, что они плохо растворимы в твердом алюминии и поэтому не снижают существенно электропроводность. А это в свою очередь является в данном случае важнейшей особенностью, определяющей эксплуатационные качества проводника. При активном взаимодействии РЗМ с ПМ и алюминием проходит процесс формирования интерметаллидов, что может приводить к значительному упрочнению сплава [68].

В последнее время возникла потребность в проволоке малых диаметров (до 0,5 мм) из этих сплавов, взамен известного сплава 01417 [32, 92, 93], имеющей такой же комплекс физико-механических свойств [94].

Производство проволоки предполагает непрерывное литье слитков малых сечений в электромагнитном кристаллизаторе (ЭМК) [95-102]. Далее следует деформация в установках непрерывного прессования Conform [103-109] или СПП [21, 110-114], и завершается процесс сортовой прокаткой или волочением. К примеру, рационально использовать методы

совмещенных процессов, описанных выше. Внедрение подобной технологии позволяет решать научно-технические задачи получения проволоки малого диаметра, обладающей заданными, комбинированными эксплуатационными свойствами.

Наблюдается рост спроса на сварочную проволоку. Промышленные предприятия машиностроения и металлургии, являясь основными потребителями, предъявляют всё более строгие требования [91].

В ряду таких сплавов находятся сплавы системы **Al-Mg-Sc**, активная разработка которых привела к появлению таких сплавов, как 01570, 1580 и др.

Сплавы системы Al-Mg серии 5XXX являются деформируемыми, но термически неупрочняемыми. Эти сплавы сочетают в себе ряд ценных свойств и поэтому представляют интерес как конструкционные материалы в виде листов, плит и сварочной проволоки в условиях крайнего севера, где постоянно преобладают низкие температуры [115-117].

К сплавам серии 5XXX относят такие сплавы как АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5, АМг6, АМг61, чьи механические свойства улучшаются только путем холодной деформации, дисперсионным упрочнением и упрочнением твердым раствором, а также термомеханической обработкой полуфабрикатов. При этом наклеп неизбежно сопровождается снижением относительного удлинения.

Диаграмма состояния системы Al-Mg (рис. 1.13) показывает, что при эвтектической температуре 17,4% Mg может быть растворено в алюминии (в некоторых источниках - 16,5%) [67, 115].

Зависимость механических свойств сплавов системы Al-Mg от содержания магния представлена на рис. 1.14. Но на практике область применения промышленных сплавов серии 5XXX обычно ограничивается содержанием магния до максимального предела в 6% [59]. Главное условие для получения деформированных полуфабрикатов высокого качества из сплавов системы Al-Mg – это возможность для формирования тонкой однородной микроструктуры.

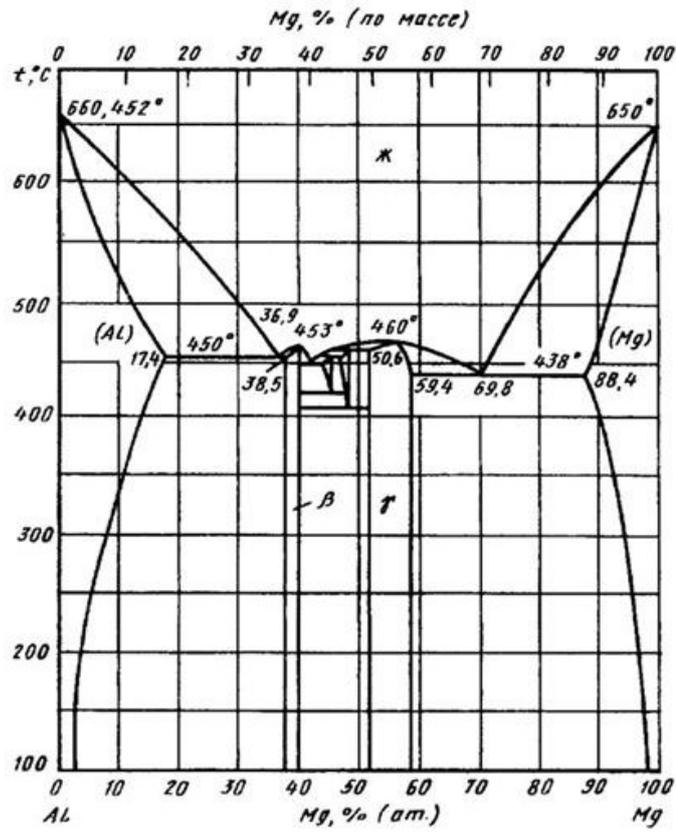


Рисунок 1.13 – Диаграмма состояния системы Al–Mg

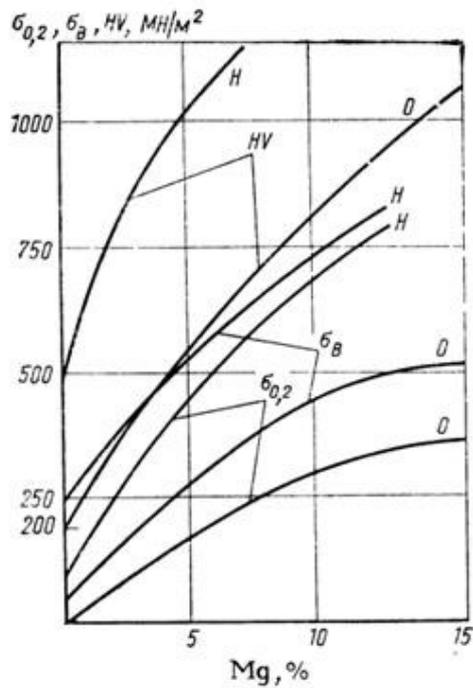


Рисунок 1.14 – Зависимость механических свойств сплавов системы Al–Mg от содержания магния: Н – нагартованное состояние; О – отожженное состояние

Сплавы Al-Mg чаще легируют Li, Ce, Cr, Fe, Cu, Be, Sc, Zr, Ti, Mn, Zn, Si и др. [118-144]. Sc является наиболее перспективным с точки зрения упрочнения [143, 144]. М.Е. Дриц и В.И. Елагин, а также в ЦНИИ КМ «Прометей» имеют значительные наработки в данном вопросе [145-151]. Результаты, представленные в работах [152-162], подтверждают, что переходные металлы оказывают значительное влияние на структуру алюминиевых сплавов, как в качестве легирующих, так и модифицирующих добавок.

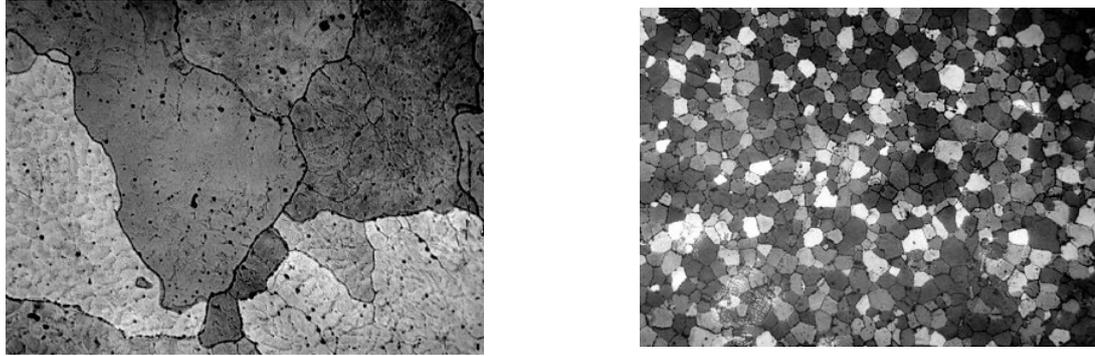
*a**б*

Рисунок 1.15 – Микроструктура слитка сплава Al-Zn-Mg типа 1970:

a – без Sc; *б* – с добавкой 0,2 % Sc, $\times 100$

Результаты анализа механических характеристик нескольких отечественных сплавов Al-Mg с введенным в качестве легирующего элемента Sc [162] представлены в таблице 1.2 [115].

Таблица 1.2 – Отечественные алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Sc, распространенные в промышленности, и их свойства

Марка сплава	Механические свойства			Химический состав
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Al – 6% Mg – 0,4 Mn – 0,22 Sc – 0,1 Zr
01570	300	400	15	Al – 5% Mg – 0,22 Sc – 0,1 Zr
01545	290	380	16	Al – 4% Mg – 0,22 Sc – 0,1 Zr
01535	280	360	20	Al – 2% Mg – 0,22 Sc – 0,1 Zr
01523	200	275	16	Al – 1% Mg – 0,22 Sc – 0,1 Zr
01515	160	250	16	Al – 6% Mg – 0,4 Mn – 0,22 Sc – 0,1 Zr

Проведены исследования и получены данные о реологических свойствах сплава 1580, экономично легированного скандием [115, 164, 165]. Установлено [1], что уровень механических свойств листов и пресс-изделий, полученных из этого сплава методом с использованием совмещенной обработки, сопоставим с уровнем свойств деформированных изделий из сплава 01570, используемых в промышленности.

Совмещенные методы для деформации сплавов Al-Mg-Sc максимально приближают получаемые конструкции к весовому совершенству с минимизацией их стоимости, сохраняя прочность и антикоррозионные качества [166-170].

Поскольку добавление иных компонентов уменьшает проводимость электричества, то провода производят из технического алюминия (А7Е, А5Е) либо из низколегированных сплавов на основе Al – Si – Mg (АД31, АД31Е и их разновидностей АВЕ, 01327, АЕ1, АЕ2 и прочих) [171, 172].

Учитывая, что температура рекристаллизации алюминия без добавок находится ниже 250°С, то сплавы А7Е, А5Е для данных проводов не подходят. Для решения этой важной проблемы самым многообещающим путем считается разработка низколегированных алюминиевых сплавов с редкоземельными элементами.

Легирующие элементы по степени снижения электропроводности отожженного алюминия принято делить на две группы (снижающие электропроводность незначительно или существенно) [173, 174].

Актуальность исследований в этой области подтверждается тем, что в Российской Федерации в настоящее время наблюдается существенный износ генераторных установок и линий электропередач и, кроме того, наблюдается рост производства кабельной продукции и электропроводов (табл. 1.3) [175].

Таблица 1.3 – Динамический рост рынка кабельной продукции в России

Подольск	В Российской Федерации были запущены в эксплуатацию два завода по производству катанки каждый мощностью 1200 тонн.
Саранск	Завод ВМС и Цветлит вышли на полную мощность в 2006 г.
Углич	Компания Nexans работает над строительством своего первого завода по производству кабеля в России (плановое потребление составляет около 400 тонн в месяц).
Кольчугино	Электрокабель запустил в эксплуатацию новое оборудование для производства кабелей среднего и высокого напряжения с полиэтиленовой изоляцией.
Рыбинск	Рыбинсккабель открыл новый завод по производству изолированного силового кабеля. Ожидаемый уровень потребления алюминия составляет 195 тонн в месяц.
Пермь	Камкабель завершил строительство завода по производству кабелей среднего напряжения (с полиэтиленовым покрытием).
Чувашия	Чувашкабель осуществляет проект САМП-2, целью которого является расширение ассортимента продукции.

Более того, на сегодняшний день наблюдается значительный износ авиапарка российских самолетов [176]. Основным материалом для авиастроения – это различные алюминиевые сплавы, служащие для производства корпусов и электропроводов летательных аппаратов.

Бортовые авиационные провода служат для передачи энергии и сигналов в электросетях и контрольных системах авиационной техники [176]. Ключевым требованием является их способность противостоять механическим нагрузкам: перегибам, сжатию и трению, обеспечивая целостность при установке и в процессе эксплуатации. Кабели должны обладать негорючестью и устойчивостью к экстремальным температурам, влажности, разряженному давлению, а также вибрациям, ударам и воздействию агрессивных сред, включая авиационное топливо, масла и другие химические вещества.

Основными видами кабелей в бортовых системах самолетов выступают провода марок БПВЛ и БВПЛЭ (см. рисунок 1.16). Данные провода предназначены для эксплуатации в диапазоне температур от -60 до $+70$ °С.

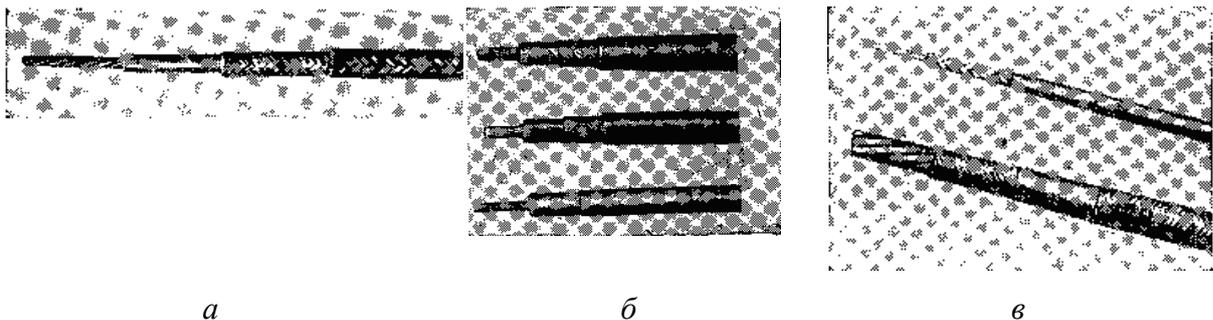


Рисунок 1.16 – Проводка бортовых систем производства США и Англии: *а* – с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката марки БВПЛЭ для бортовой сети самолетов; *б* – с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката; *в* – провод типа нипрен

Провода БПВЛА производятся с сечением $35-95$ мм² и рассчитаны на напряжение 600 В переменного тока. Они предназначены для эксплуатации в температурном диапазоне от -55 до $+100$ °С. В Соединенных Штатах Америки провода выпускают для работы при температурах от -55 до $+105$ °С в трех вариантах (см. рис. 1.16). В Великобритании производятся бортовые провода для авиации, рассчитанные на переменное напряжение до 600 В с частотой до 1600 Гц, для рабочего диапазона температур от -30 до $+105$ °С. Во Франции производятся бортовые провода для эксплуатации в диапазоне температур от -50 до $+105$ °С.

Для производства электропроводов, работающих при повышенных температурах, широко применяются сплавы алюминия с различным содержанием редкоземельных металлов. Технология производства длинномерных изделий из таких сплавов характеризуется высокой

энерго- и трудоемкостью. При этом на различных этапах деформации металла возможно образование дефектов, которые нарушают технологический процесс, что приводит к снижению производительности и выхода годного. В то же время разработаны технологии непрерывной обработки алюминиевых сплавов, основанные на совмещении операций литья, прокатки и прессования, и проведены исследования режимов нагрева и деформации металла, а также конструкций прессового инструмента [18].

1.2.3. Обзор технологий и конструкций устройств для обработки сплавов системы Al-PЗМ

PЗМ в алюминии обуславливает ряд положительных эффектов: повышает жаропрочность, улучшает сопротивление коррозии, увеличивает прочность сплава, оптимизирует физико-химические свойства. С целью анализа составов алюминиевых сплавов, содержащих PЗМ, был проведен патентный поиск с горизонтом в 20 лет.

В ходе поиска были обнаружены патенты на сплавы Al с PЗМ [60-66], регулирующие механические и электрофизические свойства.

Современные технические решения по конструкции устройств для совмещенной обработки алюминиевых сплавов с применением операций непрерывного литья, прокатки и прессования можно разделить на три основные группы [177-195]:

- устройства для непрерывного литья и прокатки-прессования;
- устройства для совмещенной прокатки-прессования с применением роторных кристаллизаторов;
- устройства для совмещенной прокатки-прессования с применением электромагнитного кристаллизатора.

Для непрерывного литья и прокатки-прессования предложено устройство по патенту РФ №73245 [188], показанное на рисунке 1.17.

Такая схема обработки наиболее выгодна как с позиций сокращения технологических переходов, так и с позиций повышения выхода годного (табл. 1.4).

Таблица 1.4 – Существующие распространённые методы получения алюминиевых прутков

Технико-экономические показатели (наименование и единицы измерения)	Аналоги		Предлагаемый процесс
	Conform	Прессование	СПП
Производительность, кг/час	1620 (90%)	600 (33,3%)	1800 (100%)
Потребляемая мощность, кВт	200 (400%)	500 (1000%)	50 (100%)
Обслуживающий персонал, чел	2 (100%)	3 (150%)	2 (100%)
Выход годной продукции, %	95	75-80	95-98
Ориентировочная стоимость оборудования, тыс. руб	20 000 – 180 000 (до 600% и >)	50 000 – 600 000 (до 2000% и >)	30 000 (100%)

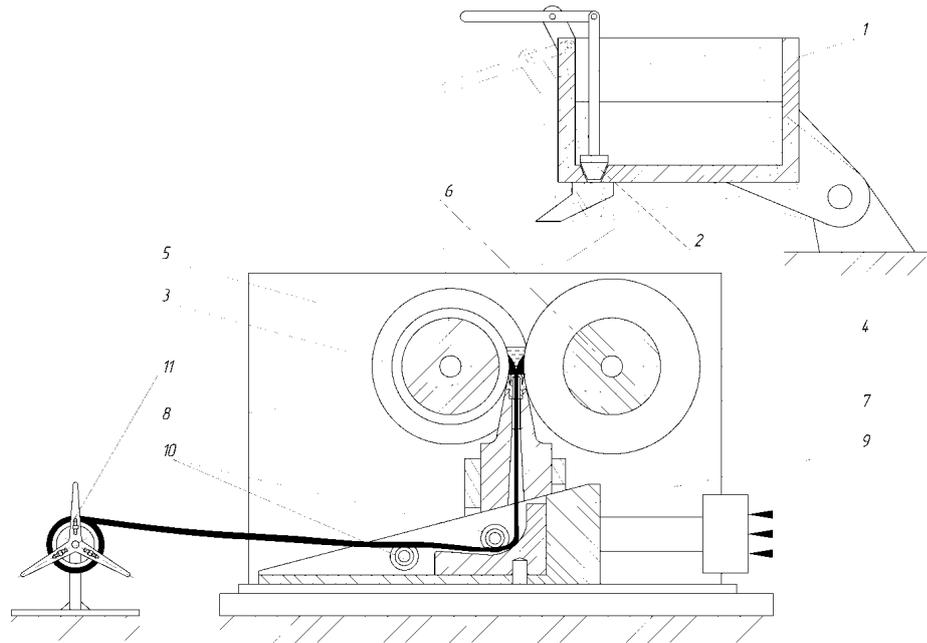


Рисунок 1.17 – Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования: 1 – печь-миксер; 2 – регулятор; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – станина; 6 – полости для охлаждения валков; 7 – матрица; 8 – клиновидные полости; 9 – клиновой механизм; 10 – направляющие ролики; 11 – моталка

Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла включает печь-миксер 1 с регулятором 2 подачи расплава в калибр валков, валок 3 с ручьем и валок 4 с выступом, расположенные в станине 5, имеющие полости 6 для охлаждения и образующие закрытый калибр. Выход перекрывается матрицей 7 с клиновидными полостями для охлаждения 8. Клиновой механизм 9 с направляющими роликами 10 поджимает матрицу 7 к валкам 3 и 4. Смотка прутка в бухту производится на моталку 11.

Одно из решений (установка по патенту РФ № 2639203 [177]) показано на рис. 1.18.

Устройство содержит роторный кристаллизатор 3, формирующий непрерывную литую заготовку 4, валок 7 с ручьем и валок 8 с выступом, образующие рабочий калибр и матрицу 9 на выходе из калибра. Оно снабжено также устройством 5 для регулирования температуры литой заготовки и направляющими элементами 6. Верхний элемент выступа 14 на валке 8 оформлен в виде Т-образного профиля, тогда как на цилиндрической части валка 7 расположены выступы 12. Цилиндрическая поверхность валка 8 содержит пазы 13, которые в сочетании с выступами 12 формируют соединение валков. В матрице 9 и её держателе реализованы взаимосогласованные пазы и выступы, гарантирующие фиксацию положения матрицы.

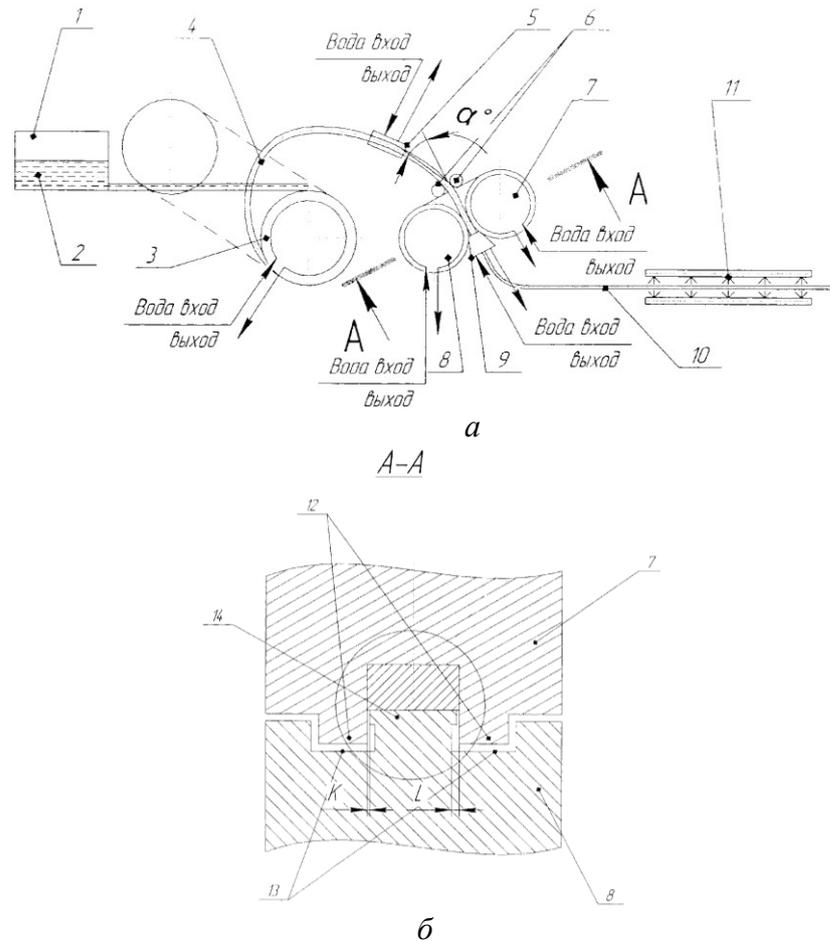


Рис. 1.18 – Схема установки СЛИПП (а) и вид деформирующего узла (б):

1 – печь-миксер; 2 – расплав металла; 3 – роторный кристаллизатор; 4 – литая заготовка; 5 – устройство для регулирования температуры литой заготовки; 6 – направляющие элементы; 7 – валок с ручьем; 8 – валок с выступом; 9 – матрица; 10 – катанка; 11 – устройство охлаждения катанки; 12 – выступы; 13 – пазы; 14 – гребень выступа

Данная конструкция позволяет организовать производство прессованных изделий в непрерывном режиме, обеспечивая высокую производительность, а также сократить износ валков и уменьшить потери металла благодаря эффекту самозамыкания в соединении ручей-выступ.

Для внедрения третьей технологической схемы рекомендовано оборудование для непрерывного литья, прокатки и прессования металла по патенту РФ №67492 [185] (рисунок 1.19).

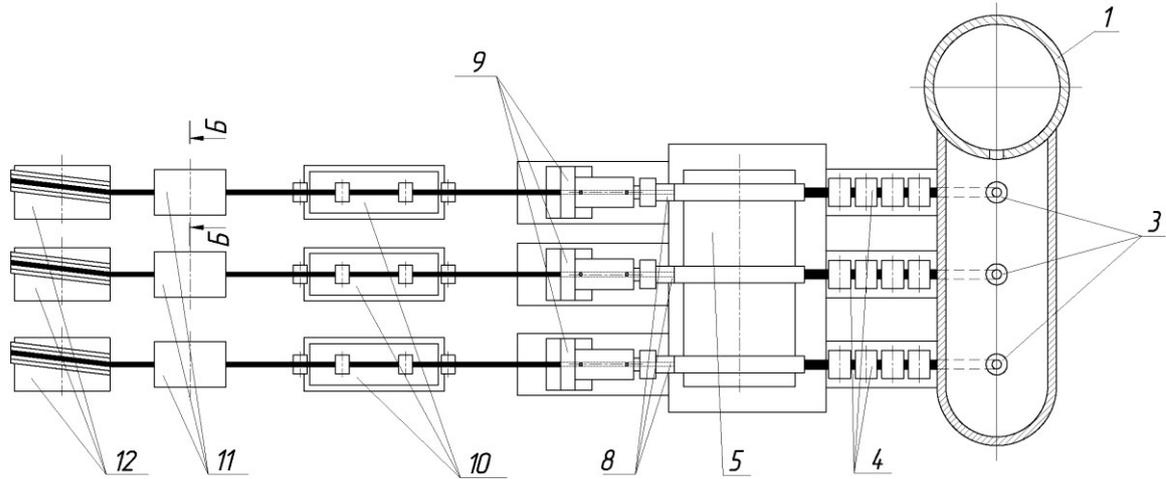


Рисунок 1.19 – Общий вид установки для непрерывного литья, прокатки и прессования: 1 – печь-миксер; 2 – электромагнитный кристаллизатор; 3 – питатели; 4 – правильно-задающее устройство; 5 – валок с выступом; 6 – валок с ручьем; 7 – матрица; 8 – клиновидные полости для подвода хладогента; 9 – гидроцилиндр; 10 – емкость узла охлаждения; 11 – калибровочный стан; 12 – устройство намотки.

Она включает печь-миксер, кристаллизатор, деформирующий узел, состоящий из валка с ручьем и валка с выступом, образующими рабочий калибр, на выходе из которого установлена матрица с клиновидными полостями для охлаждения

1.2.4. Анализ возможных технологических схем и оборудования для получения деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PZM

До последнего времени заготовки для кабельной продукции из сплава 01417 получали по гранульной технологии [1]. Существующая опытно-промышленная технология производства гранулируемых сплавов приводит к тому, что получаемый материал содержит газовые примеси (кислород, водород) и влагу. Таким образом, перед прессованием гранулы подвергались дегазации для достижения содержания влаги и водорода не более 0,5 см³/100г. Только при соблюдении этого условия полуфабрикаты, полученные из гранул, обладали необходимой плотностью, исключаяющей наличие пор, и демонстрировали высокие физико-механические характеристики.

Использовались капсулы двух конструкций [196] при сохранении требуемой производительности печи и при обеспечении качественного удаления газов из гранул. Капсулу помещали на асбестовый картон, снимали стропы и повторно герметизировали трубки капсулы

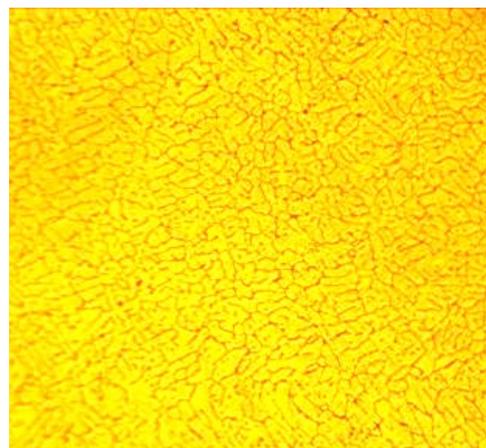
около места их приварки к днищу. Оставшаяся часть трубки должна была иметь длину не менее 100 мм. Для повышения герметичности концов трубок рекомендовалась аргонно-дуговая сварка.

В случае, если временной интервал между герметизацией капсул с отгазированными гранулами и процессом прессования был значительным, следовало провести проверку качества герметизации концов трубок. Для этого использовался специальный пост проверки герметичности капсул. При обнаружении неплотностей производилась повторная аргонно-дуговая сварка концов трубок. Применение гранульной технологии, включающей 17 технологических переделов, для производства заготовок под волочение – мера вынужденная, из-за невозможности применить классические методы прессования на тот момент.

Вторая технологическая схема предусматривает обработку давлением литой заготовки с небольшими размерами поперечного сечения (диаметр 10-20 мм) и мелкозернистой структурой, полученную в электромагнитном кристаллизаторе (рисунок 1.20) [197].



а



б

Рисунок 1.20 – Опытно-промышленная установка непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (а) и микроструктура литой заготовки диаметром 12 мм (б), $\times 1000$

В итоге поверхность у слитка гладкая, а структура более мелкозернистая. Структура имеет высокую плотность и мелкодисперсность в периферийной зоне. Электромагнитное гидродинамическое перемешивание благоприятно сказывается на структуре слитка. Неслитины и ликвационные наплывы отсутствуют благодаря высоким скоростям охлаждения и отсутствию контакта между металлом и стенками кристаллизатора.

Итак, использование электромагнитной кристаллизации (ЭМК) позволяет создавать литые полуфабрикаты с тонкозернистой структурой. Следствием этого является повышение пластичности литых изделий. Данный подход открывает перспективы для обработки давлением сплавов, характеризующихся сложной деформируемостью и низкой пластичностью.

В виду трудо- и энерго- затратности классических способов обработки металлов давлением целесообразно для деформации применять методы непрерывного прессования [198] или комбинированной обработки – совмещенной прокатки-прессования (СПП).

Конформ и Экстроллинг - наиболее перспективные на текущий момент способы получения проволоки, которые позволяют устранить недостатки классических технологий (рисунок 1.21) [18].

Даже принимая во внимание выявленные ограничения метода Конформ [91, 138], данный способ в ходе многолетних изысканий нашел практическое применение в современных условиях промышленности. Многочисленные установки Конформ различного исполнения работают по всему миру (рисунок 1.22).

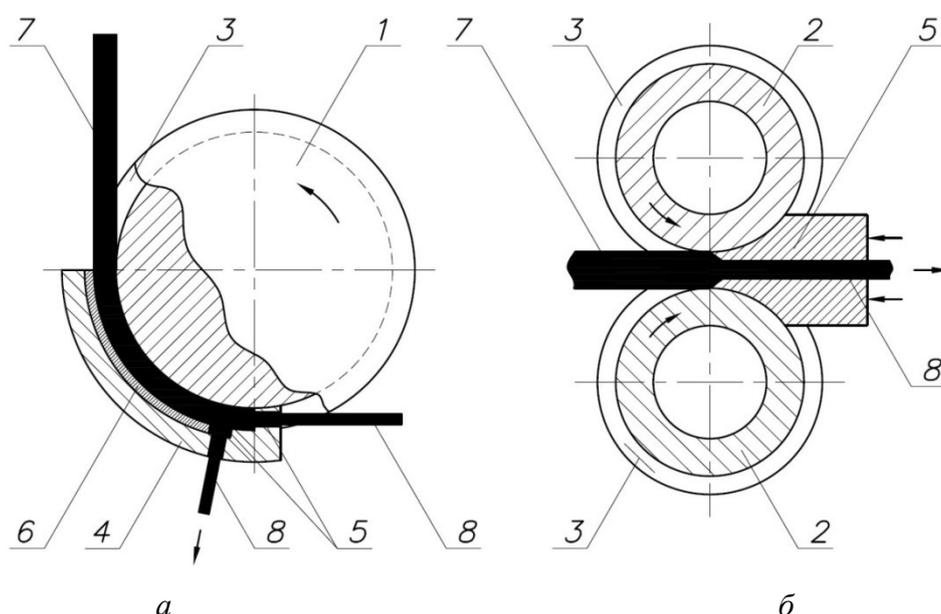


Рисунок 1.21 – Схемы непрерывного прессования: а – Конформ; б – Экстроллинг;
 1 – рабочее колесо; 2 – рабочие валки; 3 – кольцевая канавка; 4 – башмак с упором;
 5 – матрицы; 6 – кольцевая вставка; 7 – заготовка; 8 – пресс-изделие

Идея экстроллинга получила практическое воплощение в промышленности благодаря усовершенствованиям, включающим применение закрытого калибра [18, 138] и названного совмещенной прокаткой-прессованием. Было создано несколько лабораторных и опытно-промышленных установок (рисунок 1.23) [1].

Интересна разработка и внедрение на Иркутском алюминиевом заводе установок совмещенной обработки нового типа, получивших название ExstruForm (рис. 1.23, б) [207]. Применение принципа совмещенной прокатки-прессования позволяет данным установкам, в

отличие от ЛПА, изготавливать катанку из алюминиевых сплавов в рамках одного технологического цикла.

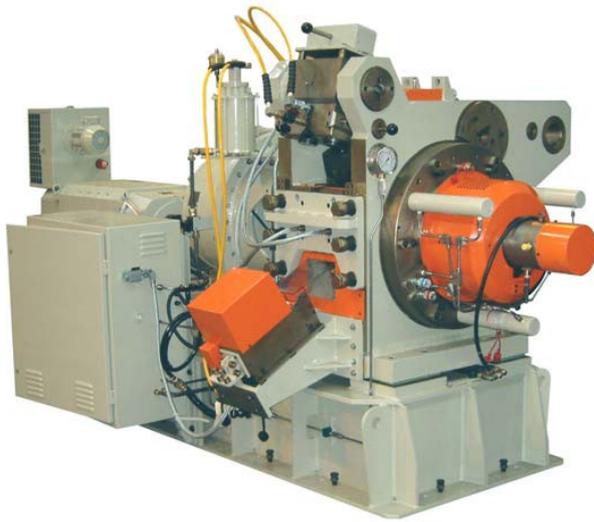
*а**б*

Рисунок 1.22 – Промышленные установки Конформ: *а* – CONFORM™ 400; *б* – TLJ 300

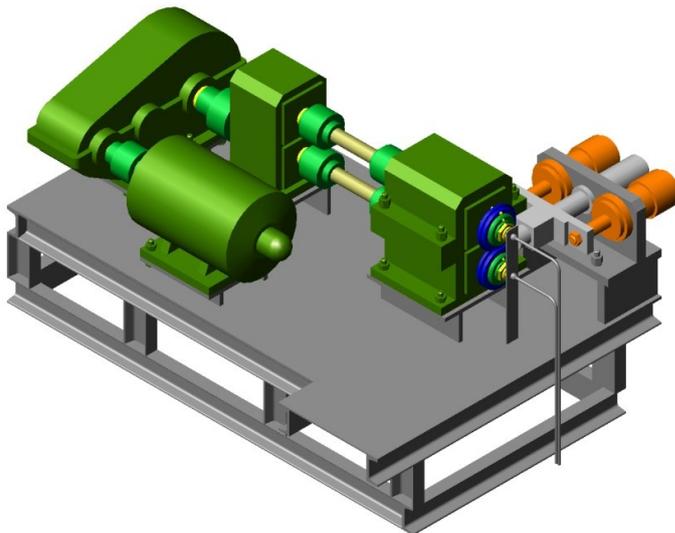
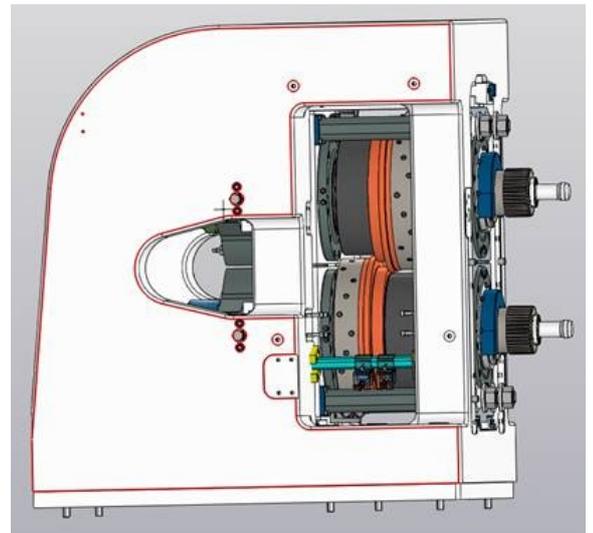
*а**б*

Рисунок 1.23 – 3D модели установок совмещенной прокатки-прессования

Пример устройства с использованием установки СЛИПП и РКУП-Конформ для реализации процесса совмещенной обработки представлен на рисунке 1.24 [199].

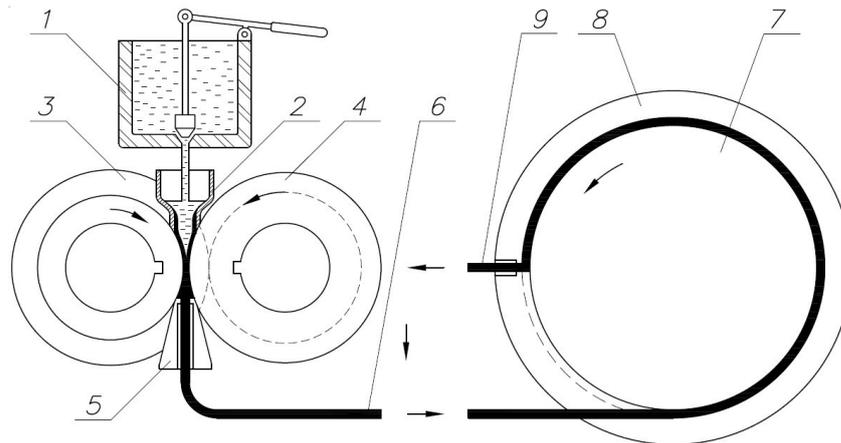


Рисунок 1.24 – Устройство СЛИПП и РКУП-Конформ для совмещенной обработки:
 1 – печь-миксер; 2 – воронка; 3 – валок с канавкой; 4 – валок с выступом; 5 – матрица; 6 – заготовка; 7 – колесо установки РКУП-Конформ; 8 – неподвижный блок установки РКУП-Конформ; 9 – пруток

Таким образом, актуальность исследований в области создания новых алюминиевых сплавов и технологий их обработки для создания длинномерных полуфабрикатов с применением совмещенных методов обработки обоснована, как в экономическом, так и в научном отношении.

1.3. Анализ результатов теоретических исследований формоизменения металла и температурных условий процесса совмещенной прокатки-прессования

В работах [18, 19] приведены результаты теоретических исследований процесса совмещенной прокатки-прессования. Схема очага деформации асимметричного процесса СПП с двумя приводными валками представлена на рисунке 1.25. Схема характеризуется следующими основными размерами: радиус валка с выступом R_1 , радиус валка с ручьем R_2 и радиус реборды R_3 . Заготовка имела прямоугольное сечение высотой h_0 , а получали пруток диаметром d .

Процесс удаления заготовки, который соответствует заданной дуге захвата, определяется с использованием следующего выражения. Это выражение служит для точного расчета траектории движения, необходимого для выполнения операции, и учитывает все ключевые параметры дуги, такие как радиус, угол поворота и начальное положение. Такой подход обеспечивает высокую точность обработки материала и минимизирует вероятность ошибок при выполнении операций.

$$L_1 = \sqrt{R_2^2 - \left(R_2 - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}, \quad (1.1)$$

где Δh – абсолютное обжатие заготовки по высоте.

Углы захвата:

$$\sin \alpha_1 = \frac{L_1}{xR_2}, \quad \sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta h}{2R_2}\right)^2}, \quad (1.2)$$

где α_1 – угол захвата на валке с выступом, α_2 – угол захвата на валке с ручьем, $x = R_1/R_2$ – коэффициент асимметричности процесса.

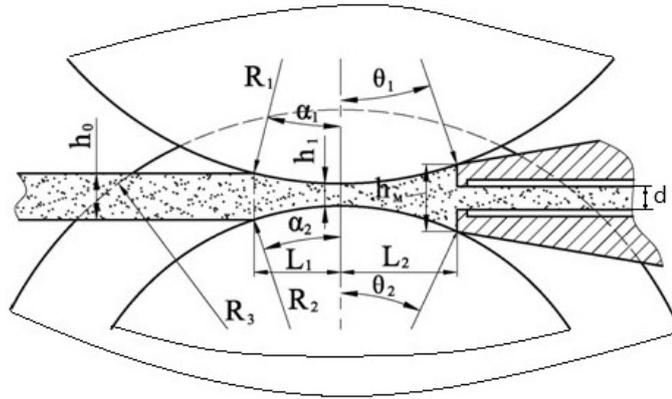


Рисунок 1.25 – Схема к расчету реализуемости процесса СПП энергетическим методом

С помощью математического моделирования были выведены зависимости, позволяющие вычислить ключевые параметры деформации металла. Сила на валки P_1 и матрицу P_2 :

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

где $\lambda = \frac{V_x}{V_e}$ – коэффициент, характеризующий относительную скорость металла [18].

Сила P_1 :

$$P_1 = \tau (F_1 + F_2), \quad (1.4)$$

где τ – значение напряжения контактного трения, $\tau = \psi \sigma_s$, ψ – показатель трения по Зибелю; σ_s – сопротивление металла деформации, F_1 , F_2 – площади контакта валков с металлом соответственно для нижнего и верхнего валков.

$$F_1 = 0,0349 (\alpha_1 + \theta_1) R_1 (b + h_1),$$

$$F_2 = 0,0349 (\alpha_2 + \theta_2) R_2 b,$$

где b – ширина калибра; h_1 – высота калибра в наименьшем сечении; α_1 , θ_1 , α_2 , θ_2 –

соответствующие углы, ограничившие очаг деформации, показаны на рисунке 1.25.

Сила P_2 :

$$P_2 = 2,577\sigma_s F_M \ln \mu + \sigma_s \mu 2\pi r_M l_{\Pi}, \quad (1.5)$$

где l_{Π} – длина калибрующего пояса матрицы, F_M – площадь зеркала матрицы, $r_M = d/2$ – радиус калибрующего отверстия матрицы, μ – коэффициент вытяжки при прессовании.

Расчетные выражения, подтвержденные опытными данными, рекомендованы к практическому использованию. Дополнительно были детально исследованы режимы обработки [18].

Условия равновесия очага деформации с двумя приводными валками рассмотрены в работе [19].

При этом необходимо стабилизировать тепловые условия работы инструмента и поддерживать постоянную температуру выходного профиля. Для регулируемого теплоотвода был предложен водоохлаждаемый инструмент [200, 201].

Система уравнений описывает условия для нестационарной теплопроводности:

$$\begin{cases} a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} + \frac{q_v}{c_1 \rho_1} = 0, \text{ при } 0 \leq x < +\infty, \\ a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = 0, \text{ при } -R \leq x \leq 0, \quad t > 0, \end{cases} \quad (1.6)$$

со следующими краевыми условиями:

$$\begin{cases} T_1(x,0) = T_2(x,0) = T_0, \\ T_1(0,t) = T_2(0,t), \\ T_1(\infty,t) - \text{ограничена}, \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} = q_r, \quad \text{при } x = 0, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} = -q_0, \quad \text{при } x = -R. \end{cases} \quad (1.7)$$

С учетом охлаждения матрицы использовалась методика из работы [19], после чего была получена следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x, t) = \frac{4q_\tau k_2 \sqrt{t}}{b_1(k_2 + 1)^2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{R}{\sqrt{a_2 t}}\right) + \frac{2q_\tau \sqrt{t}}{b_1(k_2 + 1)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - \\ - \frac{4q_0 k_2 \sqrt{t}}{b_2(k_2 + 1)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{R}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + T_0; \\ T_2(x, t) = \frac{2q_\tau \sqrt{t}}{b_1(k_2 + 1)} \left[\operatorname{ierfc}\left(\frac{2R - |x|}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - h_2 \operatorname{ierfc}\left(\frac{2R + |x|}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right] - \frac{2q_0 \sqrt{t}}{b_2} \left[\operatorname{ierfc}\left(\frac{2R - |x|}{2\sqrt{a_2 t}}\right) - \right. \\ \left. - h_2 \operatorname{ierfc}\left(\frac{2R + |x|}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right] + \frac{2q_\tau \sqrt{t}}{b_1(k_2 + 1)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{|x|}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + T_0. \end{array} \right. \quad (1.8)$$

В результате решения температурной задачи авторами работы получена формула

$$T_{2\tau i} = \frac{(b + h_1) \int_0^{\Delta\tau_i} q_2(h, \tau) d\tau}{c_2 \rho_2 \delta (b + h_1 + 2\delta)} + T_{20i}, \quad (1.9)$$

где

$$\int_0^{\Delta\tau_i} q_2(\tau) d\tau = q_\tau \Delta\tau_i - \frac{q_\tau k_6 \Delta\tau_i}{1 + k_6} \left(1 - 4i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{a_1 \Delta\tau_i}}\right) \right) + \frac{q_{v\tau} b_1}{(1 + k_6) c_1 \rho_1} \cdot \left[\frac{\Delta\tau_i^2}{2} - 4\Delta\tau_i^{\frac{3}{2}} i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{a_1 \Delta\tau_i}}\right) \right] + \frac{2\Delta T b_1 \sqrt{\Delta\tau_i}}{(1 + k_6)} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc}\left(\frac{h}{\sqrt{a_1 \Delta\tau_i}}\right) \right), \quad (1.10)$$

$\Delta\tau_i$ – время пребывания валков в i -той зоне; δ_i – глубина активной зоны валков в i -той зоне [19].

При этом, по словам автора, контроль над степенью охлаждения валков и матрицы позволяет поддерживать изотермические условия в процессе СПП.

Ключевыми аспектами при проектировании оборудования для комбинированной обработки выступают упрощение конструкции и минимизация потерь энергии в процессе ее транспортировки от двигателя установки к валкам. В уже выполненных исследованиях [91, 115, 202-208] продемонстрированы результаты моделирования асимметричного процесса совмещенной прокатки-прессования СПП с использованием двух приводных валков, однако изучение процесса с применением одного приводного валка не осуществлялось. В связи с этим, актуальной представляется задача исследований процесса СПП с одним приводным валком.

1.4. Выводы и постановка задач

Анализ научно-технической и патентной литературы позволил сделать следующие выводы.

1. Одной из ключевых тенденций в промышленном производстве длинномерных изделий из цветных металлов и их сплавов становится использование комбинированных методов обработки. Такой подход обеспечивает существенные преимущества, включая сокращение числа технологических этапов и заметное уменьшение энергопотребления.

2. В качестве базовых материалов для исследований целесообразно использовать сплавы системы Al-PЗМ, так как они могут применяться для изготовления проволоки электротехнического назначения со сравнительно высокими механическими свойствами, достаточной электропроводностью и термостойкостью, а также сплавы системы Al-Mg-Sc для производства сварочной проволоки.

3. Для разработки подобных технологических процессов одним из наиболее перспективных технических решений является применение совмещенных методов обработки, которые дополняются последующим процессом волочения. Такой подход позволяет максимально эффективно задействовать преимущества каждого из методов, обеспечивая повышение качества конечного результата и оптимизацию производственного процесса.

4. Наиболее перспективными методами термометаллургической обработки следует считать метод совмещенной прокатки-прессования с использованием роторных и электромагнитных кристаллизаторов, а также метод бесслитковой прокатки-прессования.

5. Актуальными являются исследования совмещенной прокатки-прессования с использованием одного приводного вала, так как это позволяет снизить энергоемкость процесса.

6. Вопросы, касающиеся формоизменения алюминиевых полуфабрикатов, изготовленных с использованием технологий, объединяющих различные схемы деформации в едином узле обработки, остаются недостаточно изученными. Это особенно актуально для случаев, когда такие полуфабрикаты применяются в качестве заготовок для производства прутков круглого сечения, например, посредством электромагнитного кристаллизатора.

7. Анализ существующих теоретических зависимостей, используемых для расчета энергозатрат и силовых характеристик, играет ключевую роль. Не менее важно провести их экспериментальную проверку, чтобы оценить применимость данных методов для сплавов на основе систем Al-PЗМ и Al-Mg-Sc.

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

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В этой главе изложены результаты теоретических исследований и численного моделирования комбинированных процессов прокатки-прессования, выполненных как для варианта СПП с единственным ведущим валком, так и для конфигурации СПП, использующей два ведущих валка. Изучалась обработка круглой заготовки, полученной посредством электромагнитного кристаллизатора. Материалы, послужившие основой для данной главы, ранее были обнародованы в научных трудах [1, 208-214].

2.1. Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричного процесса СПП с одним приводным валком

Ключевыми моментами при проектировании металлообрабатывающего оборудования служат упрощение конструкции и минимизация потерь энергии при ее передаче от привода к инструменту. В предыдущих работах [18] представлены результаты моделирования для асимметричного процесса СПП с использованием двух валков, однако исследования процесса с использованием единственного приводного валка не проводились. Такой подход способствует уменьшению размеров и снижению затрат на изготовление установки.

Для исследований использовали две схемы совмещенной обработки металла: с двумя приводными валками [18] и одним приводным валком (рис. 2.1). Приводным выступал валок 1 с наибольшей контактной поверхностью, выполненной с канавкой (врезом). Валок 2 с выступом являлся неприводным и образовывал с валком 1 закрытый калибр, имеющий прямоугольное поперечное сечение с минимальной высотой h_1 . Заготовку квадратного сечения 4 высотой h_0 задавали в калибр, перекрытый на выходе из валков матрицей 3, которая имела калибрующее отверстие по форме и размерам прессуемого прутка 5 диаметром d .

Исследование деформации металла в процессе прокатки-прессования с одним ведущим валком осуществлялось методом координатных сеток. Образец, подвергнутый этому процессу, представлен на рисунке 2.2. Недокат, использованный в эксперименте, был получен на оборудовании СПП-200, применяемом при прокатке-прессовании с одним приводным валком. [18] при остановке уже установившегося процесса. По сетке образца в разрезе судили о ходе протекания процесса и его особенностях.

Метод координатной сетки использовался для изучения формоизменения образца, подвергнутого процессу СПП с одним приводным валком. Сечение у образца при этом было

размером 14×14 мм с сеткой с ячейками $2,5 \pm 0,2$ мм. Далее образцы подвергались процессу СПП и по искажению ячеек судили об особенностях течения металла при реализации данной схемы обработки [214].

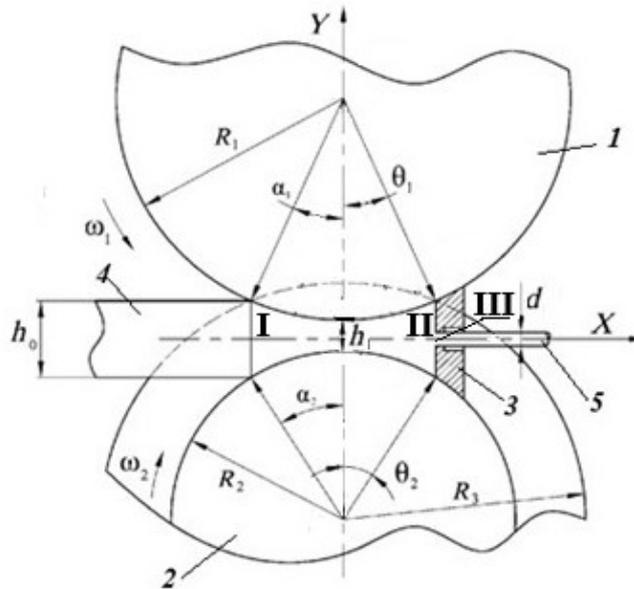


Рисунок 2.1 – Очаг деформации процесса СПП с одним приводным валком (схематическое изображение): 1 – валок в выступе; 2 – валок с канавкой, 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – прутки; I – зона прокатки; II – зона распрессовки; III – зона прессования

В ходе проведенных исследований выявлено, что при входе заготовки в зону деформации происходит её изгиб в направлении приводного вала. Одновременно с этим происходит наплыв металла с противоположной стороны вала с выступом. Такое явление объясняется разницей в скоростях течения металла в разных зонах заготовки, что иллюстрируется на схеме (см. рис. 2.2). Детальный анализ позволяет предположить, что данное поведение материала обусловлено сложными взаимодействиями между параметрами процесса деформации, включая распределение давления и скоростные режимы отдельных участков контактной поверхности. [214].

При максимальном обжатии происходит полный контакт граней заготовки с калибром [18]. Далее наблюдается отставание от неприводного вала из-за различных скоростей течения. Затем прутки выдавливаются через отверстие матрицы. Течение имеет радиальный характер, что соответствует известным закономерностям прессования. Также наблюдается упругая деформация, так как заметен пережим в месте перехода от заготовки к прутку.

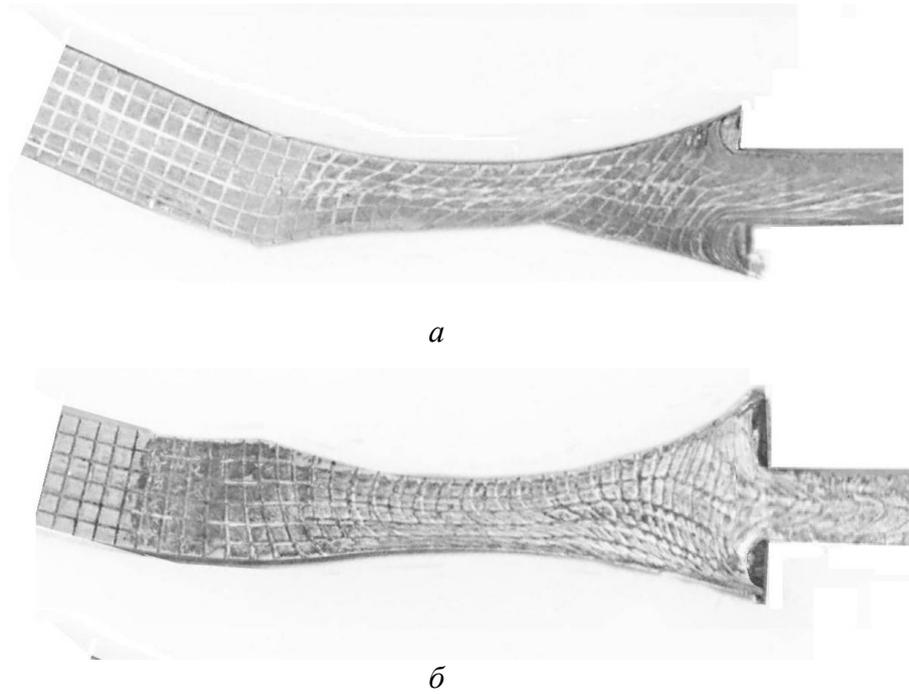
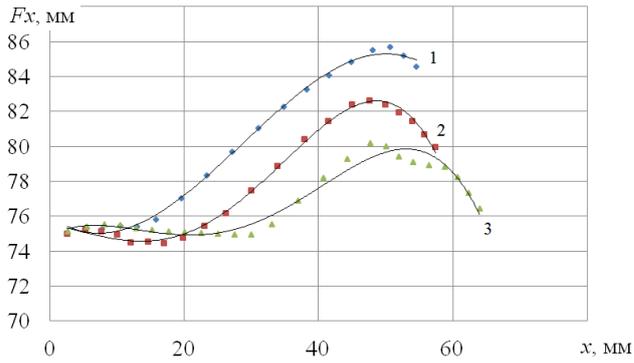


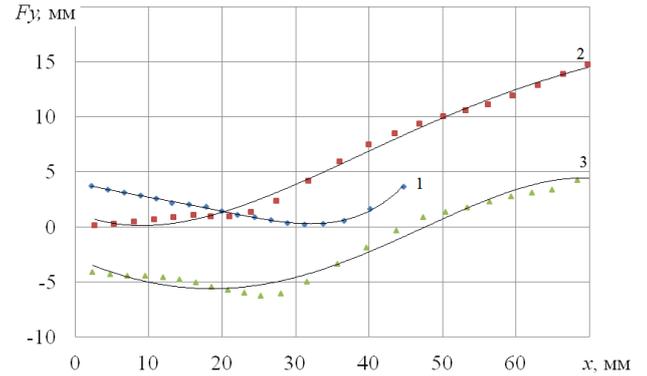
Рисунок 2.2 – Вид недокатов при реализации процесса СПП с одним (а) и двумя (б) приводными валками

Геометрия сетки измерялась с помощью программы AutoCAD по сканированному снимку 3768×3574 пикселей. Данные были обработаны и представлены графически для случая СПП с одним приводным валком на рис. 2.3, 2.4 [214].

При анализе графиков, отображающих процесс прокатки-прессования с использованием одного приводного валка, бросается в глаза, что контактная линия тока, расположенная ближе к валку, обнаруживает динамику, сходную с линиями, возникающими при применении двух валков [18]. В то же время, остальные линии тока претерпевают изменения, придающие процессу уникальность по сравнению с прокаткой-прессованием с двумя валками. Отсюда следует вывод, что движение металла в процессе прокатки определяется взаимодействием сил трения: как активных, так и реактивных, действующих на контактных поверхностях. Исследование координат узлов сетки вдоль линии тока, прилегающей к приводному валку, демонстрирует их смещение ещё до того, как достигается геометрический очаг деформации (рис. 2.3, б), при этом картина схожа со способом с двумя приводными валками [214].

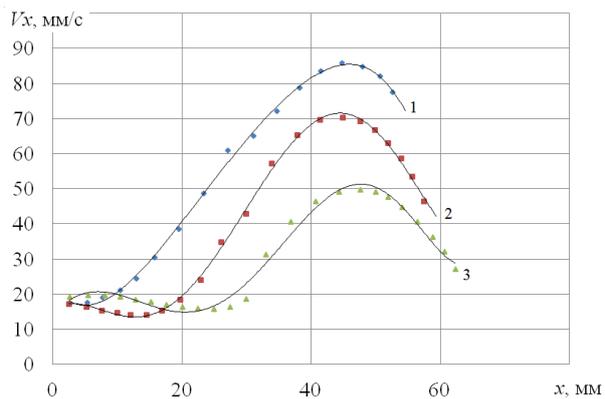


а

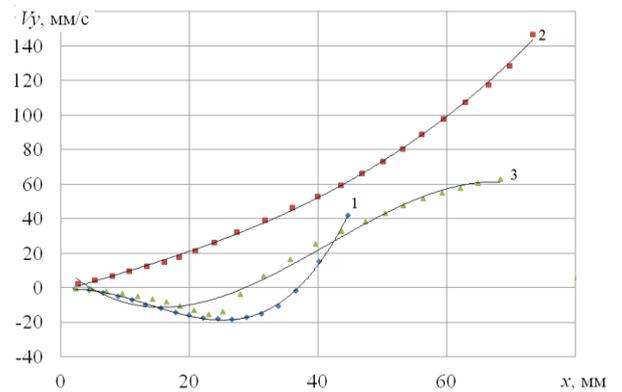


б

Рисунок 2.3 – График распределения по сечению образца горизонтальных F_x (а) и вертикальных F_y (б) перемещений узлов координатной сетки: 1 – контактная линия тока со стороны приводного вала; 2 – осевая линия тока; 3 – контактная линия тока со стороны неприводного вала



а



б

Рисунок 2.4 – График изменения горизонтальной V_x (а) и вертикальной V_y (б) составляющих скорости течения металла: 1 – контактная линия тока со стороны приводного вала; 2 – осевая линия тока; 3 – контактная линия тока со стороны неприводного вала

На стороне неприводного вала в начальной стадии процесса практически не наблюдается опережения частиц металла, находящихся в зоне контакта. Однако по мере приближения к области наибольшего обжатия заготовки в процессе прокатки линии течения металла начинают изменять свое направление, изгибаясь в сторону движения прокатки. Такой эффект обусловлен заметной разницей в скоростях различных слоев металла относительно поверхности вала, что проявляется особенно отчетливо в этой зоне. Фиксируется значительное снижение показателей по мере перемещения вдоль оси прокатки (см. рис. 2.3, а). Этот спад ярко выражен и указывает на специфическую динамику взаимодействия металла и валков. В отличие

от этого, данные, полученные при использовании двух приводных валков в аналогичных условиях прокатки-прессования, демонстрируют иной характер изменений, что наглядно отмечается в работах [18].

Кроме того, на стороне неприводного валка часто отмечается отставание металла от его поверхности. Данное явление объясняется существующей разностью скоростей перемещения между отдельными слоями металла, что приводит к неоднородному континуальному взаимодействию и требует дополнительного учета в моделировании процессов [214].

Наименьшее значение скорости наблюдается в слоях металла, расположенных ближе к неприводному валку, что объясняется особенностями механики процесса и распределением усилий на заготовке. В то же время наибольшее изменение горизонтальной составляющей скорости течения металла (обозначаемой как V_x) обнаруживается в зонах заготовки, прилегающих к области действия приводного валка, что наглядно продемонстрировано на графике (рисунок 2.4, а). График вертикальной составляющей скорости V_y (рисунок 2.4, б) показывает иную картину: особо значительные изменения этой компоненты скорости наблюдаются в центральных, или осевых слоях металла. Это является ключевой отличительной чертой процесса СПП с одним приводным валком, особенно сильно выделяющейся на фоне процесса с использованием двух приводных валков. На дальнейших стадиях формоизменения, в области распрессовки металла, изменения составляющих скоростей становятся еще более выраженными. Здесь происходит заметное увеличение вертикальной составляющей скорости V_y , которая достигает своего максимального значения непосредственно перед входом металла в матрицу [214]. Такой характер изменения объясняется сложными условиями деформации и многослойным характером течения материала.

Анализ и расчёт характеристик СПП с применением одного приводного валка осуществлялся в среде DEFORM 3D. Это позволило выявить зависимости их динамики, в частности, распределение моментов на ведомом и ведущем валках, скорости перемещения металла, силовых нагрузок на валки и матрицу, а также температур в очаге деформации.

Для корректировки реологической модели, базируясь на данных механических испытаний, были получены сведения о свойствах опытного сплава 01417 в различных условиях [209].

Расчеты в системе DEFORM 3D проводились с соблюдением следующих условий и допущений (рис. 2.5):

- рассматриваемый процесс не является изотермическим;
- валки принимаются как несжимаемые;
- материал заготовки однороден и изотропен;
- деформируемая среда классифицируется как вязкопластичная;

- трение на валках и матрице соответствует закону Зибеля.

В качестве начальных параметров для моделирования применялись следующие величины. Сплав: 01417. Коэффициент трения по Зибелю: на матрице $\psi_M = 0,58$, на валках $\psi_B = 0,9$. Габариты поперечного сечения литой заготовки составляли 14×14 мм. Диаметр валка с ручьем был равен 162 мм, диаметр валка с выступом – 214 мм. Степень обжатия при прокатке $\varepsilon = 50\%$. Исходная температура литой заготовки $T_3 = 550^\circ \text{C}$. Частота вращения валков составляла 4 об/мин. Стартовая температура валков T_B и матрицы T_M была принята одинаковой (температура инструмента $T_{ин}$) и варьировалась в диапазоне от 80 до 400°C [214].

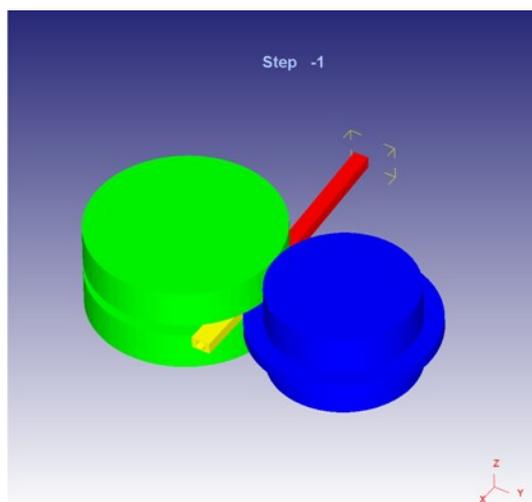


Рисунок 2.5 – Модель инструмента для процесса СПП, полученная в среде SolidWorks

Процесс моделирования запускался и осуществлялся до тех пор, пока не наступал установившийся процесс СПП (рис. 26-2.9). Общее количество элементов: заготовка – 40665 единиц; матрица – 9660; валок с выступом – 97785; валок с канавкой – 81326. С увеличением температуры рабочего инструмента существенно снижается неравномерность распределения температуры заготовки по очагу деформации (см. рис. 2.6) [214].

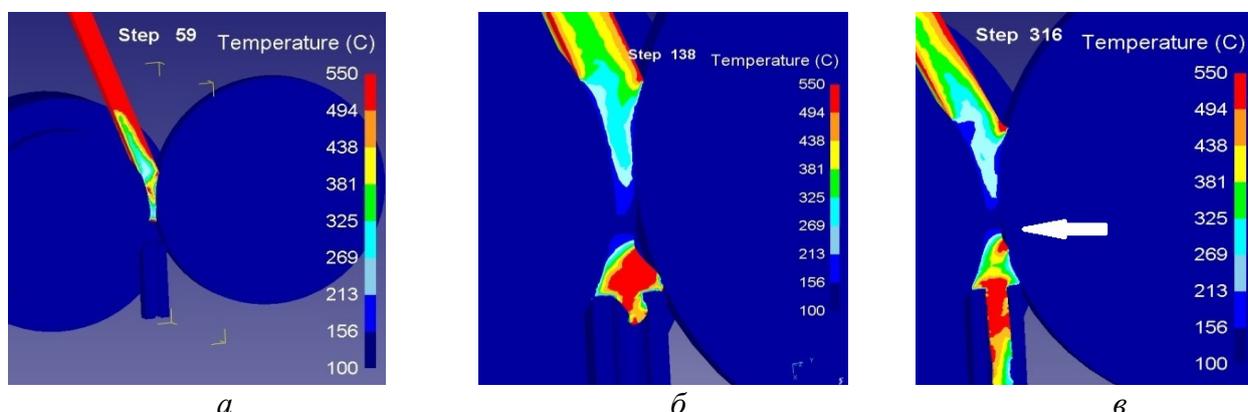


Рисунок 2.6 – Условия протекания процесса СПП на разных стадиях обработки:

a – стадия прокатки; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования

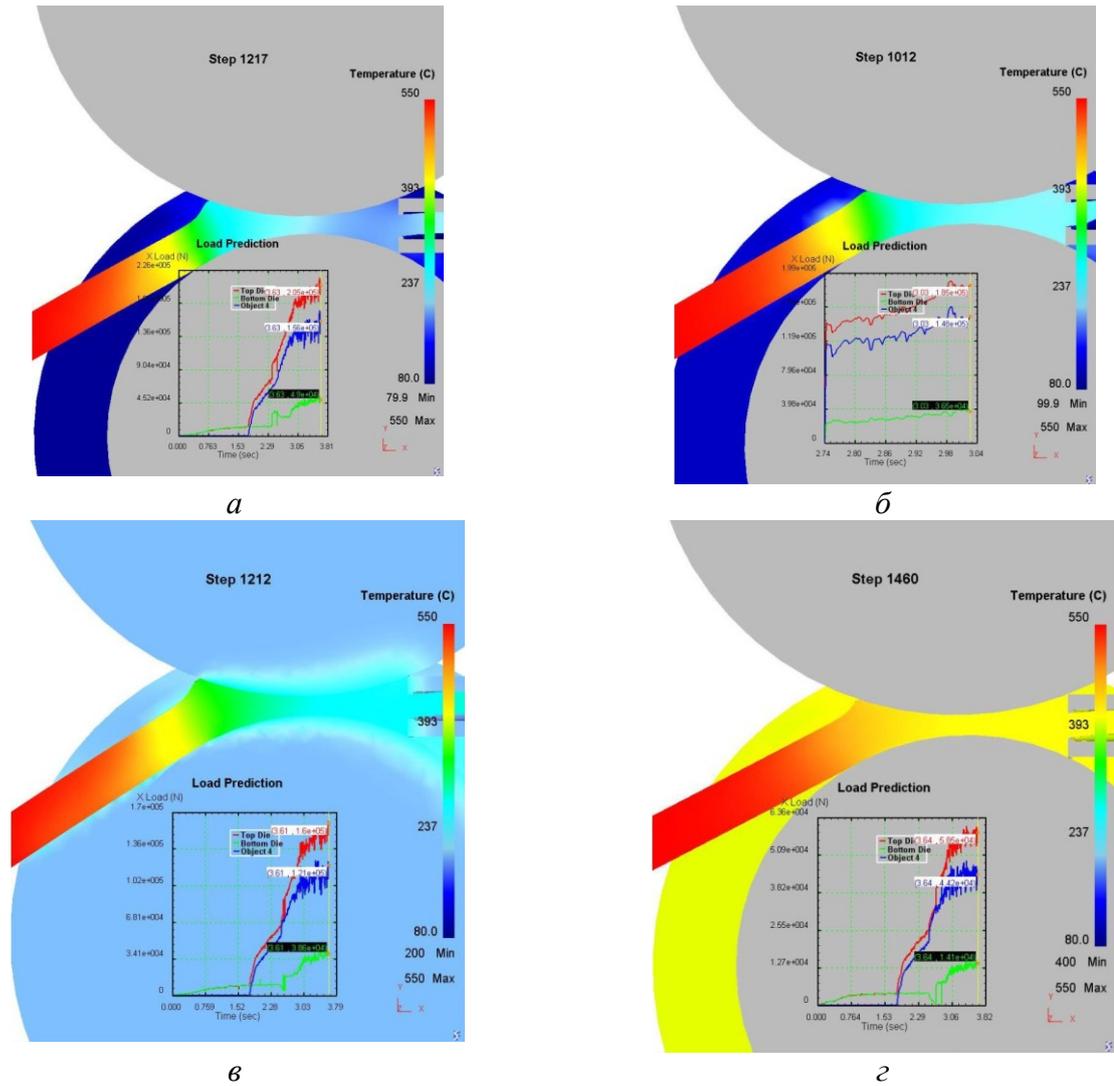


Рисунок 2.7 – Распределение температуры и значения силы, действующей на матрицу, при температуре заготовки (T_3), равной 550 °C, в зависимости от начальной температуры инструмента ($T_{и}$): *a* – 80 °C; *б* – 100 °C; *в* - 200 °C; *г* – 400 °C

Так при начальной температуре нагрева инструмента равной 80 °C значения температуры изделия на выходе из матрицы составило около 200 °C, а при начальной температуре инструмента равной 400 °C температура прутка составила около 390 °C.

Установлено также, что повышение температуры валкового инструмента до 400 °C, приводит к снижению сил на валках и матрице в среднем на 50 – 70 %, что благоприятно сказывается на стойкости рабочего инструмента и позволяет обрабатывать сплавы с повышенными прочностными характеристиками.

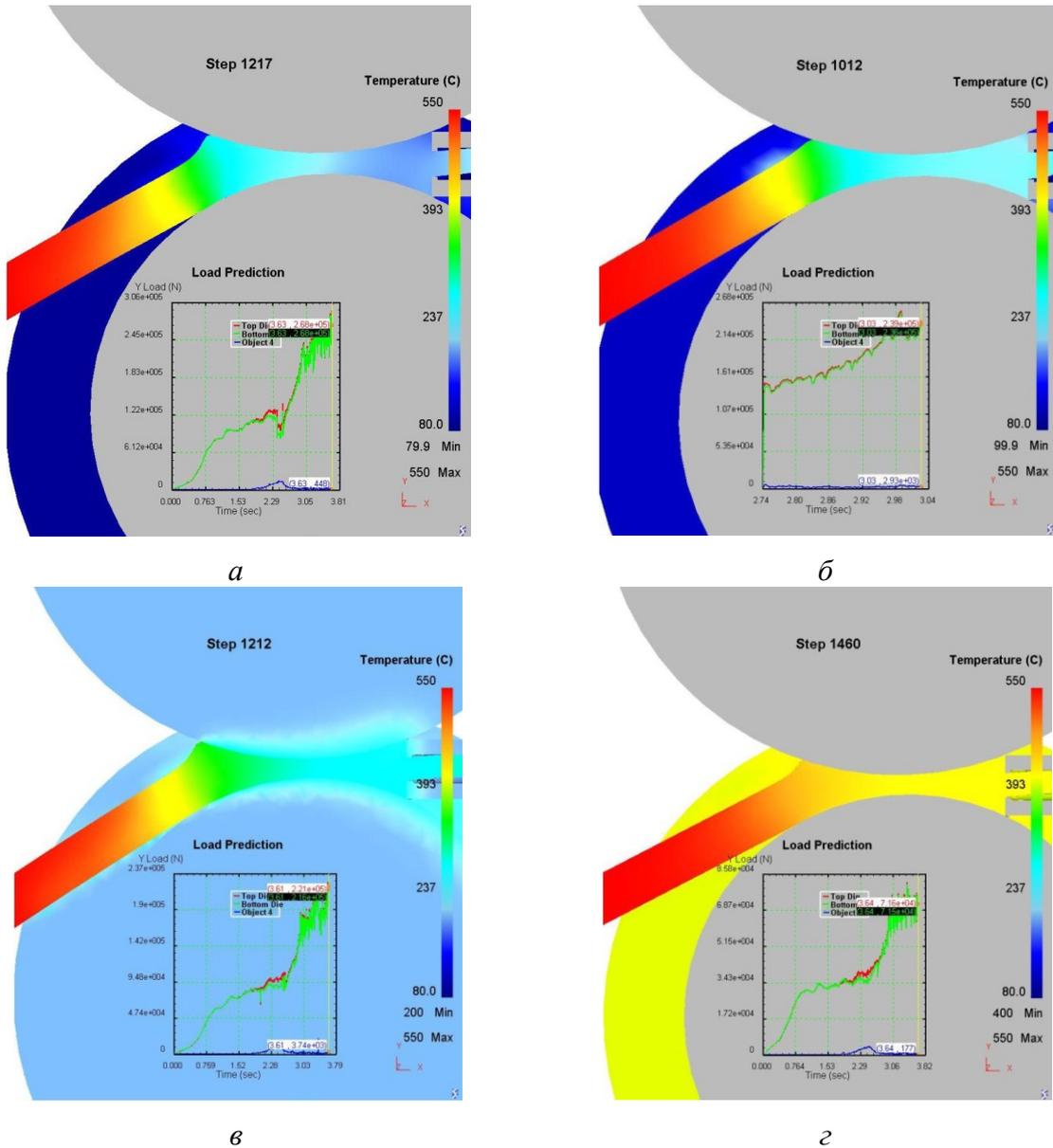


Рисунок 2.8 – Значения силы, действующей на валки, при температуре заготовки (T_3), равной 550 °C, в зависимости от начальной температуры инструмента (T_{II}):

a – 80 °C; *б* – 100 °C; *в* - 200 °C; *г* – 400 °C

Проведенное моделирование подтверждает характер течения при СПП с одним приводным валком. Однако, как было установлено в результате анализа распределения скоростей по очагу деформации, с увеличением температуры валков до 400 °C существенно снижается действие составляющей активных сил трения, что может привести к остановке процесса выдавливания металла [214].

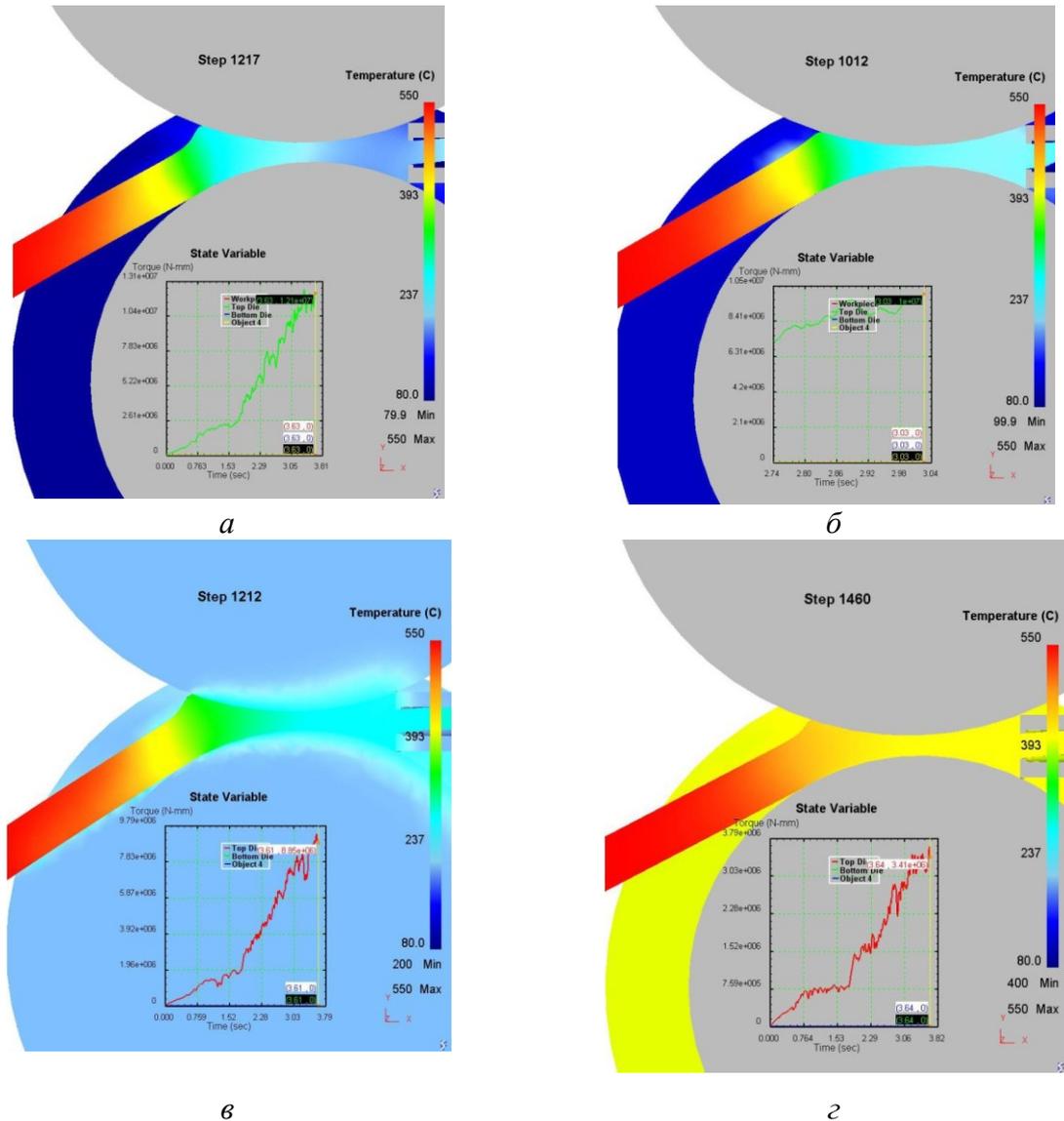


Рисунок 2.9 – Значения момента прокатки на валке с ручьем при температуре заготовки (T_3), равной 550 °C, в зависимости от начальной температуры инструмента (T_i):

a – 80 °C; *б* – 100 °C; *в* – 200 °C; *г* – 400 °C

В связи с этим были проведены исследования реализуемости процесса СПП с одним приводным валком и сравнение результатов расчетов с реализуемостью процесса, когда оба валка являются приводными.

Согласно методике расчета, представленной в работе [18], введено допущение, что мощность, которую валки передают благодаря активному трению, обозначаемая как N_a , обязана равняться или превышать мощность, необходимую для выполнения главной деформации материала $N_{пр}$. Таким образом, соблюдение данного условия играет ключевую роль в обеспечении эффективности и стабильности процесса обработки материала.

$$N_a \geq N_{пр}. \quad (2.1)$$

В отличие от двух приводных валков [18] при определении условий осуществимости процесса СПП с одним приводным валком, не учитывали активные составляющие силы трения со стороны неприводного валка (валка с выступом).

Длина контакта в зоне прокатки для валка с ручьем:

$$L_2 = \frac{\pi\alpha_2}{180} \cdot R_2, \quad (2.2)$$

где L_2 – длина дуги захвата на валке с ручьем, α_2 – угол захвата на валке с канавкой, R_2 – радиус валка с канавкой (см. рис. 2.1).

Площадь соприкосновения заготовки с нижней поверхностью валка будет

$$S_{\kappa 1} = L_2 \cdot b, \quad (2.3)$$

где b – ширина калибра.

Площади контакта заготовки с боковыми поверхностями валка:

$$S_{\text{бок}1} = \left(2h_1L_1 + L_1R_2 + L_1xR_2 - \frac{\pi R_2^2 \alpha_2}{360} - \frac{R_2L_1 \cos \alpha_2}{2} - \frac{\pi(xR_2)^2 \alpha_1}{360} - \frac{xR_2L_1 \cos \alpha_1}{2} \right), \quad (2.4)$$

где h_1 – высота наименьшего сечения калибра, L_1 – длина зоны контакта по валку с выступом, α_1 – угол захвата на валке с выступом.

Площадь соприкосновения заготовки с валком с ручьем:

$$S_{\kappa 2} = \frac{\pi \cdot \theta_2}{180} R_2 \cdot b, \quad (2.5)$$

Эта формула учитывает геометрические параметры валка, характер профиля канавки, а также свойства заготовки. Она служит основой для последующих расчетов силовых и деформационных характеристик процесса прессования, обеспечивая точное описание условий взаимодействия заготовки с инструментом.

$$S_{\text{бок}2} = 2 \left(h_1L_2 + L_2R_2 + L_2xR_2 - \frac{\pi R_2^2 \theta_2}{360} - \frac{R_2L_2 \cos \theta_2}{2} - \frac{\pi(xR_2)^2 \theta_1}{360} - \frac{xR_2L_2 \cos \theta_1}{2} \right), \quad (2.6)$$

где θ_2 – центральный угол валка с канавкой.

Формула для вычисления силы, обусловленной действием активных сил трения, может быть представлена следующим образом

$$P_1 = \psi_B \sigma_s (S_{\kappa 1} + S_{\kappa 2} + S_{\text{бок}1} + S_{\text{бок}2}). \quad (2.7)$$

Силу для выдавливания металла через матрицу [210]:

$$P_2 = 2,577 \sigma_s \cdot F_M \cdot \ln \mu + \pi \sigma_s \cdot \mu \cdot r_M \cdot l_{\text{п}}, \quad (2.8)$$

где μ - коэффициент вытяжки при прессовании, r_M - радиус калибрующего отверстия матрицы, $l_{\text{п}}$ - величина рабочего пояса матрицы.

Реализуемость процесса оценивали с помощью коэффициента

$$K_y = \frac{P_1 - P_2 \cdot \lambda}{P_1} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

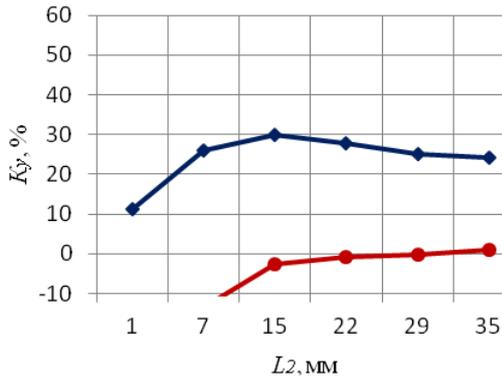
где P_1 - сила, подводимая валками за счет сил трения, P_2 - сила, необходимая для выдавливания металла через отверстие матрицы, λ - коэффициент, характеризующий отношение текущей скорости металла к скорости валков [18].

Изменения коэффициента K_y представлены на рис. 2.10 - 2.12 [210].

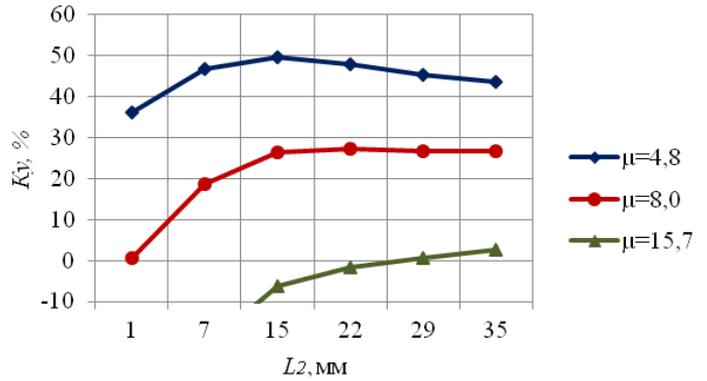
В результате анализа полученных данных было выявлено, что обжатия 30 % при прокатке недостаточно для реализации процесса СПП с одним приводным валком. При небольшой величине удаления матрицы от оси валков при вытяжке $\mu = 15,7$ процесс СПП неосуществим (рис. 2.10, а). Вместе с тем, при обжатии при прокатке $\varepsilon = 30$ % процесс СПП с двумя приводными валками осуществим при вытяжке $\mu = 4,8$ и $8,0$ (рис. 2.10, б). При этом влияние вытяжки на коэффициент реализуемости процесса незначительно при удалении матрицы от 15 до 25 мм.

Процесс СПП ($\varepsilon = 50$ %) с одним приводным валком будет протекать устойчиво только при значении коэффициента вытяжки $\mu = 4,8$ и $8,0$ (рис. 2.11, а). При этом сила, подводимая валками, будет превышать силу для выдавливания прутка на величину от 40 до 80 % в зависимости от коэффициента вытяжки. В случае с двумя приводными валками (рис. 2.11, б) влияние параметра μ на показатель реализуемости процесса остается слабым при смещении матрицы в пределах от 15 до 35 мм и при коэффициенте μ , находящемся в диапазоне от 4,8 до 15,7.

В результате моделирования операции прокатки с обжатием 70 % (рис. 2.12) обнаружено, что коэффициент реализуемости процесса возрос от 20 % до 35 % по сравнению с предыдущими расчётами, как для конфигурации с одним, так и с двумя приводными валками.

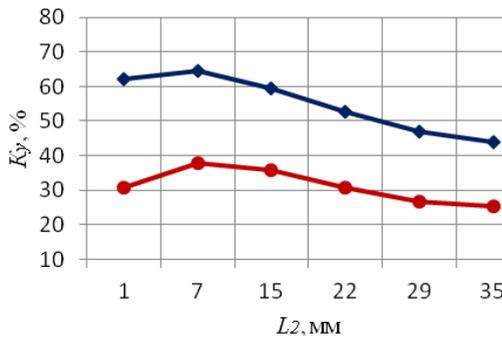


a

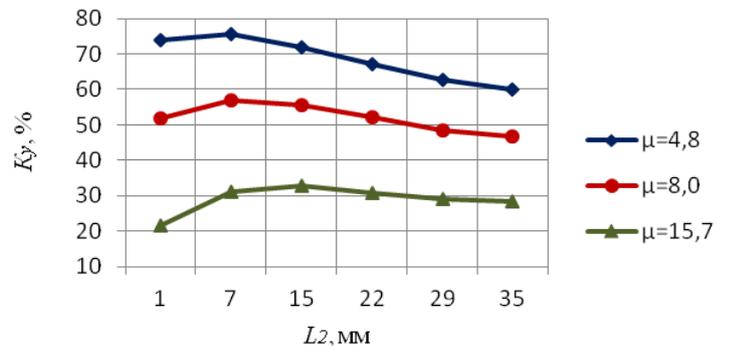


б

Рисунок 2.10 – Изменение коэффициента реализуемости процесса СПП для опытного сплава от коэффициента вытяжки μ и величины удаления матрицы от общей оси валков L_2 при $\varepsilon = 30\%$: *a* – с одним приводным валком; *б* – с двумя приводными валками

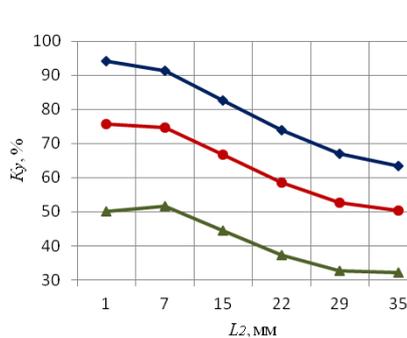


a

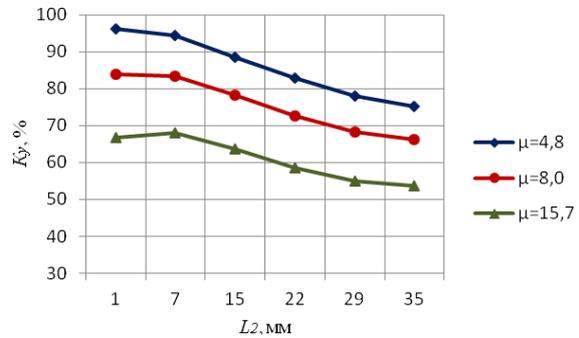


б

Рисунок 2.11 – Изменение коэффициента реализуемости процесса СПП для опытного сплава от коэффициента вытяжки μ и величины удаления матрицы от общей оси валков L_2 при $\varepsilon = 50\%$: *a* – с одним приводным валком; *б* – с двумя приводными валками



a



б

Рисунок 2.12 – Изменение коэффициента реализуемости процесса СПП для опытного сплава от коэффициента вытяжки μ и величины удаления матрицы от общей оси валков L_2 при $\varepsilon = 70\%$: *a* – с одним приводным валком; *б* – с двумя приводными валками

В таком случае будет значительный рост моментов и усилий [210].

Таким образом, коэффициент реализуемости K_y для процесса СПП с одним приводным валком в среднем на 20 % ниже по сравнению со схемой с двумя приводными валками.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве параметров процесса СПП рекомендованы следующие значения:

- величина обжатия ε при прокатке должна составлять не менее 50 %;
- величина удаления матрицы от плоскости наименьшего сечения калибра должна находиться в диапазоне от 15 до 25 мм при коэффициенте асимметричности процесса $x = R_1/R_2 = 1,27$.
- максимальный коэффициент вытяжки при прессовании - до значений порядка 10 - 15.

Силовые параметры рассчитываются по формуле, разработанной на основе экспериментальных данных и аналитического моделирования процесса СПП [18, 210].

Для определения силы, создаваемой валками, используется формула

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

где $\sigma_{ср}$ - среднее сопротивление металла деформации с учетом захолаживания металла в валках; k_3 - коэффициент, учитывающий толщину и температуру заусенца; D - средний диаметр валков, α - угол захвата металла валками; Δh - абсолютное обжатие при прокатке; β - угол отстояния зеркала матрицы от общей оси валков.

Сила, действующую на матрицу [210]:

$$P_M = 1,57k_3 \sigma_{ср} (1,642F_M \ln \mu + 0,5\mu d_M l_{II}), \quad (2.11)$$

где μ - коэффициент вытяжки при прессовании; l_{II} - величина рабочего пояса матрицы;

F_M - площадь распрессованной заготовки перед зеркалом матрицы.

В процессе с одним приводным валком, когда обжатие составляет 50%, усилие, необходимое для вращения валков, уменьшается в среднем на 30-50%. Это происходит из-за того, что снижается трение между металлом и неприводным валком.

В температурной задаче для упрощения анализа распределения температуры, геометрические объекты были смоделированы следующим образом:

Профиль: Рассматривался как массивное тело, занимающее полупространство (полуограниченное пространство); матрица: представлялась в виде плоской пластины бесконечной протяженности, имеющей толщину R . Охлаждение этой пластины происходило за счет отвода тепла с ее внешней поверхности с постоянной интенсивностью q_0 [210].

Для анализа температурных изменений при прокатке-прессовании экспериментального сплава использовалась программа [222] (Microsoft Excel), позволяющая детально рассчитывать объемные и поверхностные источники тепла. Программа отслеживала изменение температуры деформируемого металла и валков в зоне контакта на каждом этапе деформации, как с учетом, так и без учета эффекта охлаждения инструмента.

Результаты расчетов по длине очага деформации, определяемой отношением длины каждой характерной зоны L_i к его общей протяженности L , для опытного сплава 01417 представлены на рисунках 2.13-2.15 и подтверждают общие закономерности изменения температуры металла для алюминиевых сплавов, отмеченные в работе [201].

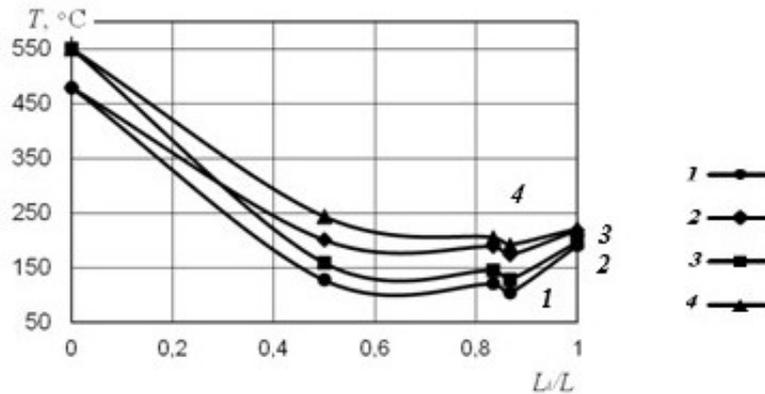


Рисунок 2.13 – Зависимость расчетной температуры металла от относительной длины очага деформации L_i/L при следующих параметрах: 1 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480^\circ\text{C}$; 2 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480^\circ\text{C}$; 3 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550^\circ\text{C}$; 4 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550^\circ\text{C}$

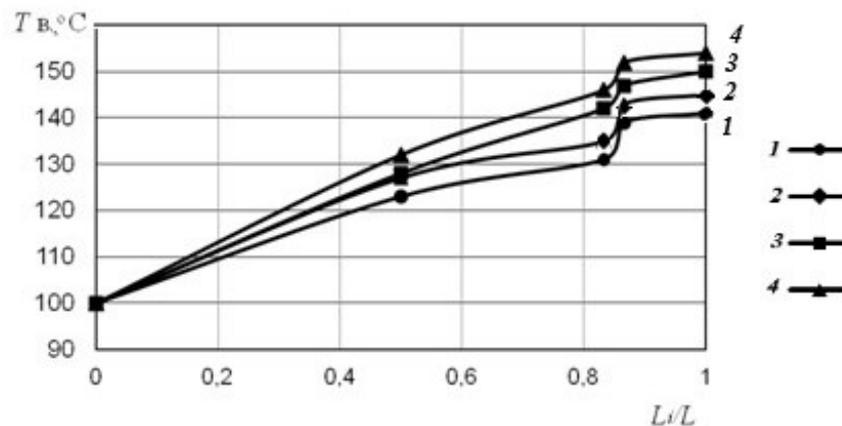


Рисунок 2.14 – Зависимость расчетной температуры валков $T_в$ от относительной длины очага деформации L_i/L при следующих параметрах: 1 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480^\circ\text{C}$; 2 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480^\circ\text{C}$; 3 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550^\circ\text{C}$; 4 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550^\circ\text{C}$

Валки отбирают тепло в начале процесса, поэтому температура падает (рис.

2.14). При быстром деформировании металл нагревается из-за деформационного разогрева, а время контакта с инструментом сокращается. Применение охлаждаемой матрицы позволяет снизить температуру готового изделия на 30-50 °С и сделать процесс СПП более стабильным с точки зрения температуры.

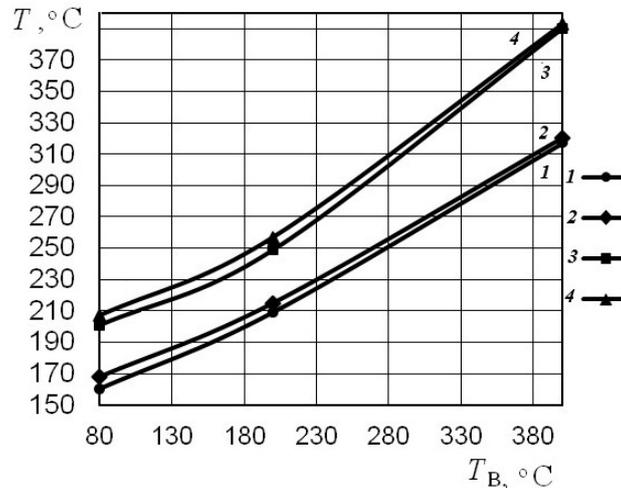


Рисунок 2.15 – Зависимость расчетной температуры металла T от начальной температуры нагрева валков T_B при следующих параметрах: 1 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$, $T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

Отмечается также скачок температуры валков в момент старта прессования, объяснимый деформационным нагревом. Анализ графических данных помог определить оптимальный температурный диапазон для подогрева инструмента, который находится в пределах от 100 до 150 °С.

2.2. Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричного процесса СПП с двумя приводными валками с использованием заготовки круглого сечения

Формоизменение при обработке круглых заготовок в прямоугольных калибрах, представленное на рисунке 2.16, коренным образом отличается от деформации, происходящей при работе с типовой квадратной заготовкой [212-215].

Деформация круглых заготовок в прямоугольном калибре существенно отличается от деформации квадратных. Требуемое 50% обжатие для стабильного процесса СПП прямоугольных заготовок применимо только при полном заполнении калибра, что не выполняется для круглых. Ввиду нетехнологичности получения квадратных заготовок в электромагнитном кристаллизаторе, для круглых заготовок рекомендуется увеличение ширины

канавки калибра на 5-15% от диаметра. Недостаточное обжатие приводит к снижению контактных сил, проскальзыванию и остановке процесса, что подтверждается анализом следов контактного взаимодействия.

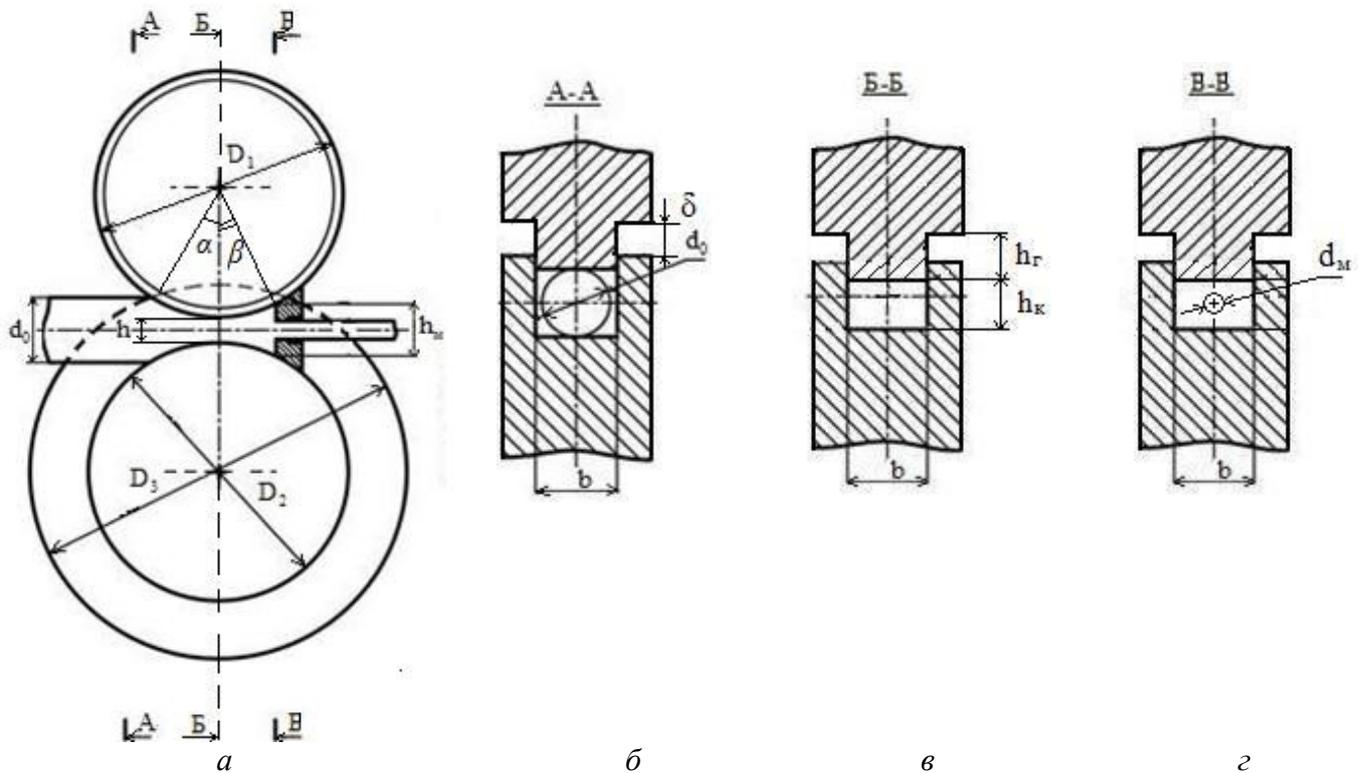


Рисунок 2.16 – Схема процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре [215]: *a* – общий вид; *б* – на входе в деформирующий узел, *в* – при прокатке, *г* – при выдавливании пресс-изделия из матрицы



Рисунок 2.17 – Вид круглой заготовки после деформации в прямоугольном ящичном калибре установки СПП и остановки процесса

Высоту гребня вала с выступом для стабильной прокатки и заполнения калибра определяют (см. рис. 2.16) [212-215]:

$$h_k b = 0,25\pi d_0^2, \quad (2.12)$$

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

С учетом заданного расстояния между бочками находится:

$$h_r = \delta + d_0 - \frac{0,25\pi d_0^2}{b}, \quad (2.13)$$

где h_r – высота гребня валка с выступом.

Условие реализуемости:

$$h_{r3} \geq h_r, \quad (2.14)$$

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

Исходные данные представлены в табл. 2.1 [212-215].

Высота гребня валка 6,5 мм полностью соответствует результатам эксперимента (6,5 мм).

Таблица 2.1 – Параметры процесса для обработки круглых заготовок на установках СПП

Параметры	СПП-400	СПП-200
Диаметр заготовки d_0 , мм	12; 18	12
Температура заготовки T_3 , °С	480; 550	480; 550
Частота вращения валков n , об/мин	4; 8	4; 8
Степень деформации по высоте при прокатке ε , %	50	50
Диаметр валка с выступом D_1 , мм	385	214
Диаметр валка с канавкой D_2 , мм	385	167
Высота гребня валка с выступом h_{r3} , мм	8	7
Величина зазора между валками δ , мм	2	2
Размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b$, мм	7×15; 10×21	3
Усилие гидроприжима, кН	400	20
Диаметр матрицы d_m , мм	5; 9	2
Высота рабочего пояса матрицы L_p , мм	3	50
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20; 26	12
Коэффициент вытяжки при прессовании μ	6,5 - 27,2	5

По установке СПП-400 с калибром 10×21 мм (таблица 2.1) получены следующие результаты. Вычисленная высота гребня в указанных условиях составила 8,6 мм. Сопоставление этой величины с экспериментальными данными показало нарушение условия (2.3). Следовательно, осуществление процесса СПП при указанных параметрах невозможно. Целесообразно далее применять заготовку диаметром 18 мм и высоту гребня 7,9 мм. На основании полученного результата можно заключить, что процесс СПП будет гарантированно реализован при данных условиях [212-215].

2.3. Математическое моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах

Для создания математических моделей использовали вариационный принцип минимума полной мощности, уравнение баланса мощностей [216-219] и схему процесса на рис. 2.18.

где N_a - мощность, формируемая активными силами трения, действующими на контактной поверхности вращающихся валков с деформируемой заготовкой; N_p - мощность, затрачиваемая на осуществление процесса выдавливания металла через отверстие матрицы.

При решении задачи были приняты следующие допущения.

1. Катающие диаметры валка с выступом $D_1=2R_1$ и валка с канавкой (врезом) $D_2=2R_2$ одинаковы и равны $D=2R$.
2. Величина отстояния матрицы от общей оси валков L_2 принята максимально возможной.
3. Средняя по сечению скорость движения металла по зоне прокатки максимальна и определяется окружной скоростью вращения валков $V_в$ с учетом коэффициента проскальзывания k_{np} , а средняя скорость перемещения металла изменяется с учетом условия постоянства секундного объема деформируемого металла, рассчитываемого по формуле:

$$V_{сек} = k_{np} \cdot V_в \cdot F_1 = k_{np} \cdot \omega \cdot R \cdot b \cdot h, \quad (2.16)$$

где $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ - угловая скорость вращения валков; n - число оборотов в минуту [211].

4. Изменение высоты h_x в зонах 1 и 2 (см. рис. 2.18) подчиняется выражениям

$$h_{x1} = h + R \cdot \alpha^2, \quad (2.17)$$

$$h_{x2} = h + R \cdot \beta^2, \quad (2.18)$$

5. Для расчетов использовали значение среднего сопротивления деформации металла, определяемого по формуле

$$\sigma_{S_{cp}} = \sqrt{\sigma_{S_0} \cdot \sigma_{S_k}}, \quad (2.19)$$

где σ_{S_0} - начальное значение сопротивления деформации; σ_{S_k} - сопротивление деформации на выходе из очага деформации.

6. Для стабильного протекания процесса СПП принято, что необходимо, чтобы N_a было больше N_p с условным запасом мощности, равным 10 %.

Полная мощность N_p при реализуемом процессе равна

$$N_p = N_{деф} + N_{тр_M} + N_{тр_П}, \quad (2.20)$$

где $N_{деф}$ - мощность, затрачиваемая на деформацию металла без учета контактного трения; $N_{тр_M}$ - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и

пластической зон перед матрицей; $N_{mp_{II}}$ - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы.

Мощность формоизменения:

$$N_{def} = \xi \cdot \sigma_{сск} V_{сек} \cdot \ln \mu, \quad (2.21)$$

где ξ - коэффициент, учитывающий влияния сил среза и неравномерности деформации, принимаемый в нашем случае равным 2 [220]; $V_{сек}$ - секундный объем деформируемого металла; μ - коэффициент вытяжки при прессовании.

Мощность, необходимая для преодоления сил трения в ОЧПЗ:

$$N_{mp_M} = \frac{F_{зМ}}{\sin \theta} \cdot \ln \mu \cdot \tau_M \cdot V_{\tau_M}, \quad (2.22)$$

где $F_{зМ}$ - площадь зеркала матрицы; θ - угол канала плоской матрицы, принимаемый равным

90° ; $\tau_M = \psi_M \frac{\sigma_{сск}}{\sqrt{3}}$ - среднее значение напряжения трения в обжимающей части перед

матрицей, рассчитываемое в соответствии с законом Зибеля; ψ_M - осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на зеркале матрицы; V_{τ_M} - среднее значение скорости скольжения металла, определяемое по формуле

$$V_{\tau_M} = 0,5 V_{сек} \left(\frac{1}{h_M \cdot b} + \frac{4}{\pi \cdot d^2} \right). \quad (2.23)$$

Мощность, необходимая для преодоления трения о калибрующий поясок матрицы [110]:

$$N_{mp_{II}} = \mu \cdot F_n \cdot \tau_n \cdot V_{\tau_{II}}, \quad (2.24)$$

где $F_n = \Pi_{изд} \cdot l_n$ - площадь поверхности трения калибрующего пояска канала матрицы; $\Pi_{изд}$ -

периметр калибрующего отверстия матрицы; $\tau_n = \psi_n \cdot \sigma_s \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$ - среднее значение напряжения

трения на калибрующем пояске матрицы, рассчитываемое по закону Зибеля; ψ_n - осредненный

показатель трения, характеризующий условия трения на пояске матрицы; $V_{\tau_{II}} = V_{сек} / F_{изд}$ -

скорость скольжения металла по поверхности пояска матрицы, принимаемая равной скорости истечения [211].

Суммарная мощность:

$$N_a = N_{mp_1} + N_{mp_2}, \quad (2.25)$$

где N_{mp_1} - мощность активных сил трения, действующих на контактных поверхностях, образованных катающими диаметрами обоих валков; N_{mp_2} - мощность активных сил трения, действующих на стенках валка с ручьем [110].

Мощность N_{mp_1} на катающих поверхностях обоих валков будет равна

$$\begin{aligned} N_{mp_1} &= k_{np} \cdot V_{\epsilon} (\tau_{\epsilon} + \tau_{\eta}) \cdot b \cdot R \int_0^{\gamma} \left(1 - \frac{h}{h + R \cdot \gamma^2}\right) d\gamma = \\ &= k_{np} \cdot V_{\epsilon} (\tau_{\epsilon} + \tau_{\eta}) \cdot b \cdot R \cdot [(\alpha + \beta) - \sqrt{\frac{h}{R}} \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{R}{h}} \cdot (\alpha + \beta)\right)], \end{aligned} \quad (2.26)$$

где α - угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне прокатки; β - угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне прессования перед матрицей; $\gamma = \alpha + \beta$;

$\tau_{\epsilon} = \psi_{\epsilon} \cdot \frac{\sigma_{ср}}{\sqrt{3}}$ и $\tau_{\eta} = \psi_{\eta} \cdot \frac{\sigma_{ср}}{\sqrt{3}}$ - средние значения напряжений трения, соответственно, на верхнем и нижнем валках, рассчитываемые по закону Зибеля; ψ_{ϵ} и ψ_{η} - осредненные показатели трения, характеризующие условия трения, соответственно, на верхнем и нижнем валках.

Мощность N_{mp_2} , создаваемую силами трения на стенках валка с ручьем, определяли по формуле:

$$N_{mp_2} = k_{np} \cdot 2V_{\epsilon} \tau_{ст} \cdot h_{ср} \cdot R \cdot [(\alpha + \beta) - \sqrt{\frac{h}{R}} \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{R}{h}} \cdot (\alpha + \beta)\right)], \quad (2.27)$$

где $\tau_{ст} = \psi_{ст} \cdot \sigma_{ср}$ - средние значения напряжений трения на каждой из двух боковых стенках калибра, рассчитываемых в соответствии с законом Зибеля; $\psi_{ст}$ - осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на стенках валка с ручьем; $h_{ср}$ - среднее значение высоты очага деформации в зонах прокатки и распрессовки [211].

Значения показателей на различных контактных поверхностях были приняты равными: на валках $\psi_{\epsilon} = 0,75-1,0$; на матрице $\psi_{м} = 0,50 - 0,75$.

Коэффициент запаса мощности K_N , рассчитывается по формуле [211]

$$K_N = \frac{N_a}{N_p K_3}, \quad (2.28)$$

где $K_N = 1,1$ – коэффициент, учитывающий, что при выдавливании части металла в зазор между валками и матрицей расходуется дополнительная энергия, которая по экспериментальным оценкам составляет до 10 % от затраченной.

При $K_N > 1,0$ процесс СПП становится осуществимым.

Расчет проведен для условий реализации процесса СПП по получению прутков диаметром 9 мм из сплава 01417 на установках СПП-200 и СПП-400 (см. табл. 2.2, рис. 2.19). В табл. 2.2 приведен пример одного из расчетов для условий получения прутка из сплава 01417 диаметром 9 мм на установке СПП-200. Температура заготовки была принята равной 550 °С [211].

Анализ данных [91], приведенных на рис. 2.19, показывает, что увеличение диаметра валков (рис. 2.19 *а, б*) приводит к росту коэффициента мощности до 1,9 вследствие роста активных сил трения за счет увеличения площади контакта металла с валками. В этом случае уменьшение размеров калибра ведет к снижению коэффициента запаса мощности K_N до минимальных значений (см. рис. 2.19 *а*), что при пониженных значениях трения на контакте металла с валками может привести к остановке процесса.

Эти результаты учитывали при планировании экспериментальных исследований и выборе размеров валкового и прессового инструмента.

Высокий показатель трения ($\psi \geq 0,9$) обеспечивает устойчивость. Это необходимо для интенсификации адгезионного взаимодействия между материалами, что способствует более эффективному переносу деформации [13]. В противоположность этому, при прессовании необходимо минимизировать фрикционные силы, чтобы снизить энергозатраты и предотвратить повреждение инструмента и заготовки. Минимизация трения при прессовании достигается применением смазочных материалов, оптимизацией геометрии инструмента и контролем скорости деформации. Создание условий, близких к интенсивному прилипанию при СПП, напротив, обеспечивается путем активации поверхности, повышения температуры и выбора материалов с высокой совместимостью. Таким образом, регулирование трения является ключевым фактором для достижения оптимальных результатов.

На основании вышеизложенного, представляется возможным заключить о выполнимости или невыполнимости процесса СПП при установленных условиях [110].

Таблица 2.2 – Значения параметров и составляющих мощности для получения прутков диаметром 9 мм из сплава 01417 на установке СПП-200

Входные параметры	
Средний радиус валков, мм	90
Ширина калибра b , мм	15
Минимальный зазор между валками h , мм	7
Высота зеркала матрицы h_m , мм	20
Диаметр прессуемого прутка d , мм	9
Длина калибрующего пояска матрицы l_n , мм	2
Число оборотов валков n , об/мин	4
Диаметр заготовки d_0 , мм	12
Начальное сопротивление металла деформации σ_{s_0} , МПа	40
Показатель трения на катающих поверхностях валков ψ_B, ψ_H	0,9
Показатель трения на стенках валка с ручьем $\psi_{ст}$	0,9
Показатель трения на обжимающем и калибрующем участках матрицы ψ_M, ψ_{II}	0,5
Коэффициент, учитывающий неравномерность деформации ξ	2,0
Коэффициент проскальзывания k_{np}	1,0
Расчетные геометрические и технологические параметры	
Высота заготовки на входе в очаг деформации в зоне прокатки h_n , мм	14,0
Высота заготовки на входе в очаг деформации в зоне прессования, $h_{зм}$ мм	20,0
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне прокатки α , град	15,65
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне распрессовки β , град	21,2
Периметр калибрующего отверстия матрицы $P_{изд}$, мм	28,3
Линейная скорость вращения валков V_g , мм/мин	39,8
Скорость истечения металла из матрицы $V_{ист}$, мм/с	61,3
Напряжение трения в обжимающей части матрицы τ_m , МПа	15,1
Напряжение трения на калибрующем пояске матрицы τ_n , МПа	19,6
Напряжение трения на катающих поверхностях валков τ_g, τ_H , МПа	27,1
Напряжение трения на стенках валка с ручьем $\tau_{ст}$, МПа	27,1
Значения составляющих уравнения баланса мощностей и коэффициент запаса мощности	
Мощность деформации, затрачиваемая на осуществление процесса $N_{деф}$, Вт	512,3
Мощность трения, на преодоление сил трения на матрице N_{mp_m} , Вт	257,7
Мощность трения, затрачиваемая на калибрующем пояске матрицы $N_{mp_{II}}$, Вт	449,2
Суммарная затрачиваемая мощность, N_p , Вт	1219,3
Мощность сил трения на поверхности катающих диаметров валков N_{mp1} , Вт	927,96
Мощность сил трения на стенках валка с ручьем N_{mp2} , Вт	901,66
Суммарная мощность активных сил трения N_a , Вт	1829,62
Коэффициент запаса мощности K_N	1,5

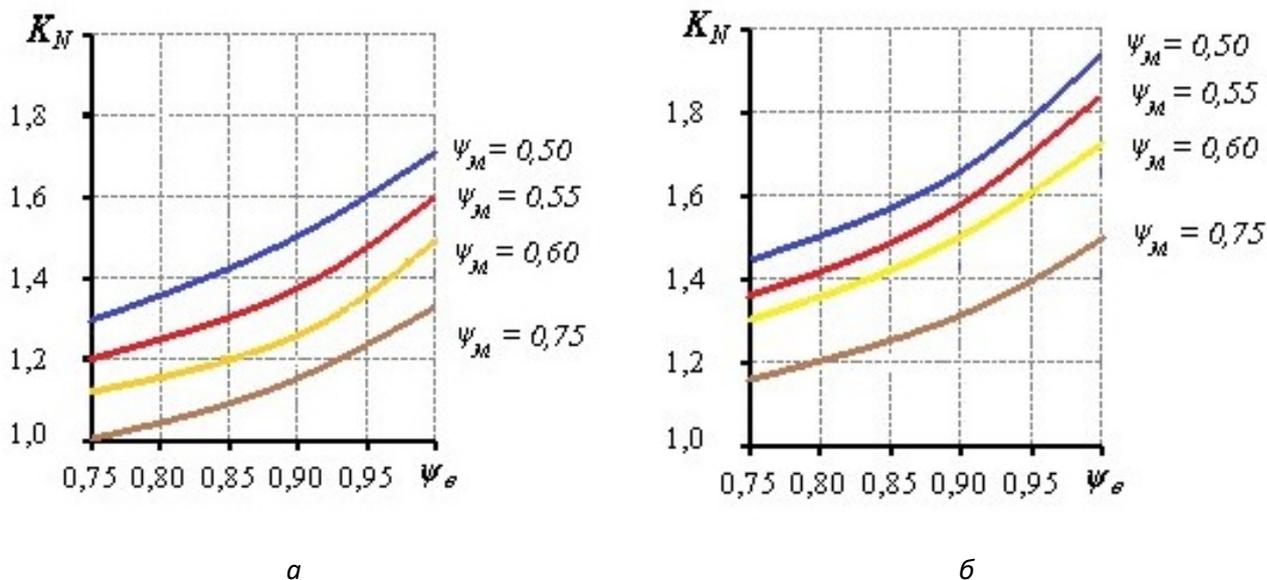


Рисунок 2.19 – Изменение коэффициента запаса мощности K_N в зависимости от различных условий контактного трения металла с валками и матрицей при обработке круглых слитков из сплава 01417 методом СПП: *а* – начальный диаметр валков $D = 180$ мм; размеры калибра 7×15 мм, *б* – начальный диаметр валков $D = 400$ мм; размеры калибра 10×21 мм

Результаты проведенных исследований [18, 91] подтвердили реализуемость процесса:

- расстояние от зеркала матрицы до общей оси валков нужно выбирать максимальным, но не превосходящим дистанцию от общей оси валков до точки раскрытия калибра;
- контактное трение необходимо максимизировать, создавая условия предельного трения между металлом и валками;
- диаметр валков при идентичных размерах калибра следует выбирать как можно большим (от 400 мм и выше), поскольку это способствует увеличению коэффициента запаса;
- уменьшение размеров калибра ведет к уменьшению коэффициента запаса мощности K_N до минимальных значений;
- величина обжатия при прокатке должна приближаться к 50%;
- коэффициент вытяжки при выдавливании, при возможности его варьирования, в рамках данного процесса СПП необходимо выбирать в диапазоне $\mu = 4,7 - 8,6$.

Для решения второй задачи была построена математическая модель этого процесса [18, 219].

Вариационное уравнение принципа минимума полной мощности

$$\delta(N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} - N_{\text{ск}} - N_{\text{вал}}) = 0 \quad (2.29)$$

и уравнение баланса мощности, записанное в виде

$$N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} - N_{\text{ск}} - N_{\text{вал}} = 0, \quad (2.30)$$

где $N_{вн}$ – мощность внутренних сил; $N_{ср}$ – мощность сил среза; $N_{ск}$ – мощность напряжений трения на скоростях скольжения; $N_{вал}$ – подводимая валками мощность.

Схема очага деформации, принятая для решения вариационной задачи представлена на рис. 2.18. Для характеристики формы и размеров очага деформации процесса СПП предложены безразмерные параметры, однозначно описывающие очаг деформации (табл. 2.3) [18].

Использование варьируемых параметров в геометрической модели позволяет адаптировать ее к различным формам и размерам очага деформации, повышая точность моделирования. Кинематически возможное поле скоростей обеспечивает физическую корректность модели, исключая нереалистичные сценарии деформирования. Компоненты полной мощности позволяют учесть все факторы, влияющие на энергобаланс системы, что необходимо для точного прогнозирования характеристик процесса.

Таблица 2.3 – Безразмерные параметры очага деформации

Параметр	Обозначение величины	Выражение	Значения безразмерных параметров
Приведенный диаметр валков	A	$A = \frac{D - d_0}{h}$	10; 30; 50
Приведенная ширина калибра	\tilde{b}	$\tilde{b} = \frac{b}{h}$	1,6; 2,0; 2,4
Приведенный диаметр заготовки	\tilde{h}_0	$\tilde{h}_0 = \frac{d_0}{h}$	1,1; 1,6; 2,1
Приведенная высота матрицы	\tilde{h}_m	$\tilde{h}_m = \frac{h_m}{h}$	1,1; 2,0; 2,9
Приведенный диаметр пресс-изделия	\tilde{h}_1	$\tilde{h}_1 = \frac{d_1}{h}$	0,4; 0,7; 1,0

Данный диапазон изменения параметров выбран на основе имеющихся экспериментальных установок СПП-200 и СПП-400 (см. табл. 2.2).

Геометрическая модель совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения построена с учетом особенностей процесса, установленных при ранее проведенных исследованиях [18].

Для решения задачи приняты следующие допущения и граничные условия.

1. Катающие диаметры обоих валков D_1 и D_2 одинаковы и равны D .
2. Величина отстояния матрицы от общей оси валков L_2 принята максимальной.

3. Изменение высоты поверхностей валков зависит от координаты x и подчиняется выражению [213]

$$h_x = 0,5h + 0,5D - \sqrt{0,25D^2 - x^2}, \quad (2.31)$$

где x – текущая координата по соответствующей оси (см. рис. 2.18).

Очаг деформации в переходном сечении [18]:

$$h_k = h + D - \sqrt{D^2 - 4k^2 \cdot L_2^2}, \quad (2.32)$$

где $k = \frac{L_k}{L_2}$ – коэффициент, характеризующий положение переходного сечения

относительно матрицы.

Равенство площадей в переходном сечении при $x = L_k$.

4. Параметры калибра обеспечивают полное его заполнение, поэтому уширение металла при прокатке не учитывается.

5. Принято, что на всей контактной поверхности реализуется скольжение металла относительно валков и инструмента, а среднее напряжение трения определяется по формуле

$$\tau_{mp} = \psi \tau_s = \psi \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (2.33)$$

где ψ – показатель трения по Зибелю, зависящий от температуры металла, соотношения размеров очага деформации и состояния трущихся поверхностей, τ_s – предел текучести металла на сдвиг.

С учетом данных экспериментальных исследований [213] для расчетов принимали следующие значения показателя трения: $\psi = 0,8; 0,9; 1,0$.

6. Обрабатываемый материал обладает свойствами жесткопластической среды, а условие пластичности имеет вид $T = \tau_s$.

7. Для расчетов использовали значение среднего сопротивления деформации металла.

Таким образом, построенная геометрическая модель описывает область очага пластической деформации с точностью до неизвестного безразмерного параметра k .

Составляющие скорости для зон 1 и 2 записывали, исходя из рекомендаций работы [216], используя при этом следующие выражения:

$$V_x = f(x), V_z = f(x, z), V_y = 0. \quad (2.34)$$

Составляющую скорости V_x

$$V_x = V_0 \frac{S_0}{S_x}, \quad (2.35)$$

где $V_0 = v V_\theta$ – скорость входа металла в валки; v – скоростной коэффициент; V_θ – скорость вращения валков; S_0 – площадь поперечного сечения заготовки; S_x – текущая площадь поперечного сечения в плоскости с координатой x .

Для зоны 3 считали, что кинематически возможное поле скоростей определяется с учетом гипотезы плоских сечений для осесимметричной задачи [18]

$$V_x = f(x), V_z = V_\rho \cdot \sin \varphi', V_y = V_\rho \cos \varphi', \quad (2.36)$$

где V_ρ – радиальная составляющая скорости, φ' – угол между составляющими скорости V_y и V_ρ .

Тогда составляющие скорости с учетом того, что для определения составляющей V_z использовали условие несжимаемости, могут быть записаны по зонам следующими выражениями.

Зоны 1 и 2.

$$V_x = \frac{V_0 \cdot S_0}{b \cdot (h + 2x^2 / D)},$$

$$V_z = \frac{4 \cdot V_0 \cdot S_0 \cdot x \cdot z}{D \cdot b \cdot (h + 2x^2 / D)^2}. \quad (2.37)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения заготовки; S_x – текущая площадь поперечного сечения в плоскости с координатой x [211].

Составляющие скорости деформации:

$$\xi_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{4 \cdot V_0 \cdot S_0 \cdot x}{D \cdot b (h + 2x^2 / D)^2},$$

$$\xi_{xz} = \frac{4 \cdot V_0 \cdot S_0 \cdot z}{D \cdot b \cdot (h + 2x^2 / D)^3} \left[(h - 6x^2 / D) \right], \quad (2.38)$$

$$\xi_{xy} = \xi_{yz} = 0.$$

Зона 3. Считая, что скорость V_ρ распределена в сечении по линейному закону, получили

$$V_x = \frac{S_0 \cdot V_0}{\pi \left(\frac{R_3 - 0,5h_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5h_1 \right)^2} \quad V_z = \frac{0,5 \cdot S_0 \cdot V_0}{\pi \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^2} \cdot \sin \varphi' \cdot \tan \varphi$$

$$V_y = \frac{0,5 \cdot S_0 \cdot V_0}{\pi \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^2} \cdot \cos \varphi' \cdot \tan \varphi,$$

$$V_p = \frac{0,5 \cdot S_0 \cdot V_0}{\pi \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^2} \cdot \tan \varphi. \quad (2.39)$$

Дифференцирование составляющих скорости деформации:

$$\xi_{xx} = \frac{2 \cdot S_0 \cdot V_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\pi \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^3}, \quad \xi_{pp} = - \frac{V_0 \cdot S_0 \cdot \tan \varphi}{\pi \cdot \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^3},$$

$$\xi_{xp} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial p} + \frac{\partial V_p}{\partial x} \right) = \frac{0,5 \cdot S_0 \cdot V_0 \cdot (\tan^2 \varphi - 2)}{\pi \cdot \left(\frac{R_3 - 0,5d_1}{1-k} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_2} \right) + 0,5d_1 \right)^3}, \quad (2.40)$$

$$\xi_{x\varphi} = \xi_{\varphi p} = 0.$$

Средние скорости скольжения [54]:

$$V_{\text{ск}1,2} = \frac{1}{F_{OT}} \iint_F V_{\text{СК}} \cdot \partial F, \quad (2.41)$$

$$V_{\text{ск}1,2,3} = \frac{1}{F_K} \iint_F (V_{\Pi} - V_B) \cdot \partial F, \quad (2.42)$$

где F_{om} , F_K - соответственно площадь зоны контакта металла с валками и полная контактная площадь; V_{Π} - скорость течения металла в поверхностном слое.

Построенное поле скоростей описывает течение металла с точностью до варьируемых параметров k и ν .

Составляющие полной мощности [219] записывали и решали систему уравнений (2.29–2.30).

Составляющие полной мощности находили по общеизвестным формулам [219]

$$N_{\text{вн}} = \int_V \tau_s H dV, \quad N_{\text{cp}} = \int_{F_{cp}} \tau_s |V^+ - V^-| dF, \quad N_{\text{ск}} = - \int_{F_K} \tau_{mp} V_{\text{ск}} dF, \quad N_{\text{вал}} = \int_{F_K} \tau_{mp}^* V_{\text{вал}} dF, \quad (2.43)$$

где H – интенсивность скоростей деформации сдвига; V^+ и V^- – проекции скорости течения металла на касательную плоскость к поверхности разрыва скоростей F_{cpj} соответственно с внутренней и внешней сторон этой поверхности; n – число поверхностей разрыва скоростей; τ_{mp}^* – проекция полного напряжения трения на касательную к окружности валка в любой точке контактной поверхности

$$\tau_{mp}^* = \tau_{mp} (v_{\text{ск}}^* / v_{\text{ск}}), \quad (2.44)$$

где $v_{\text{ск}}^*$ – проекция скорости $V_{\text{ск}}$ на касательную к окружности валка.

Каждая составляющая уравнения приводилась к безразмерному виду [219]:

$$N = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 K(b_i - a_i)(d_i - c_i)(f_i - e_i) dq dr ds \quad ; \quad (2.45)$$

$x = (b_i - a_i)q + a_i$, где $0 \leq q \leq 1$ при $a_i \leq x \leq b_i$;

$y = (d_i - c_i)r + c_i$, где $0 \leq r \leq 1$ при $c_i \leq y \leq d_i$;

$z = (f_i - e_i)s + e_i$, где $0 \leq s \leq 1$ при $e_i \leq z \leq f_i$.

Тогда для первой зоны мощность внутренних сил будет равна

$$N_{1BH} = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 K_{1BH} \cdot L_1 \cdot b \cdot \left(h + D - \sqrt{D^2 - 4x^2} \right) dq dr ds \quad , \quad (2.46)$$

$$K_{1BH} = \frac{8\tau_s \cdot V_0 \cdot S}{D \cdot b \left(h + \frac{2x^2}{D} \right)^2} \sqrt{x^2 + \frac{z^2 \left(h - \frac{6x^2}{D} \right)^2}{\left(h + \frac{2x^2}{D} \right)^2}} \quad , \quad (2.47)$$

где $x = L_1 q$; $y = br$; $z = h_d s$; $h_d = h + D - \sqrt{D^2 - 4x^2}$.

В безразмерном виде она запишется следующим образом:

$$N_{1BH} = \frac{8V_0 \cdot \tau_s \cdot h^2 \cdot \tilde{h}_0 \cdot \tilde{l}_1 \cdot \tilde{b}}{A} \cdot \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \frac{g_1 \cdot \sqrt{\tilde{l}_1^2 \cdot q^2 + \frac{\{g_1 s\}^2 \left[1 - \frac{6[\tilde{l}_1 \cdot q]^2}{A} \right]^2}{g_2}}}{g_2} dq dr ds \quad , \quad (2.48)$$

где $g_1 = 1 + A - \sqrt{A^2 - 4\tilde{l}_1^2 \cdot q^2}$; $g_2 = \left(1 + \frac{2[\tilde{l}_1 \cdot q]^2}{A} \right)^2$; $\tilde{l}_1 = \frac{L_1}{h}$; $\tilde{b} = \frac{b}{h}$; $\tilde{h}_0 = \frac{h_0}{h}$.

Для второй и третьей зоны имеем

$$N_{2BH} = \frac{8V_0 \cdot \tau_s \cdot h^2 \cdot \tilde{h}_0 \cdot k \cdot \tilde{l}_2 \cdot \tilde{b}}{A} \cdot \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \frac{g_3 \cdot \sqrt{k^2 \cdot \tilde{l}_1^2 \cdot q^2 + \frac{\{g_3 s\}^2 \left[1 - \frac{6[k^2 \cdot \tilde{l}_2^2 \cdot q^2]}{A} \right]^2}{g_4}}}{g_4} dq dr ds \quad , \quad (2.49)$$

где $g_3 = 1 + A - \sqrt{A^2 - 4k^2 \cdot \tilde{l}_2^2 \cdot q^2}$; $g_4 = \left(1 + \frac{2k^2 \tilde{l}_2^2 q^2}{A} \right)^2$, $\tilde{l}_2 = \frac{L_2}{h}$, $\tilde{l}_k = \frac{L_k}{h}$.

$$N_{3BH} = 2\tau_s \cdot V_0 \cdot h^2 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}_0 \cdot \tilde{l}_2 \cdot (1-k) \sqrt{g_5^4 + 5,33g_5^2 + 4} \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \frac{s \left[\tilde{R}_3 - q(\tilde{R}_3 - 0,5\tilde{h}_1) \right]^2}{\left\{ g_5 \tilde{l}_2 [1 - q(1-k)] + 0,5\tilde{h}_1 \right\}^3} dq ds dr \quad , \quad (2.50)$$

$$\text{где } \tilde{R}_9 = \sqrt{\frac{\tilde{b} \left(1 + A - \sqrt{A^2 - 4k^2 \tilde{l}_2^2} \right)}{\pi}}; \quad x = L_2(1-k)q; \quad g_5 = \left(\frac{R_9 - 0,5d_1}{(1-k)L_2} \right); \quad \tilde{h}_1 = \frac{d_1}{h}.$$

Мощности сил среза на границе третьей зоны [211]:

$$N_{1CP} = \frac{4\tau_s \cdot V_0 \cdot h^2 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}_0 \cdot \tilde{l}_0 \cdot (\tilde{h}_0 - 1)}{A \left(1 + \frac{2\tilde{l}_2^2}{A} \right)^2} \int_0^1 \int_0^1 [(\tilde{h}_0 + 1)s - 1] dr ds \quad (2.51)$$

$$N_{3CP} = \tau_s V_0 \cdot h^2 \cdot \tilde{h}_0 \cdot \tilde{b} \cdot \frac{(\tilde{R}_9 - 0,5\tilde{h}_1)}{\tilde{l}_2(1-k)} \int_0^1 \int_0^1 \frac{dq ds}{(\tilde{R}_9 - 0,5\tilde{h}_1)q + 0,5\tilde{h}_1} \quad (2.52)$$

Мощность трения на поверхности валков для первой зоны запишется в виде

$$N_{1CK} = \tau_{тр} V_{БАЛ} h^2 \tilde{b} A \cdot \arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_l}{A}\right) \int_0^1 \int_0^1 \cdot \left| v \cdot \tilde{h}_0 \sqrt{\frac{1}{g_6^2} + \frac{16q^2 \left(\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_l}{A}\right) \right)^2 g_7^2}{g_6^4}} - 1 \right| dq dr \quad (2.53)$$

$$\text{где } g_6 = 1 + 2q^2 A \left(\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_l}{A}\right) \right)^2; \quad g_7 = \left[1 + A - \sqrt{A^2 - 4 \left[qA \left(\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_l}{A}\right) \right) \right]^2} \right].$$

Для второй зоны будем иметь

$$N_{2CK} = \tau_{тр} V_{БАЛ} h^2 \tilde{b} A \cdot \arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_k}{A}\right) \int_0^1 \int_0^1 \cdot \left| v \cdot \tilde{h}_0 \sqrt{\frac{1}{g_6^2} + \frac{16q^2 \left(\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_k}{A}\right) \right)^2 g_7^2}{g_6^4}} - 1 \right| dq dr \quad (2.54)$$

Развиваемая мощность трения на боковых стенках калибра д [211]:

$$N_{1CK \text{ боk}} = 2\tau V_{БАЛ} \cdot h^2 \cdot \tilde{l}_l g_1 \int_0^1 \int_0^1 \left| v \tilde{h}_0 \sqrt{\frac{1}{g_2} + \frac{[4\tilde{l}_l q s g_1]^2}{A^2 g_2^2}} - 1 \right| dq ds \quad (2.55)$$

$$N_{2CK \text{ боk}} = 2\tau V_{БАЛ} \cdot h^2 \cdot \tilde{l}_k g_1 \int_0^1 \int_0^1 \left| v \tilde{h}_0 \sqrt{\frac{1}{g_2} + \frac{[4\tilde{l}_k q s g_1]^2}{A^2 g_2^2}} - 1 \right| dq ds \quad (2.56)$$

Мощность сил трения, действующих на поверхности матричной воронки, выразим следующим образом:

$$N_{3CK} = 2\tau_{mp} V_0 h^2 \tilde{h}_0 \tilde{b} (\tilde{R}_3 - 0,5\tilde{h}_1) \int_0^1 \int_0^1 \frac{\sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{g_8}{\tilde{l}_2(1-k)} \right)^2}}{(\tilde{R}_3 - 0,5\tilde{h}_1)s + 0,5\tilde{h}_1} dr ds, \quad (2.57)$$

$$\text{где } g_8 = \sqrt{\frac{\tilde{b}(1 + A - \sqrt{A^2 - 4\tilde{l}_k^2})}{\pi}} - 0,5\tilde{h}_1.$$

Мощность сил трения в зонах, определяемых углом φ [211]:

$$N_{3CKмз} = \tau_{mp} \cdot V_{БАЛ} \cdot \tilde{b} \cdot A \cdot h^2 \cdot \left[\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_2}{A}\right) - \arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_k}{A}\right) \right], \quad (2.58)$$

Мощность трения на боковых стенках калибра в третьей зоне:

$$N_{3CKбок} = 2\tau_{TP} \cdot V_{БАЛ} (\tilde{l}_2 - \tilde{l}_k) \cdot h^2 \int_0^1 \left(1 + A - \sqrt{A^2 - 4((\tilde{l}_2 - \tilde{l}_k)s + \tilde{l}_k)^2} \right) ds. \quad (2.59)$$

Мощность трения на калибрующем пояске:

$$N_{4CK} = 4\tilde{l}_3 \cdot h^2 \cdot V_0 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}_1 \cdot \tau_{TP} / \tilde{h}_1, \quad (2.60)$$

где $\tilde{l}_3 = \frac{l_n}{h}$ – безразмерная величина калибрующего пояска матрицы.

Подводимая валками мощность:

$$N_{БАЛ} = \tau_{TP} \cdot V_{БАЛ} \cdot h^2 \cdot A \cdot n_{БАЛ}, \quad (2.61)$$

Коэффициент мощности после преобразований:

$$n_{вал} = (\tilde{b} - 0,5A) \left[\arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_1}{A}\right) + \arcsin\left(\frac{2\tilde{l}_2}{A}\right) \right] + \frac{1}{A} (\tilde{h}_0 \cdot \tilde{l}_0 + \tilde{h}_p \cdot \tilde{l}_2 + (A+1)(\tilde{l}_1 + \tilde{l}_2)). \quad (2.62)$$

Решение задачи в программном пакете MathCAD с использованием метода градиентного спуска и разработанного алгоритма (рис. 2.20) [18] для поиска варьируемых параметров k и ν позволило получить массив данных при различных сочетаниях безразмерных параметров, графическое представление которых приведено на рис. 2.21-2.23 [211].

Аналогичные действия провели для определения силы и крутящего момента прокатки, который, зная величину $n_{вал}$, можно определить по формуле [219]

$$M_{вал} = 0,574 \cdot \sigma_s \cdot h^3 \cdot A^2 \cdot n_{вал}. \quad (2.63)$$

Для расчета среднего по очагу деформации коэффициента напряженного состояния использовали следующую формулу [1, 18] ($n_{\sigma 1}$, $n_{\sigma 2}$ – коэффициенты напряженного состояния соответственно для верхнего и нижнего валков):

$$n_{\sigma} = \frac{n_{\sigma 1} \cdot F_1 + n_{\sigma 2} \cdot F_2}{F_1 + F_2}, \quad (2.64)$$

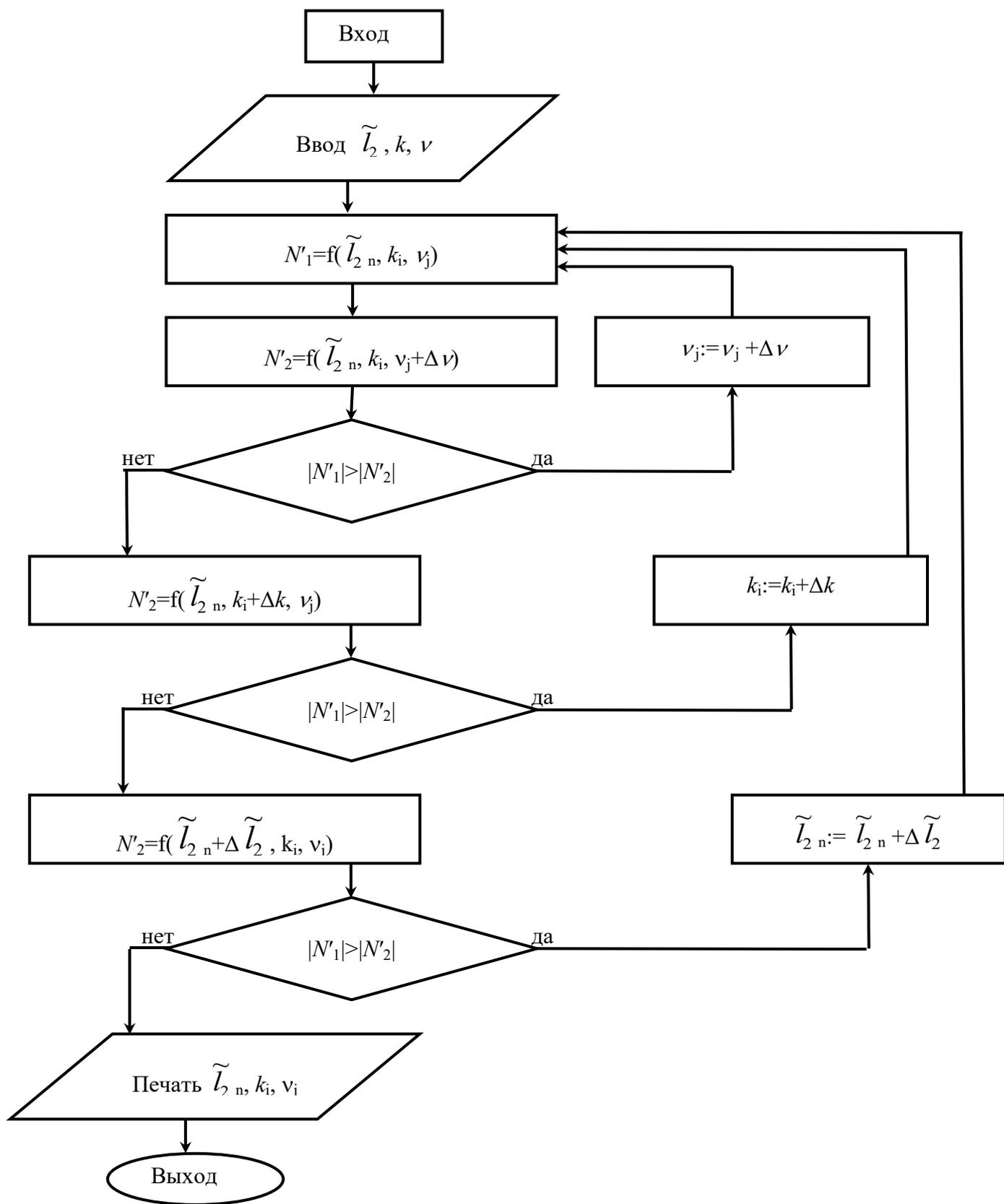


Рисунок 2.20 – Алгоритм решения вариационной задачи методом градиентного спуска

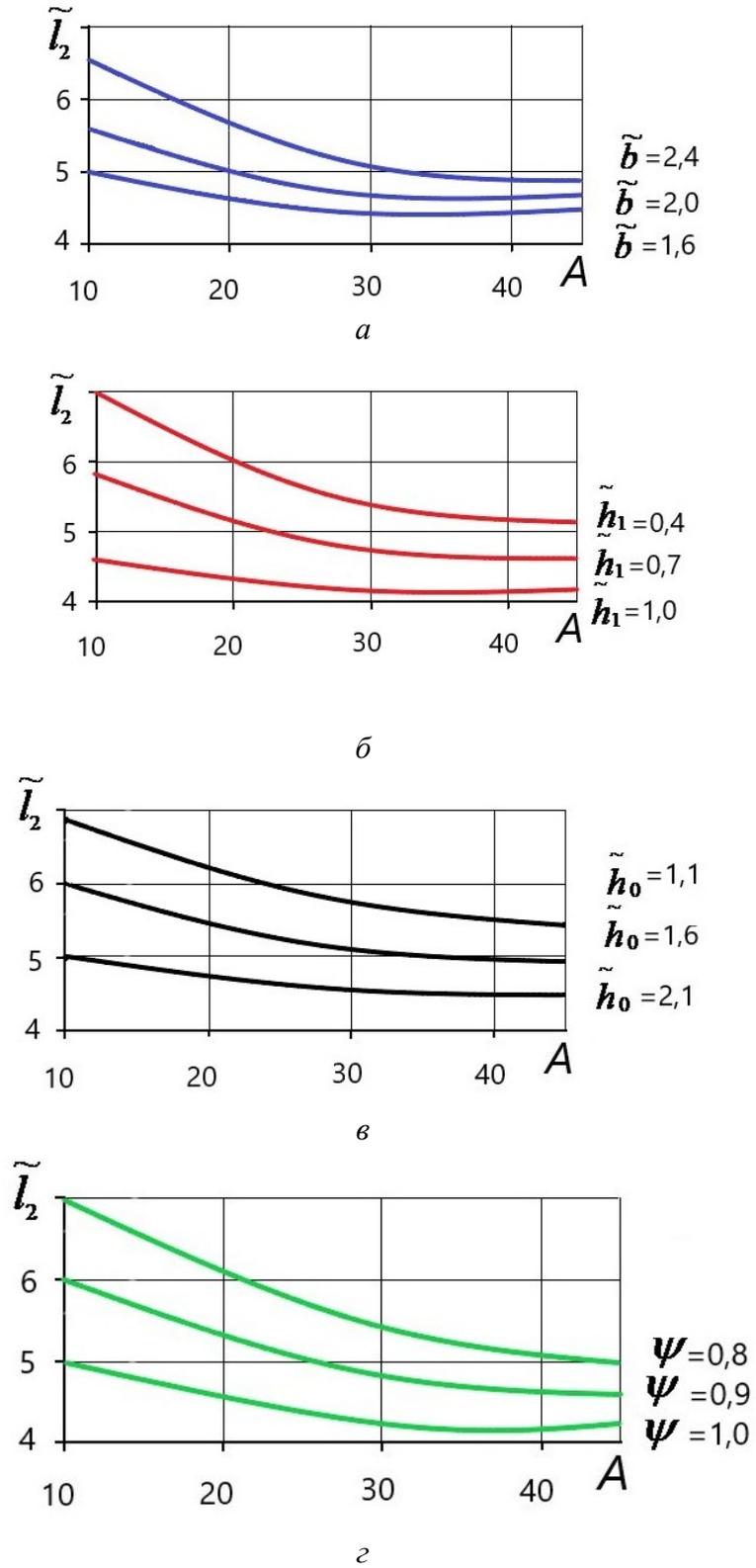


Рисунок 2.21 – Графики изменения величины \tilde{l}_2 от безразмерных параметров очага деформации

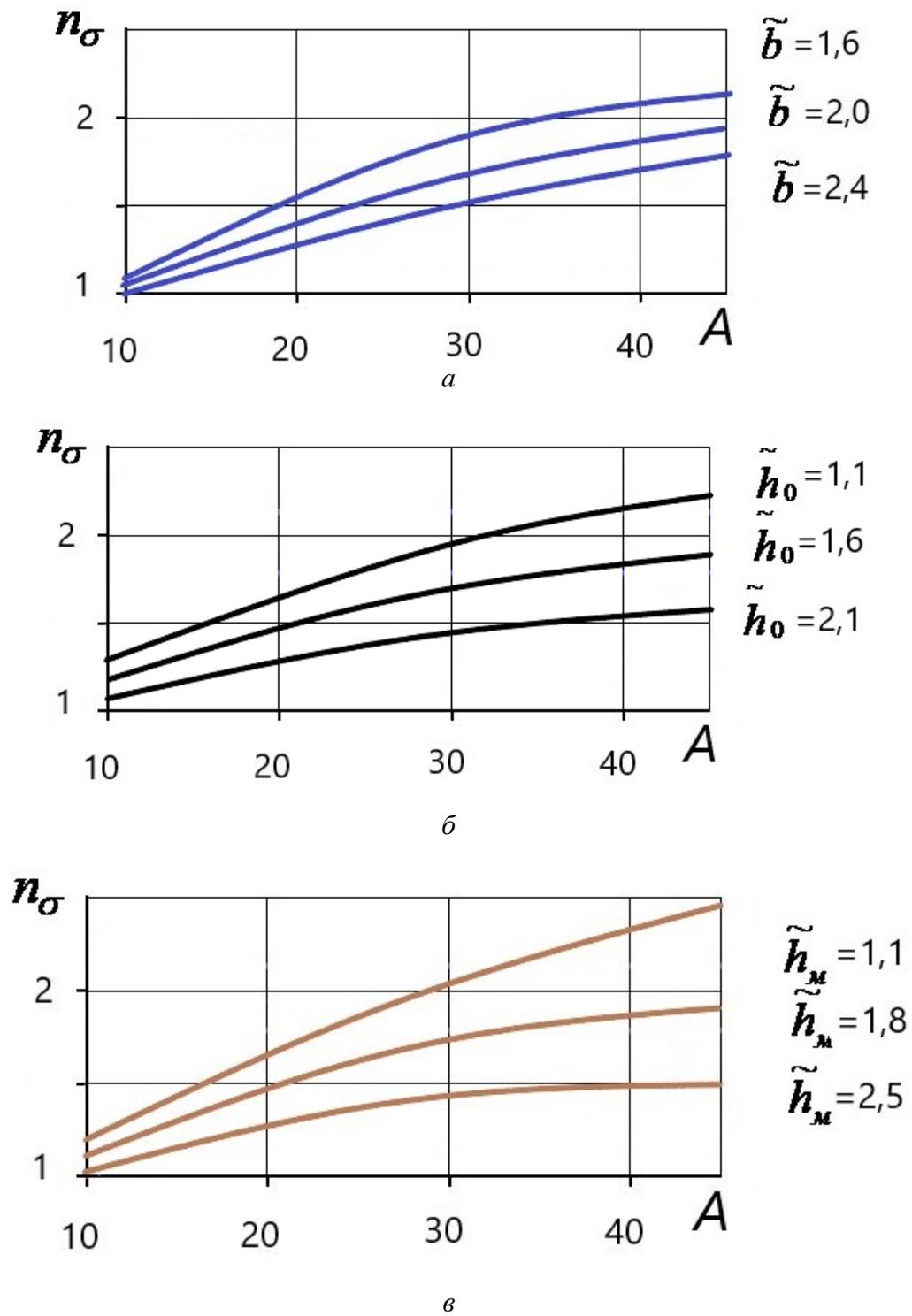


Рисунок 2.22 – Графики изменения величины n_σ от безразмерных параметров очага деформации

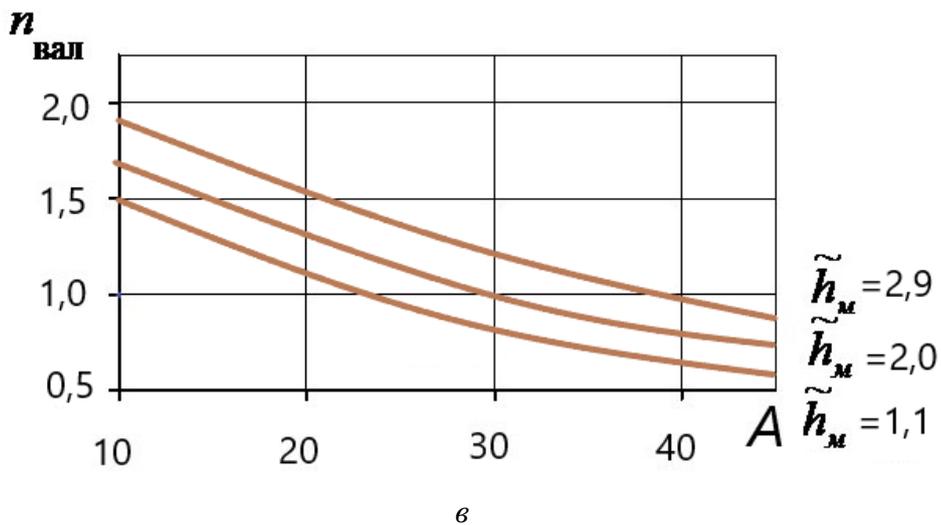
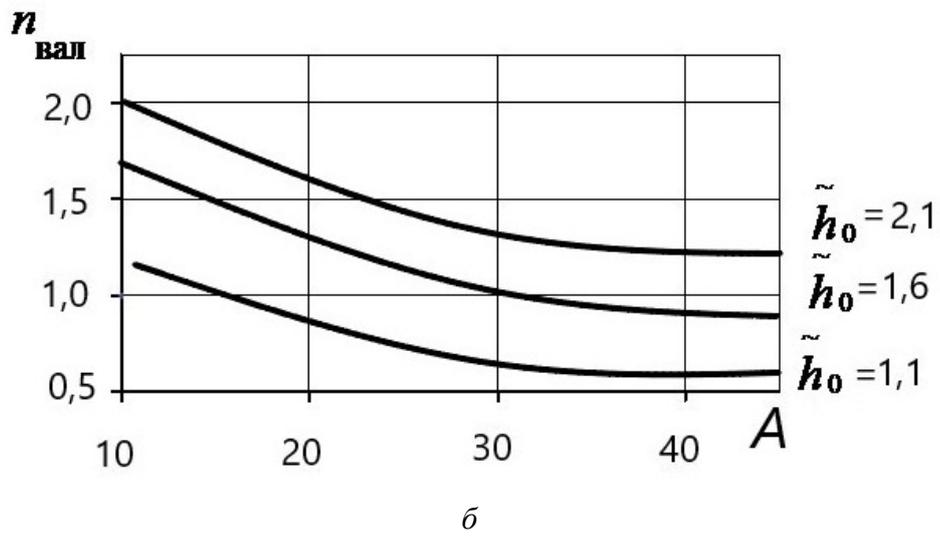
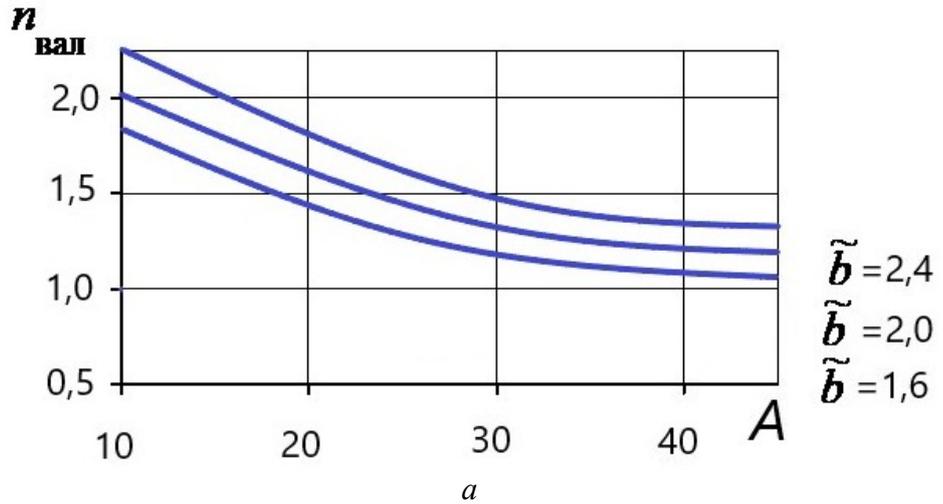


Рисунок 2.23. Графики изменения величины $n_{\text{вал}}$ от безразмерных параметров очага деформации

Контактное давление при прокатке рассчитывают по формуле [217]

$$p = 1,15 \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s . \quad (2.65)$$

Тогда силу прокатки можно определить по выражению

$$P_{\text{пр}} = p \cdot F , \quad (2.66)$$

где F – площадь контакта металла с валками.

Анализируя рис. 2.21-2.23, можно сделать выводы о влиянии безразмерных параметров на величины, определяющие размеры очага деформации и энергосиловые параметры процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах [18]:

- с увеличением приведенного диаметра валков A величина \tilde{l}_2 уменьшается во всем диапазоне изменения безразмерных параметров, при этом за счет увеличения контакта металла с валками и активных сил трения интенсивно растет подводимая валками мощность, необходимая для экструдирования металла;
- увеличение приведенной ширины калибра \tilde{b} ведет к росту величины \tilde{l}_2 , так как при этом значительно повышается объем деформируемого металла и, соответственно, затраты мощности внутренних сил;
- рост приведенного диаметра заготовки \tilde{h}_0 при средних значениях безразмерных параметров процесса ведет к снижению величины \tilde{l}_2 за счет увеличения обжатия при прокатке и подведенной валками мощности;
- увеличение приведенного диаметра пресс-изделия \tilde{h}_1 , приводит к необходимости снижения \tilde{l}_2 , так как вытяжка при прессовании при этом снижается;
- влияние показателя трения на контакте металла с инструментом соответствует общепринятым представлениям, то есть чем ψ больше, тем больше активные силы трения и величина \tilde{l}_2 становится меньше;
- на безразмерный коэффициент напряженного состояния n_{σ} оказывают существенное влияние такие параметры, как приведенный диаметр валков, приведенный диаметр исходной заготовки, высота матрицы и, также, приведенная ширина калибра. Увеличение приведенного диаметра приводит к росту рассматриваемого коэффициента, что влечет за собой повышение силы прокатки. В то же время, увеличение прочих безразмерных параметров вызывает его снижение.
- на коэффициент мощности η влияют: приведенный диаметр валков, при росте которого наблюдается снижение η ; приведенная ширина калибра; приведенный диаметр заготовки;

приведенный диаметр готового изделия. Увеличение последних трех параметров провоцирует увеличение пвал, что, соответственно, приводит к росту крутящего момента, возникающего в процессе прокатки.

Такой вид зависимостей полностью согласуется с результатами предыдущих теоретических изысканий процесса прокатки-прессования квадратных заготовок в коробочных калибрах, что подтверждается данными экспериментов [213].

На основании математического моделирования предлагаются следующие рекомендации:

- безразмерные параметры заготовки и калибров необходимо подбирать с целью увеличения обжатия при прокатке (не менее 50%), поскольку только при этом удаётся уменьшить расстояние между плоскостью матрицы и общей осью валков.
- вытяжку при прессовании необходимо, по возможности, минимизировать, так как ее рост, а значит увеличение приведенного диаметра пресс-изделия, может привести к остановке процесса прокатки-прессования из-за увеличения необходимой мощности для продавливания металла через калибрующее отверстие матрицы.
- при небольших значениях катающего диаметра валков матрицу необходимо максимально удалять от плоскости, проходящей общую ось валков.
- следует учитывать влияние приведенного диаметра валков на энергосиловые параметры процесса, так как его увеличение ведет к уменьшению коэффициента мощности и росту коэффициента напряженного состояния, что может привести к превышению значений этих параметров над допустимыми величинами силы и момента прокатки.
- при выборе параметров при прокатке-прессовании необходимо обеспечить на контакте металла с валками условия максимального трения, так как при этом достигаются необходимые силы активного трения, позволяющие гарантированно осуществить деформацию металла без остановки процесса и обеспечить минимальные энергозатраты на ее реализацию.

На основании решения вариационной проблемы и последующего компьютерного моделирования, были установлены ключевые принципы деформации металла при комбинированном процессе прокатки и прессования круглой заготовки в замкнутых калибрах ящичного типа. Получены аналитические выражения для определения оптимального смещения матрицы относительно центральной оси валков, параметров напряженного состояния, а также потребляемой мощности при условии минимизации энергозатрат на деформацию [18].

В частности, разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать распределение напряжений и деформаций в материале, что необходимо для оптимизации технологических параметров процесса. Установлено, что смещение матрицы оказывает существенное влияние на величину деформирующего усилия и однородность деформации.

Предложенные формулы для расчета мощности позволяют оценить энергоэффективность процесса и выбрать оптимальные режимы прокатки-прессования.

2.4. Выводы по главе

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика расчета коэффициента реализуемости процесса СПП с одним и двумя приводными валками для сплава 01417 при различных степенях относительной деформации при прокатке и коэффициентах вытяжки при прессовании.

2. Установлены закономерности изменения температуры металла и инструмента при прокатке-прессовании сплава 01417, определены объемные и поверхностные источники тепла и изменение температуры деформируемого металла и температуры валков на контакте при прохождении каждой зоны очага деформации без учета и с учетом охлаждения инструмента.

3. Разработаны теоретические основы процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки прямоугольного поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах при использовании одного приводного валка, позволяющего значительно снизить энергосиловые затраты на деформацию металла, включающие методику определения реализуемости процесса СПП, оценку формоизменения металла, температурно-скоростных и энергосиловых параметров с применением полученных расчетных формул и результатов компьютерного моделирования.

4. В работе предложена математическая модель для анализа процесса совмещенной прокатки-прессования круглых заготовок в закрытых калибрах ящичного типа, основанная на применении вариационных методов. Разработанная модель позволяет вычислять геометрические характеристики и энергосиловые параметры процесса. Модель интегрируется с технологиями непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор для производства заготовок и последующего волочения проволоки электротехнического назначения.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АІ-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов системы АІ-РЗМ. Особенностью данного раздела работы является то, что для получения литой заготовки использовался электромагнитный кристаллизатор, и дальнейшая обработка такой заготовки круглого поперечного сечения проводилась на установке СПП при прокатке-прессовании в закрытом ящичном калибре. Теоретические основы такого процесса были разработаны ранее и приведены в главе 2. Материалы главы опубликованы в работах [1, 209, 211-213, 221-230].

3.1. Исследование реологических свойств, оборудование и методика проведения экспериментальных исследований

Исследования проводили для алюминиевого сплава 01417 (см. раздел 1.2.1), содержащего согласно ТУ 1-809-1038-2018 в своем составе 7-9% РЗМ [9]. Химический состав сплава 01417 представлен в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав сплава 01417

Содержание элемента, масс. %							
Al	Ce	La	Pr	Nd	Сумма (Ce+La+РЗМ)	Fe	Si
Основа	4,58	0,22	0,1	<0,1	7-9	0,22	0.10

Данные по реологическим свойствам исследуемых сплавов (рис. 3.1) были получены методом кручения в лаборатории кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов Сибирского федерального университета [209] на установке СПП-200 (рис. 3.2) [18].

Результаты испытаний вносили в базу данных комплекса DEFORM 3D. Это позволило получить данные по свойствам исследуемых сплавов в широком диапазоне для последующего компьютерного моделирования.

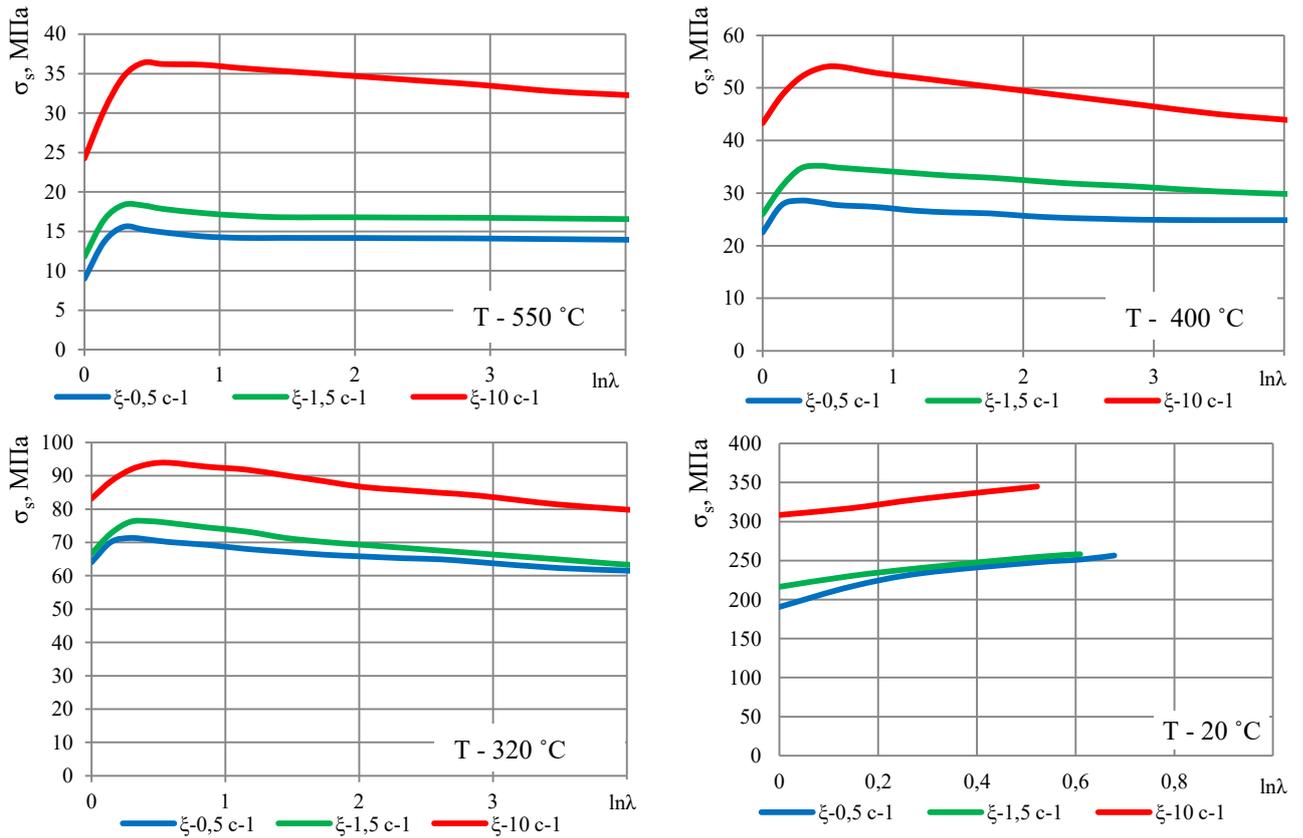


Рисунок 3.1 – Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава 01417 от логарифмической вытяжки ($\ln\lambda$) при различной температуре T и скорости деформации ξ

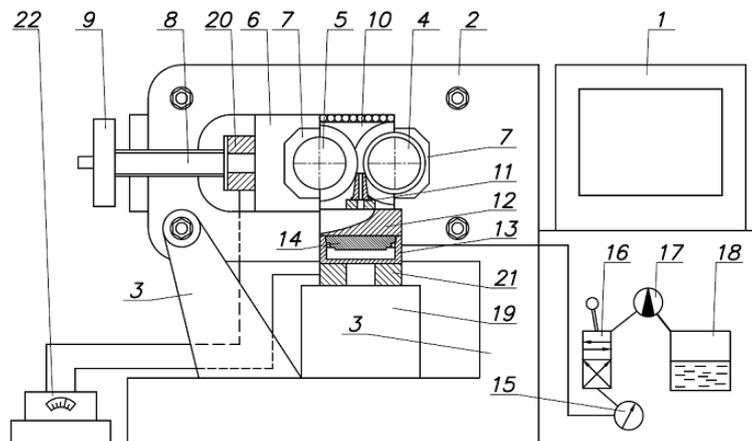


Рисунок 3.2 – Схема установки совмещенной обработки СПП-200:

1 – печь; 2 – станина; 3 – стальные опоры; 4 – валок с выступом; 5 – валок с кольцевой канавкой; 6 – подушки; 7 – подшипники скольжения; 8 – нажимные винты; 9 – штурвал-шестерня; 10 – направляющее устройство; 11 – матрица; 12 – подставка; 13 – гидравлический цилиндр; 14 – плунжер; 15 – насос; 16 – гидрораспределитель; 17 – манометр; 18 – бак; 19 – опора; 20, 21 – месдозы; 22 – тензостанция

Оси, на которых установлены валки, размещены в бронзовых подшипниках скольжения (см. рисунок 3.3, а).

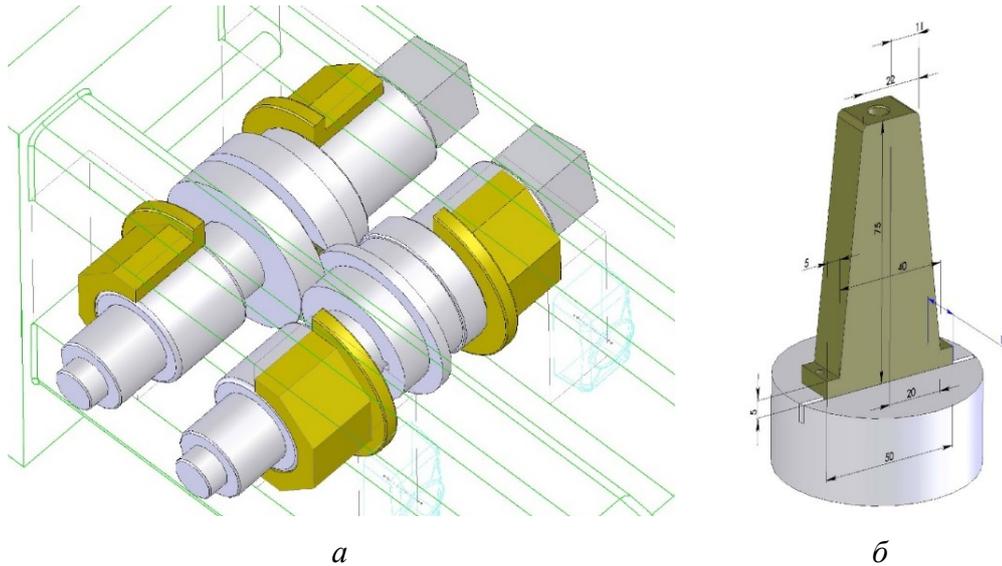


Рисунок 3.3 – Общий вид валкового (а) и матричного (б) узлов установки СПП-200

Компоновка матричного узла исследовательской платформы включает в себя матрицу, элемент крепления матрицы (см. рис. 3.3, б) и систему фиксации.

Конструкция матричного узла обеспечивает надежное удержание матрицы в заданном положении относительно других компонентов экспериментальной установки. Матрицедержатель, как правило, изготавливается из материалов, обладающих высокой механической прочностью и термической стабильностью, таких как нержавеющая сталь или алюминиевые сплавы.

Спроектированная установка имеет технические характеристики (см. табл. 2.1), которые обеспечили проведение ряда экспериментов по изучению влияния температурно-скоростных и деформационных параметров на силовые условия процесса.

Методика проведения экспериментальных исследований включала следующие технологические переделы:

- литье сплавов в электромагнитный кристаллизатор и получение заготовок диаметром 12 мм [100, 102];
- совмещенная прокатка-прессование прутков диаметром 5 мм из полученной заготовки;
- сортовая прокатка и волочение, либо только волочение проволоки до диаметра 0,5 мм.
- отжиг проволоки диаметром 0,5 мм по 4 режимам: 350, 400, 450, 500 °С при выдержке 1 ч (режим ТО 1, 2, 3 и 4 соответственно).

Принципиальная схема установки представлена на рис. 3.4.

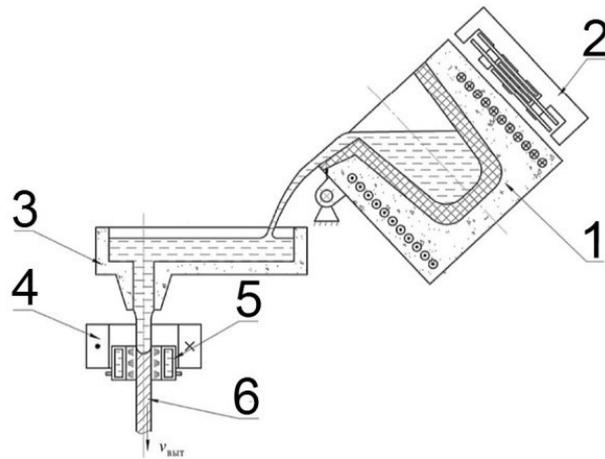


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема литья в ЭМК: 1 – печь; 2 – МГД-перемешиватель; 3 – дозирующий лоток с носиком; 4 – индуктор ЭМК; 5 – ороситель; 6 – непрерывно отливаемая заготовка

Формование слитков, имеющих диаметр 12 мм, выполнялось в электромагнитном кристаллизаторе. Температурный режим расплава, направляемого в кристаллизатор, контролировался двумя термопарами. Эти термопары были установлены в дозирующем устройстве и погружались непосредственно в расплавленный металл. Очистка расплава от неметаллических примесей не осуществлялась.

В плавильной печи 1 осуществляется плавление чушки, однородность расплава по химическому составу и температуре обеспечивается путем использования МГД-перемешивателя 2. Расплав из плавильной печи 1 поступает в дозирующий лоток 3, где поддерживается заданная температура и уровень расплава. Через носик лотка расплав поступает в электромагнитный кристаллизатор 4, в котором бесконтактно электромагнитным полем формируется геометрия слитка. Охлаждающая жидкость из оросителя 5 подается на границу раздела жидкой и твердой фазы, что обеспечивает отвод тепла, процесс кристаллизации и формирование слитка 6. Слиток 6 с помощью вытяжного механизма непрерывно отводится из зоны кристаллизации, обеспечивая непрерывность процесса литья, и сматывается в бухту.

Сортовую прокатку проводили на прокатном стане AF 200+180R (рис. 3.5, а), а волочение на цепном стане. Технические характеристики этого оборудования представлены в табл. 3.2.

В экспериментальных исследованиях на установке СПП-200 измерение силовых характеристик осуществлялось с использованием тензометрического оборудования. Данный комплекс включал в себя датчики силы моделей CWW-50 и CWW-100, рассчитанные на предельную нагрузку сжатия в 500 кН и 1 МН соответственно (согласно спецификациям производителя).

Таблица 3.2 – Технические характеристики оборудования

Характеристики	Значения характеристик	
	Сортовой стан AF 200+180R	Цепной волочильный стан
Длина бочки валков, мм	200+180	-
Диаметр валков, мм	130	-
Скорость, м/мин	12,5-26	10,2
Допустимая сила, кН	640	50
Максимальный момент прокатки, кНм	13,6	-
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	7,5	25

Для регистрации и обработки сигналов от тензодатчиков применялась тензометрическая станция ZET 017-T8 производства компании ZetLab.

Определение механических свойств проводили на машинах Walter+Bai AG LFM 400 kN (рис. 3.5, б) для литых заготовок и прессованных прутков, и LFM 20 kN усилием 20 кН (для проволоки). Техническая характеристика машины LFM 400 kN приведена в табл. 3.3.



а



б

Рисунок 3.5 – Общий вид сортопрокатного стана AF 200+180R (а) и универсальной машины LFM 400 kN (б)

Таблица 3.3 – Характеристики универсальной разрывной машины LFM 400 kN

Характеристика	Значение
Максимальное стат. усилие, кН	400
Максимальная скорость, мм/мин	500
Ход траверсы, мм	1000
Максимальное расстояние между захватами, мм	800

Металлографический анализ микроструктуры проводился с применением оптических микроскопов Olympus GX51 и Axio Observer.A1m, а также сканирующего электронного микроскопа EVO 50, дополненного энергодисперсионным спектрометром Inca Energy 350 для анализа элементов. Измерение удельного электрического сопротивления (ρ) осуществлялось на образцах стандартизированной длины в 1 метр с использованием омметра «Виток».

3.2. Моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования

Подготовка 3D-моделей инструментальной оснастки для моделирования процесса СПП осуществлялась с применением системы SolidWorks для установки СПП-200 (см. табл. 2.1). На первом этапе были построены эскизы поперечного сечения валкового инструмента (рис. 3.6). Дальнейшее формирование 3D-моделей было осуществлено путем поворота эскиза вокруг оси вращения вала. Моделирование матрицы (рис. 3.7) осуществлялось путем создания замкнутых эскизов и вытягивания их в направлении перпендикулярном плоскости эскиза. На следующем этапе в комплексе SolidWorks была проведена сборка элементов инструментальной оснастки и заготовки. При этом центральными элементами являлись заготовка и матрица, которые были строго ориентированы вдоль одной из основных осей пространства. На рис. 3.6, *а* представлена модель деформирующего узла установки СПП-200.

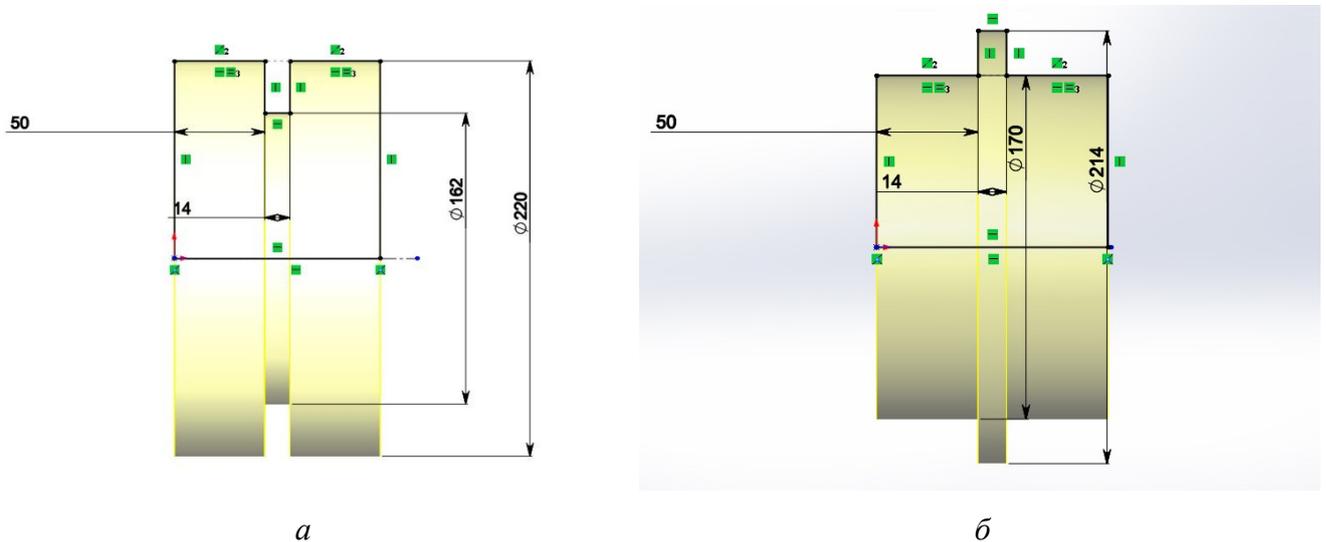


Рисунок 3.6 – Модели валков установки СПП-200: *а* – с канавкой; *б* – с выступом

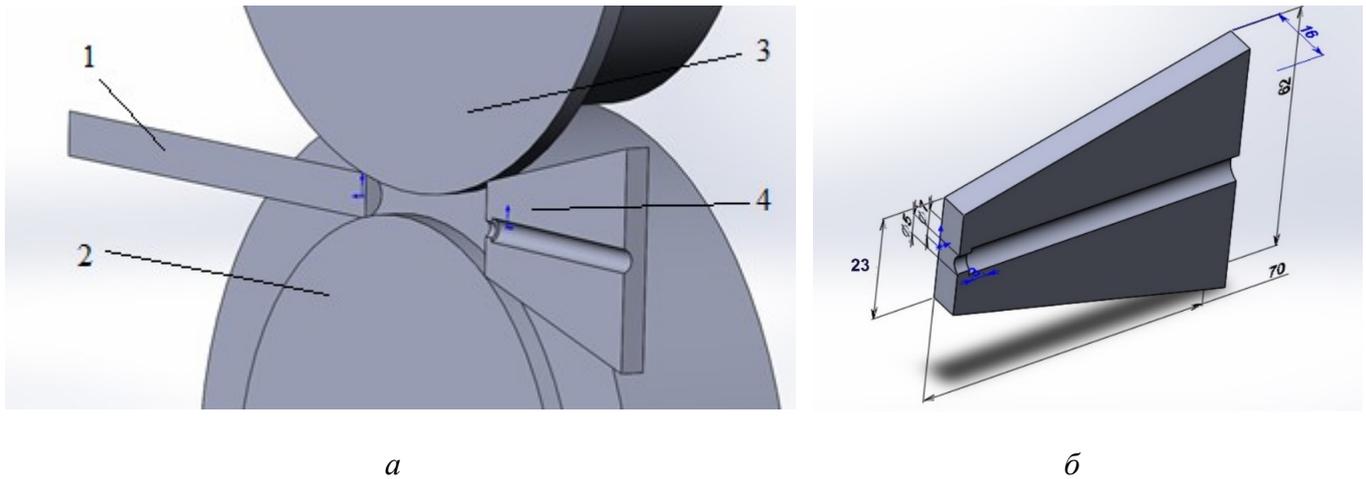


Рисунок 3.7 – Модели деформирующего узла установки СПП-200 (а) и матрицы (б):

1 – заготовка; 2 – валок с канавкой; 3 – валок с выступом; 4 – матрица

В качестве параметров для моделирования процесса совмещенной прокатки прессования прутков из заготовки круглого поперечного сечения приняты следующие. Диаметр заготовки составляет 12 мм. Частота вращения валков равна 4 и 8 об/мин. Температура заготовки достигает 550 °С, в то время как температура инструмента составляет 200 °С. Степень деформации при прокатке составляет 50 %. Диаметр калибрующего отверстия матрицы равен 5 мм, а длина рабочего пояска матрицы – 3 мм.

Моделирование процесса проводилось со следующими условиями и допущениями: Количество конечных элементов, на которые разбита заготовка, составляет 20 000 штук. Показатель трения по Зибелю для валков и калибрующего пояска матрицы равен $\psi_{\text{в}} = 0,9$. Материал валков и матрицы относится к жесткопластическим. Охлаждение валков не предусмотрено. Заготовка выполнена из изотропного материала, а показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы составляет $\psi_{\text{м}} = 0,3$.

Результаты моделирования формоизменения металла и распределения температуры при разной частоте вращения валков представлены на рис. 3.8-3.9.

Деформация круглой заготовки в процессе прокатки характеризуется отличиями по сравнению с заготовками квадратного сечения (см. рис. 3.8). На первом шаге, отображенном на рис. 3.8, а, заготовка захватывается валками, при этом контакт не является полным. Далее происходит обжатие: нижняя часть обрабатывается канавкой на валке, а верхняя - выступом. Дойдя до матрицы, заготовка прессуется, заполняя калибр (рис. 3.8, б), и затем экструдирована, принимая форму прутка (рис. 3.8, в).

Коэффициент обжатия по высоте, используемый в данном технологическом процессе, достигает 44%. Стоит отметить проскальзывание валков, а также постепенное остывание заготовки в зоне деформации. Это может привести к остановке процесса, поскольку усилие,

необходимое для обработки, уменьшается. Причина - снижение площади соприкосновения заготовки и валков в угловых частях калибра (рис. 3.8, г), что снижает эффективность передачи деформирующего усилия. Процесс необходимо контролировать для предотвращения нежелательных остановок.

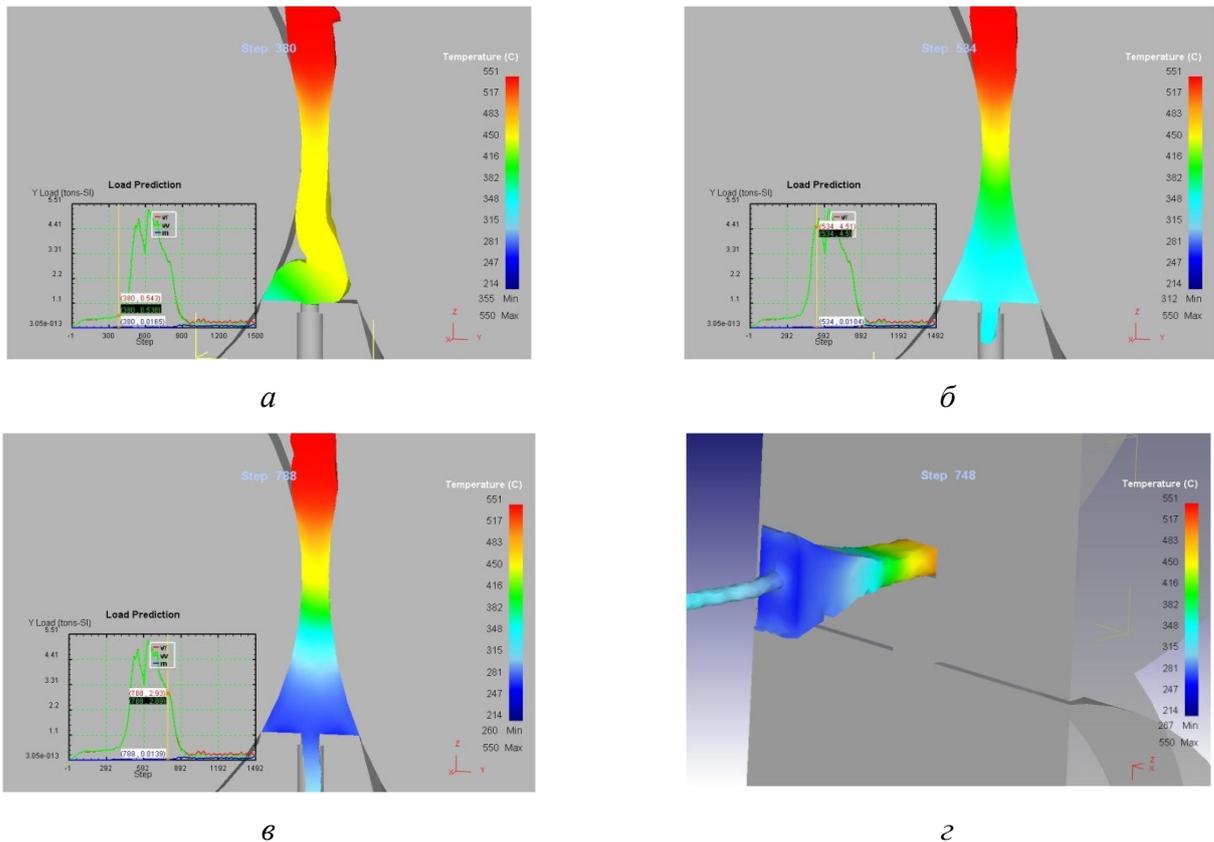


Рисунок 3.8 – Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки из сплава 01417 при частоте вращения валков $\omega = 4$ об/мин: *а* – стадия прокатки; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования; *г* – на установившейся стадии деформации металла

На начальном этапе технологического процесса происходит снижение температуры заготовки с 550 до 450 °С. Во время прессования температура сначала опускается до 330-340 °С, затем падает до 240-280 °С; при скорости вращения валков 4 об/мин это может вызвать остановку процесса. Увеличение скорости вращения до 8 об/мин (см. рис. 3.9) способствует уменьшению тепловых потерь. В плоскости минимального сечения калибра средняя температура заготовки составляет 500 °С (рис. 3.9 а, б), в то время как в зоне прессования, на этапе выдавливания, температура колеблется в диапазоне 410-445 °С (рис. 3.9, в). Затем идет устойчивый режим, при котором температура металла в зоне прессования снижается до 320 °С, а температура готового пресс-изделия повышается до 375 °С (рис. 3.9, г). Выполненные расчёты по формулам (2.10, 2.11) показали, что при одинаковых габаритах

калибра и одинаковой вытяжке в процессе прессования (табл. 3.4) усилие при эксплуатации установки СПП-400 превышает соответствующее значение у установки СПП-200. Такое различие обусловлено большим диаметром валков, что приводит к более длительному контакту валков с обрабатываемым материалом. Выявлено, что при обработке круглой заготовки на установках СПП прижимного усилия недостаточно (см. табл. 2.1) для обеспечения надлежащего поджима матрицы, что делает процесс невозможным при более низких температурах. В связи с этим рекомендуется применять температуру заготовки $T_3=550\text{ }^\circ\text{C}$.

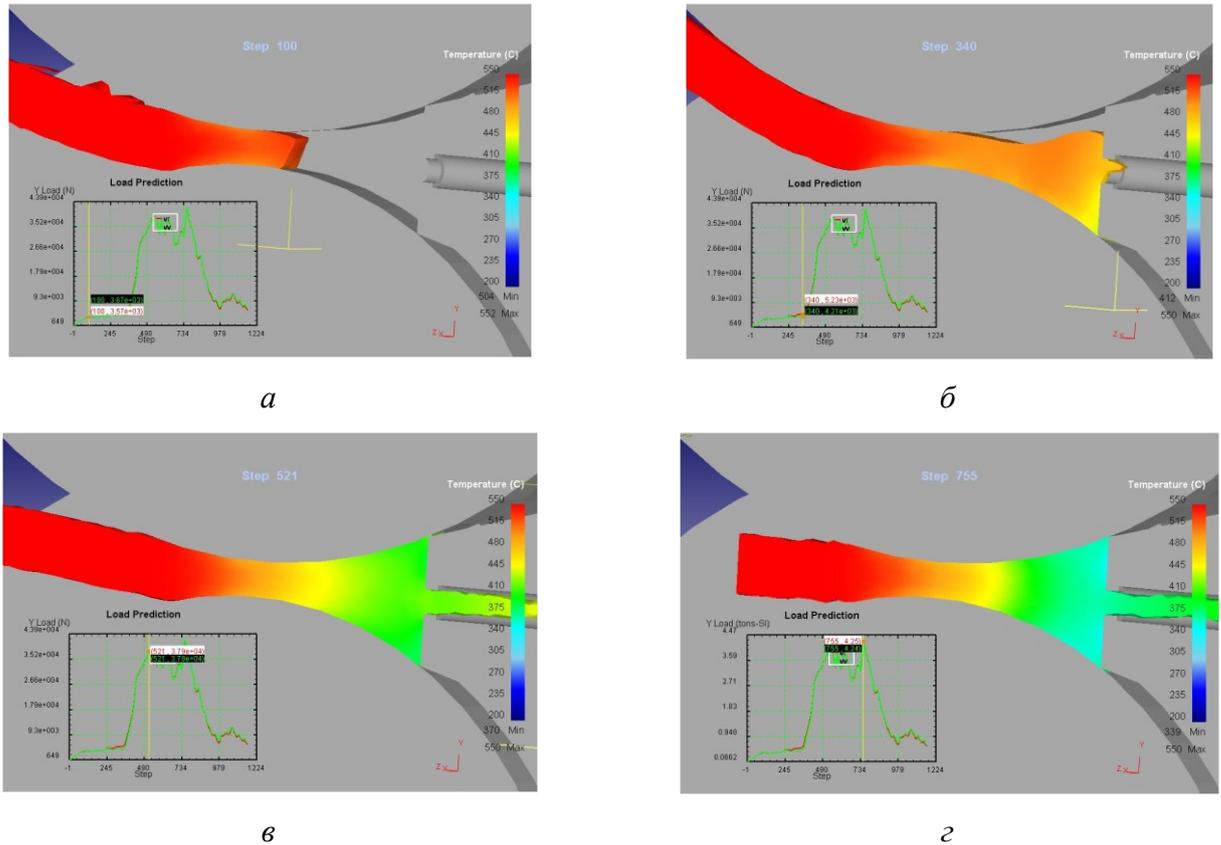


Рисунок 3.9 – Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки из сплава 01417 при частоте вращения валков $\omega = 8$ об/мин: *а* – стадия прокатки; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования; *г* – на установившейся стадии деформации металла

На фигуре 3.10 представлены силовые характеристики технологического процесса для оборудования типа СПП-200 (калибр 7×15 мм) и для производственной среды на оборудовании СПП-400 (калибр 10×21 мм). Согласно исследованиям, для СПП-400 оптимальные параметры, такие как температура заготовки $T_3 = 550\text{ }^\circ\text{C}$ и скорость деформации $\xi = 0,5\text{ c}^{-1}$, гарантируют рациональную силовую нагрузку на производственное оборудование. Подбор данных параметров позволяет обеспечить стабильность процесса и минимизировать риск поломок, связанных с превышением допустимых нагрузок.

Таблица 3.4 – Значения силовых параметров для установок СПП при одинаковых размерах калибра в минимальном сечении 7×15 мм

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

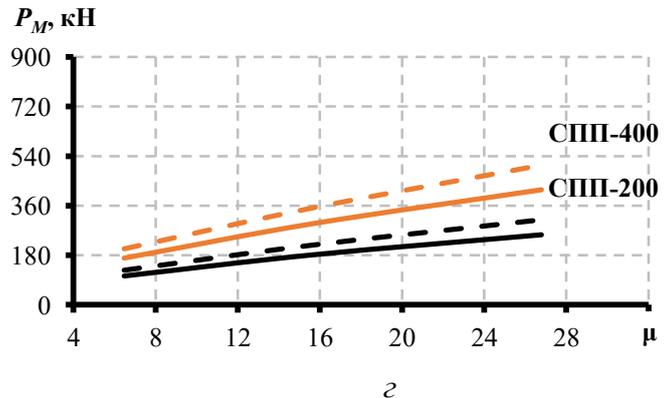
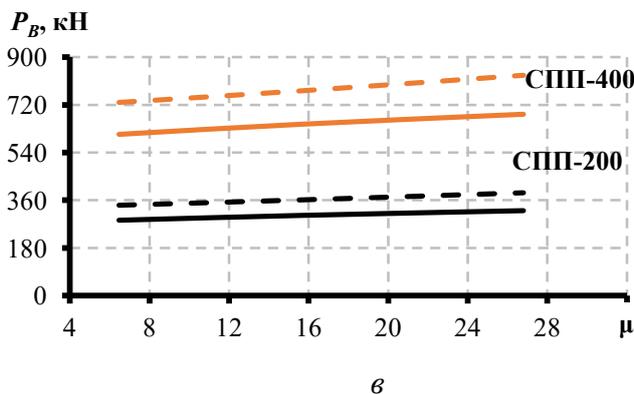
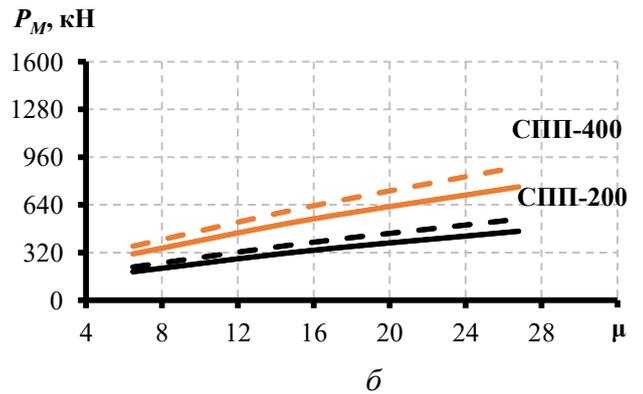
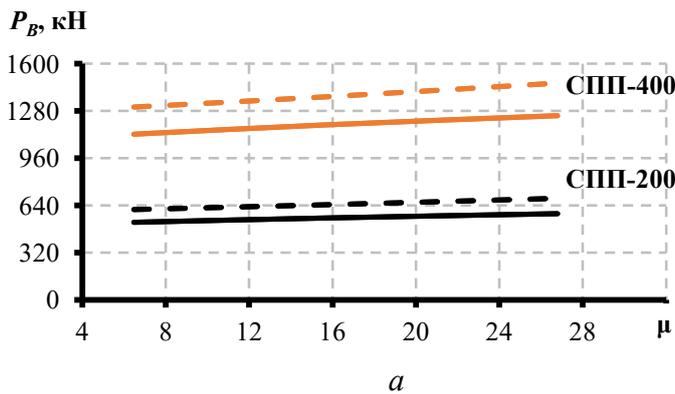


Рисунок 3.10 – Графики изменения силовых параметров процесса СПП для установок СПП-200 и СПП-400 при различных размерах калибров: а, б – $T_3 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$; в, г – $T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$;

———— $\xi = 0,5 \text{ c}^{-1}$; - - - - - $\xi = 1,5 \text{ c}^{-1}$

Для расчета энергосиловых параметров процесса СПП был произведен расчет по формулам, полученным в результате математического моделирования совмещенной прокатки-прессования круглой заготовки из алюминиевого сплава 01417 системы Al-PЗМ в закрытых ящичных калибрах. Определены геометрические и энергосиловые параметры процесса для установок СПП-200 и СПП-400 в сопоставлении с экспериментальными данными такого процесса при получении прутков из этого сплава диаметром 9 мм [215]. Расчетные и экспериментальные значения этих параметров приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные и экспериментальные значения геометрических и энергосиловых параметров процесса СПП

Значения параметров											
расчетные						экспериментальные					
\tilde{l}_2	n_σ	$n_{\text{вал}}$	L_2 , мм	$P_{\text{пр}}$, кН	$M_{\text{вал}}$, кН м	L_2 , мм	δ , %	$P_{\text{пр}}$, кН	δ , %	$M_{\text{вал}}$, кН м	δ , %
СПП-200											
4,7	1,5	1,3	32,9	317	7,5	35,0	6,0	350	9,4	7,0	7,1
СПП-400											
4,9	1,7	1,0	49,0	764	33,5	54,0	9,2	740	3,2	30,6	9,5

Погрешность расчетных данных определяли по выражению

$$\delta = \frac{Z_p - Z_\varepsilon}{Z_\varepsilon} \cdot 100\%,$$

где Z_p и Z_ε – соответственно расчетное и экспериментальное значение параметра.

Анализ данных табл. 3.5 показал, что погрешность расчетов не превышает 10 %, что дает возможность рекомендовать данные математического моделирования для практических расчетов размеров очага деформации и энергосиловых параметров процесса.

3.3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальная проверка разработанной методики для сплава 01417 с последующим производством проволоки диаметром 0,5 мм осуществлялась посредством анализа реологических характеристик и применения методов вычислительного моделирования.

Для исследования применялись параметры, представленные в табл. 3.6 [215]. Последующая термообработка полученных слитков проводилась при температурах 400, 450, 500 и 550 °С с выдержкой 2, 4 и 8 часов. Относительное удлинение остаётся в диапазоне 12,4–

15,5 % при увеличении скорости литья. Повышение температуры отжига до 550 °С и продление времени выдержки до 8 часов способствует росту относительного удлинения до 38 % при одновременном снижении временного сопротивления до 126 МПа по сравнению с исходным литым состоянием.

Таблица 3.6 – Физико-механические свойства литых прутков диаметром 12 мм из сплава 01417, полученных в ЭМК при различной скорости литья

Скорость литья, мм/с	Физико-механические свойства			
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Твердость по Бринеллю, HBW	Относительное удлинение δ , %
14,5	111	210	52,0	15,6
	105	206		12,5
	109	205		13,5
10,8	108	205	51,9	17,0
	111	206		13,0
	109	205		22,1
4,4	90	171	43,5	19,2
	87	170		23,5
	89	174		23,9

Для изготовления заготовок под волочение проволоки был использован метод совмещённой прокатки-прессования [18]. Обрабатываемые заготовки подвергались последовательному проходу через калиброванный валок. Эксперименты повторили для изучения влияния скорости деформации. Сравнение результатов, полученных в результате численного моделирования, с данными, полученными экспериментальным путём, приведено в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Силовые параметры процесса СПП для прутка из сплава 01417 диаметром 5 мм

Сила, кН	ξ , с ⁻¹	Расчетные данные	Экспериментальные данные	Отклонение, %
P_B	0,5	315	346	9,8
	1,5	379	385	1,5
P_M	0,5	201	182	9,4
	1,5	239	220	7,9

Далее из прутков д получали проволоку диаметром 0,5 мм, подвергая промежуточному отжигу полуфабрикат диаметром 2,5 мм (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из опытного сплава после непрерывного прессования методом СПП и волочения

Диаметр полуфабриката (мм) и его состояние	Механические свойства		
	Предел текучности, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
12,0 литое	101	179	11,6
5,0, горячепрессованное	161	175	20,2
0,5, холоднодеформированное	179	252	1,2
0,5, отожженное $T_0=450^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ час	125	139	16,0
0,5, отожженное $T_0=500^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ час	120	135	19,2

В результате термической обработки (отжига при 500°C в течение одного часа) проволока, изготовленная из прутка, произведенного при скорости вращения валков 4 об/мин, демонстрирует целевые характеристики. В то же время, аналогичная проволока, изготовленная при увеличении скорости вращения валков до 8 об/мин, и прошедшая отжиг при тех же условиях, демонстрирует относительное удлинение в диапазоне 23,6-28,8%. Такой показатель открывает перспективу дальнейшей холодной деформации вплоть до достижения диаметра 0,1-0,2 мм (рис. 3.11). Замеры удельного электрического сопротивления для всей исследованной проволоки показывают допустимые значения 0,02919-0,03054 Ом·мм²/м [225].

Прутки получены на установке СПП-400 компании ООО «Завод современных материалов». Опытная партия проволоки диаметром 0,5 мм изготовлена ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск) (см. Приложения А и Б).

В электромагнитном кристаллизаторе была изготовлена партия непрерывнолитой заготовки из экспериментального сплава массой 100 кг и диаметром 18 мм, которая в виде бухты была обработана на стане СПП-400. Полученный после обработки прутки с уменьшенным диаметром до 9 мм далее подвергался процессу волочения. Для достижения конечного диаметра 0,5 мм применялись промежуточные отжиги для снятия наклепа и предотвращения разрушения материала. Рекомендуемая частота вращения валков 2-4 об/мин. Физико-механические свойства проволоки, полученной с использованием установки совмещенной обработки СПП-400, приведены в табл. 3.9.

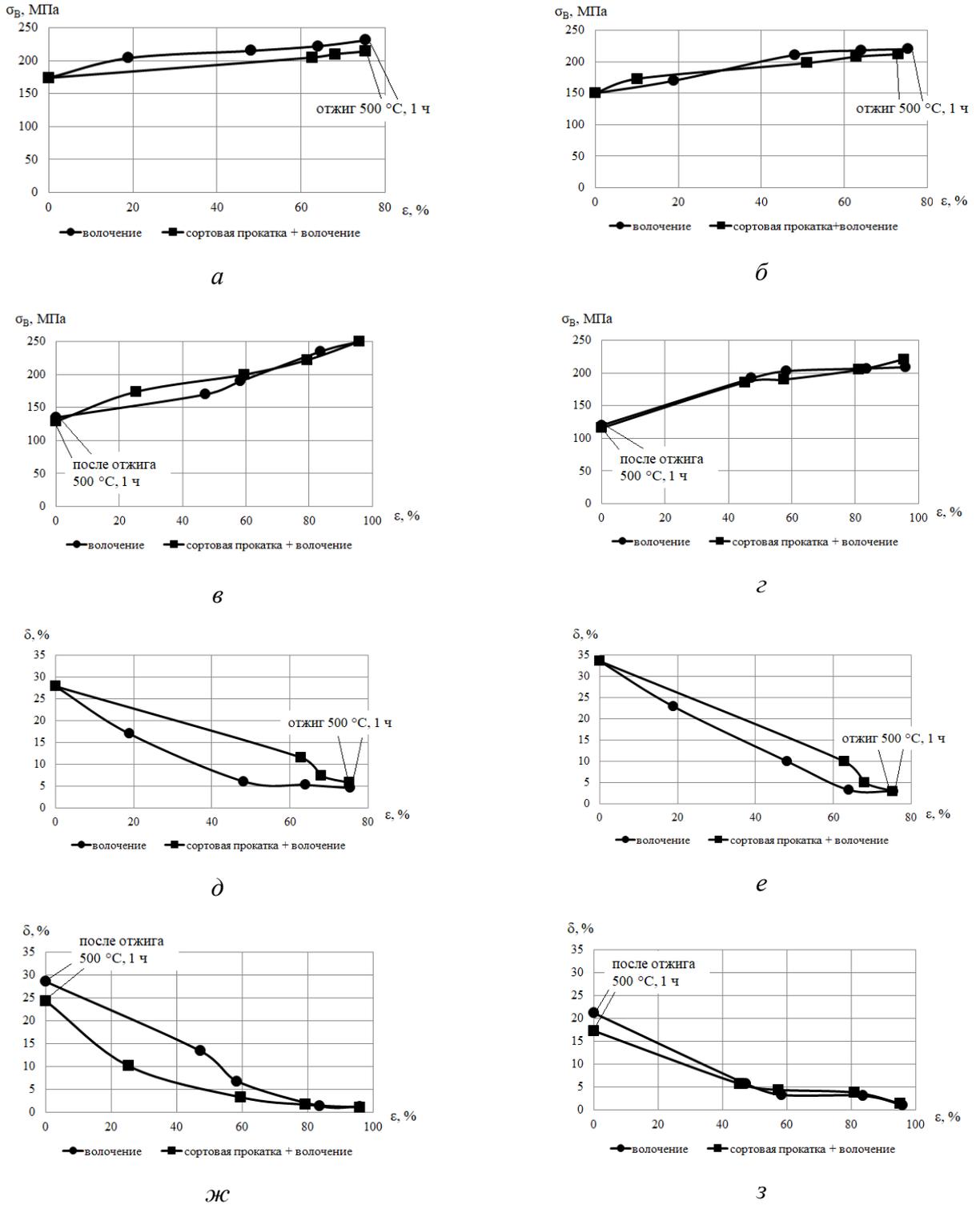


Рисунок 3.11 – Механические свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава до и после отжига при различной частоте вращения валков: *а, в, д, ж* – 4 об/мин; *б, г, е, з* – 8 об/мин

Разработанные режимы литья, непрерывного прессования, волочения и отжига были использованы при промышленном опробовании новой технологии получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 [215].

Таблица 3.9 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417

Состояние и режимы отжига	Механические свойства		Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м
	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	
Нагартованное	259	1,4	0,03151
	258	1,1	0,03158
Отожженное, $T=400^{\circ}\text{C}$, $\tau=4$ часа	161	14,5	0,03135
	157	14,3	0,03138
Отожженное, $T=450^{\circ}\text{C}$, $\tau=4$ часа	158	15,7	0,03139
	160	15,3	0,03144
Отожженное, $T=500^{\circ}\text{C}$, $\tau=4$ часа	159	16,7	0,03140
	155	17,0	0,03133

Для проверки результатов теоретических исследований процесса СПП с одним приводным валком (см. раздел 2.2) провели эксперименты по получению прутков диаметром 5 мм из заготовки из сплава 01417 диаметром 12 мм из ЭМК (раздел 3.1).

Отличием являлось отключение привода валка с выступом во время проведения опытов. Для подготовки экспериментов использовали методику определения реализуемости процесса СПП и данные теоретических расчетов температуры и силовых параметров (см. раздел 2.2).

На основании этих данных подготовлены образцы литых заготовок, которые нагревали до температуры 550°C и задавали в валки установки СПП-200, получая прутки после прессования диаметром 5 мм.

Таблица 3.10 – Силовые параметры процесса СПП для прутка из сплава 01417 диаметром 5 мм

ξ, c^{-1}	$P_{\text{в}}$, кН с двумя приводными валками	$P_{\text{в}}$, кН с одним приводным валком	Отклонение, %	$P_{\text{м}}$, кН с двумя приводными валками	$P_{\text{м}}$, кН с одним приводным валком	Отклонение, в %
0,5	348	307	11,8	181	185	2,1
1,5	387	341	11,9	218	224	2,7

В табл. 3.10 приведены результаты расчета и замера силовых параметров асимметричного процесса СПП с одним приводным валком в сравнении с параметрами процесса с двумя приводными валками.

Анализ результатов исследований показал, что сила, действующая на валки, уменьшается для процесса с одним приводным валком примерно на 12 %, а сила, действующая на матрицу, практически не изменяется (увеличивается на 3%).

Таким образом, снижение силы, действующей на валки, а соответственно и крутящих моментов, можно использовать в тех случаях, когда силовая нагрузка оборудования

незначительно отличается от допустимой нагрузки установки прокатки-прессования. При этом ограничения по силе прессования можно не учитывать.

3.4. Исследование структуры литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов

Анализ микроструктуры литых прутков показал, что отжиг при температуре 550 °С вызывает вырождение эвтектики [215] (рис. 3.12).

Металлографические исследования прессованных прутков показали, что они имеют равномерную мелкозернистую структуру (рис. 3.13).

Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм представлена на рис. 3.14.

На рисунке 3.15 представлены результаты определения элементного состава проволоки.

Эти данные были необходимы для определения их влияния на физико-механические свойства проволоки и обоснование выбора режима ее окончательного отжига.

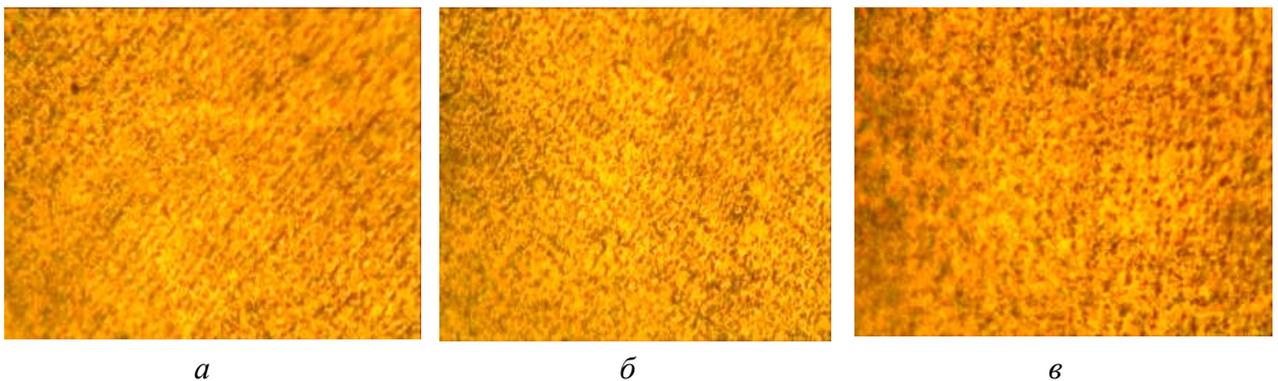


Рисунок 3.12 – Микроструктура отожженных при температуре $T_0=550$ °С литых прутков диаметром 12 мм из сплава 01417, отлитых при скорости литья 10,8 мм/с и разных температурах T_l : *a* – $T_l = 670$ °С; *б* – $T_l = 740$ °С; *в* – $T_l = 780$ °С, $\times 1000$

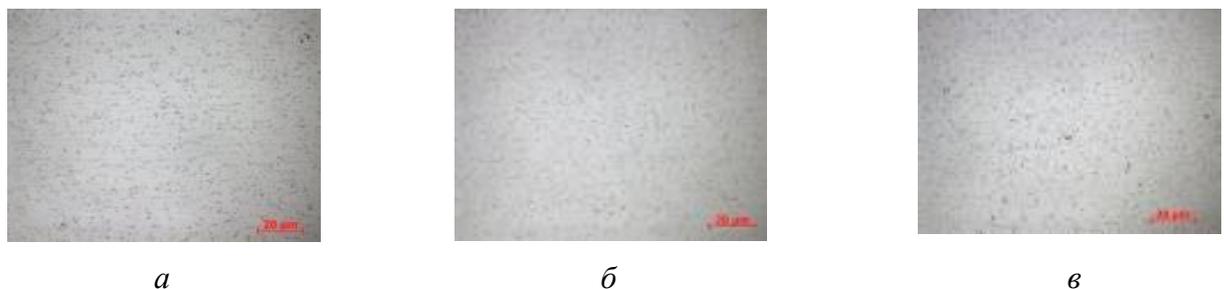
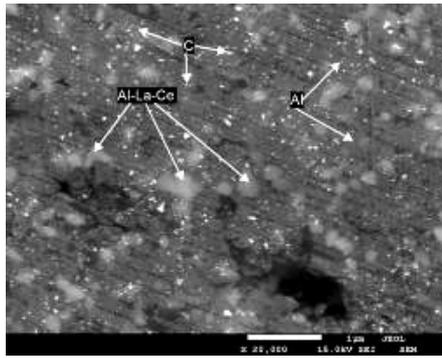
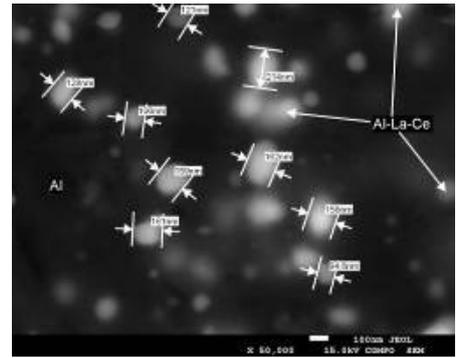


Рисунок 3.13 – Микроструктура прутка диаметром 5 мм (*a*) и проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм в деформированном (*б*) и отожженном (*в*) состояниях, $\times 1000$



а, ×20000



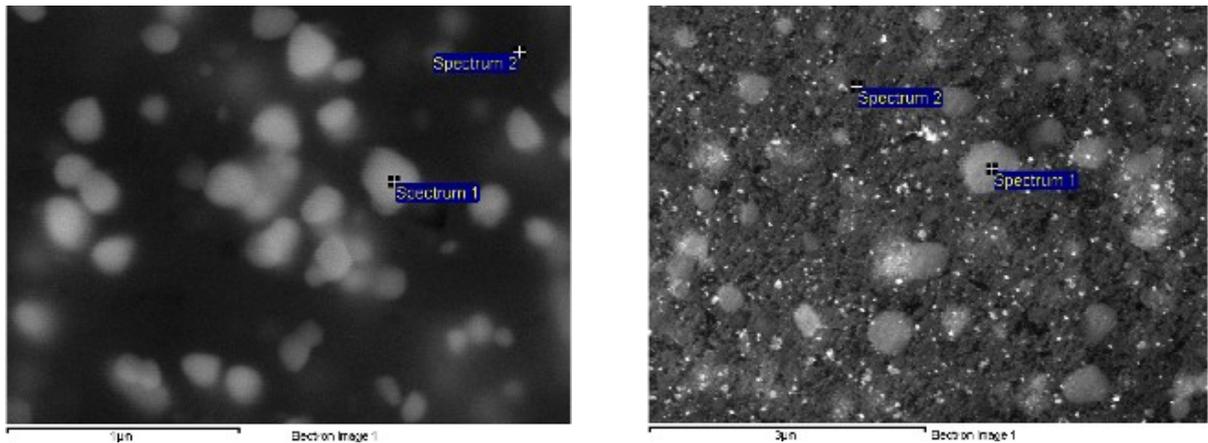
б, ×50000

Рисунок 3.14 – Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм из опытного сплава в нагартованном состоянии после волочения: *а* – с использованием SEI контраста, *б* – с использованием композиционного контраста COMPO.

Ранее проведенные исследования [20, 209, 210, 224, 228] позволили установить, что проволока, полученная способом с применением сортовой прокатки и последующего волочения, после отжига по режимам термообработки (ТО) 350, 400, 450 °С и временем выдержки 1 ч (режим ТО 1, 2 и 3 соответственно (Табл. 3.9)) обладает требуемым уровнем свойств в соответствии с ТУ 1-809-1038-2018. Отжиг проволоки по режиму с температурой 500 °С и временем выдержки 1 ч (режим ТО 4 (Табл. 3.9)) приводит к снижению временного сопротивления до значения 137 МПа, что не соответствует ТУ 1-809-1038-2018, однако пластичность (19,1 %) позволяет вести дальнейшую обработку заготовки до диаметров порядка 0,1-0,2 мм в случае необходимости получения такой проволоки. Значения удельного электрического сопротивления составляют от 0,02902 до 0,02996 Ом·мм²/м для всех проволок и всех режимов ТО.

На следующем этапе этого всестороннего исследования была тщательно изучена и проанализирована микроструктура деформированных полуфабрикатов, в частности тех, которые представлены в виде прутков, полученных методом обработки по пути деформации (СПП), а также проволоки, прошедшей как волочение, так и прокатку, сопровождаемую волочением, как указано в исчерпывающих данных, представленных в таблицах 3.11 и 3.12.

При изучении всех деформированных образцов, перечисленных в таблицах 3.11 и 3.12, становится очевидным, что микроструктура состоит преимущественно из твердого раствора алюминия и одновременно содержит эвтектическую фазу, характеризующуюся комбинацией α - и Al_4M , которая имеет округлую морфологию и равномерно распределена по всей металлической матрице.



Все результаты в ат. %			
Спектр	Al	La	Ce
Спектр 1	95,56	1,61	2,83
Спектр 2	99,27	-	0,73

a, ×20000

Все результаты в ат. %			
Спектр	Al	La	Ce
Спектр 1	94,25	1,88	3,87
Спектр 2	99,19	-	0,81

b, ×50000

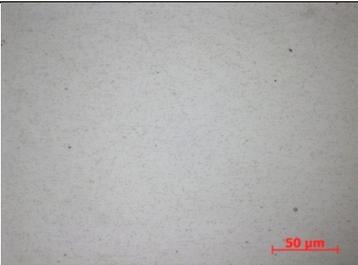
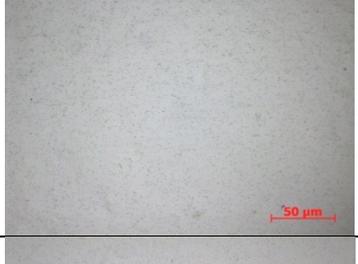
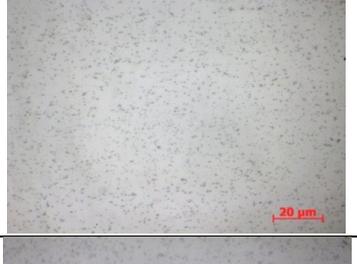
Рисунок 3.15 – Элементный состав и микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм из опытного сплава в нагартованном состоянии после волочения: *a* – с использованием SEI контраста, *b* – с использованием композиционного контраста COMPO

Кроме того, микроструктурные характеристики проволоки диаметром 0,5 мм, изготовленной двумя различными способами обработки, сходны с характеристиками, наблюдаемыми в прутке большего диаметра 5 мм, что свидетельствует о постоянном микроструктурном поведении полуфабрикатов разных размеров.

Примечательно, что процесс отжига проволоки, проводимый в четырех различных режимах, не приводит к заметным изменениям ни размера, ни конфигурации интерметаллических частиц, присутствующих в микроструктуре. Кроме того, применение микрорентгеновского спектрального анализа (МРСА) выявило тот факт, что микроструктура этих деформированных полуфабрикатов состоит из эвтектических частиц, содержащих церий (Ce) в концентрациях до 14% и лантан (La) в количествах, достигающих 8%, что подчеркивает значимость редкоземельных элементов в общем составе.

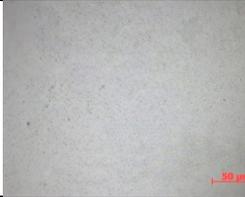
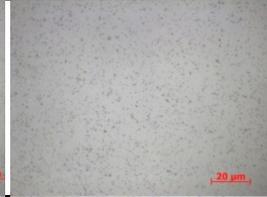
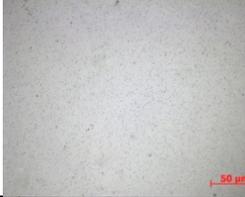
Технологическая схема электромагнитного литья (ЭМК) в сочетании с методом СПП, волочением и сортовой прокаткой с волочением, способствует достижению требуемых свойств, которые строго соответствуют установленным стандартам, изложенным в ТУ 1-809-1038-2018.

Таблица 3.11 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 01417

	×500	×1000
СПП, диаметр 5,0 мм		
Волочение, диаметр 2,48 мм		
Волочение, диаметр 0,5 мм		
Сортовая прокатка, 2,2×2,2 мм		
Сортовая прокатка и волочение, диаметр 0,5 мм		

Максимальной пластичностью, необходимой для дальнейшего получения проволоки диаметром до 0,1 мм, и минимальным значением удельного электрического сопротивления, характеризуется проволока диаметром 0,5 мм, полученная методом ЭМК+СПП с последующей сортовой прокаткой и волочением, отожженная при температуре 500 °С и времени выдержки 1 ч.

Таблица 3.12 – Микроструктура проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в отожженном состоянии, полученной по разным технологиям

ЭМК + СПП + волочение			ЭМК + СПП + сортовая прокатка + волочение		
Режим	×500	×1000	Режим	×500	×1000
ТО 1			ТО 1		
ТО 2			ТО 2		
ТО 3			ТО 3		
ТО 4			ТО 4		

Сравнение способов получения проволоки диаметром 0,5 мм не выявило существенных различий в структуре и свойствах деформированных полуфабрикатов. Исследуемые режимы отжига позволяют получать проволоку с требуемым уровнем свойств в соответствии с ТУ 1-809-1038-2018.

3.5. Выводы по главе

Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведено исследование реологического поведения сплава 01417, легированного редкоземельными элементами в концентрации 7-9 мас. %, представленного в виде заготовок, полученных методом электромагнитной кристаллизации (ЭМК) с применением различных режимов литья. Экспериментально установлены функциональные зависимости сопротивления деформации материала от температуры, скорости деформации и степени деформации;

2. Разработана трёхмерная цифровая модель процесса СПП цилиндрической заготовки. С помощью этой модели проанализированы закономерности деформации и теплового распределения в зоне деформации при изменении скорости вращения валков. В расчёты были включены реологические свойства исследуемого сплава, полученные экспериментальным способом;

3. Разработана всесторонняя методика, совмещающая экспериментальные исследования и аналитическое моделирование, направленная на оценку осуществимости процесса СПП и вычисление силовых характеристик при деформации цилиндрической заготовки из сплава 01417. На основании полученных результатов были определены конструктивные параметры валкового и прессового инструмента, а также рациональные технологические параметры непрерывного прессования;

4. Проведены экспериментальные исследования по получению прутков диаметром 5 мм из непрерывнолитой заготовки из сплава 01417 диаметром 12 мм на установке СПП с одним приводным валком, которые позволили сделать выводы о снижении силовой нагрузки на валки по сравнению с двумя приводными валками и целесообразности использования данной схемы для выбора деформирующего оборудования, если нагрузка превышает допустимую на 10-12%;

5. На основе разработанных технологических режимов непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, непрерывного прессования методом СПП, волочения, а также промежуточных и окончательных отжигов, проведены экспериментальные исследования по изготовлению проволоки диаметром 0,5 мм из экспериментального сплава в лабораторных и промышленных условиях;

6. Выполнено исследование микроструктуры металла, выявлены зависимости изменения его механических характеристик (временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения) а также удельного электрического сопротивления прутков и проволоки;

7. На промышленном предприятии, используя установку СПП-400, из непрерывной заготовки диаметром 18 мм, полученной методом ЭМК, отпрессовали прутки Ø 9 мм, из которых выпустили экспериментальные партии проволоки Ø 0,5 мм с требуемыми физико-механическими свойствами. При этом разработаны новые деформационные режимы непрерывного прессования, маршруты волочения, а также определены параметры промежуточного и окончательного отжига.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ АІ-РЗМ С СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕРИЯ И ЛАНТАНА 1%

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплава системы АІ-РЗМ с содержанием редкоземельных элементов (церия и лантана) до 1 %. Особенностью данного раздела работы является то, что для получения литой заготовки использовался электромагнитный кристаллизатор, и дальнейшая обработка такой заготовки круглого поперечного сечения проводилась на установке СПП при прокатке-прессовании в закрытом ящичном калибре. Теоретические основы такого процесса были разработаны ранее и приведены в главе 2. Материалы главы опубликованы в работах [1, 209, 227, 230-236].

4.1. Исследование реологических свойств, оборудование и методика проведения экспериментальных исследований

Для исследований использовали сплав системы АІ-РЗМ с пониженным содержанием церия и лантана (табл. 4.1). Концентрации Ce и La были определены с помощью МРСА.

Таблица 4.1 – Химический состав исследуемого сплава АІ-1%РЗМ

Массовая доля элемента, %													
Ce	La	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	V	Ga	B
0,6	0,4	0,106	0,058	0,0007	0,0013	0,0016	0,0004	0,0041	0,0392	0,0050	0,0098	0,0159	0,0017

Приготовление такого сплава осуществлялось в индукционной тигельной печи емкостью 25 кг, входящей в состав опытно-промышленного литейного комплекса разработанного и введенного в эксплуатацию в НППЦ Магнитной гидродинамики [100, 102]. Шихтовка мишметалла марки МЦ50Ж3 (ТУ 48-4-280-91) осуществлялась из расчета 1 % РЗМ на массу сплава. Температура введения мишметалла составляла 850 °С, а алюминия 750 °С. Расплав выдерживался в течение 40 минут, а затем проводилось литье.

Значения технологических параметров литья слитков из исследуемого алюминиевого сплава были следующими:

- температура литья 720 °С;

- диаметр слитка, 12 ± 2 мм;
- скорость вытягивания слитка, 14 мм/с;
- напряжение на индукторе, 15 В;
- расход воды, 11 л/мин;
- высота жидкой фазы, 160 мм;
- ток индуктора, 1450 А.

Методика получения литой заготовки была следующей (см. рис. 3.4). В электрической печи осуществлялось плавление чушки алюминия, при этом однородность расплава по химическому составу и температуре обеспечивалась путем использования МГД-перемешивателя. Расплав из плавильной печи поступал в дозирующий лоток, где поддерживалась заданная температура и уровень расплава. Через носик лотка расплав попадал в электромагнитный кристаллизатор, в котором бесконтактно электромагнитным полем формировалась геометрия слитка. Охлаждающая жидкость из оросителя подавалась на границу раздела жидкой и твердой фаз, что обеспечивало отвод тепла, процесс кристаллизации и формирование слитка. Слиток с помощью вытяжного механизма непрерывно отводился из зоны кристаллизации, обеспечивая непрерывность процесса литья, и затем сматывался в бухту. Следует отметить, что процесс литья экспериментального алюминиевого сплава проходил в штатном режиме, при этом получена непрерывнолитая заготовка из экспериментального сплава диаметром 12 ± 2 мм, смотанная в бухту общим весом до 10 килограмм.

Реологические характеристики, полученные в результате испытаний на кручение [209] образцов непрерывнолитой заготовки приведены на рис. 4.1

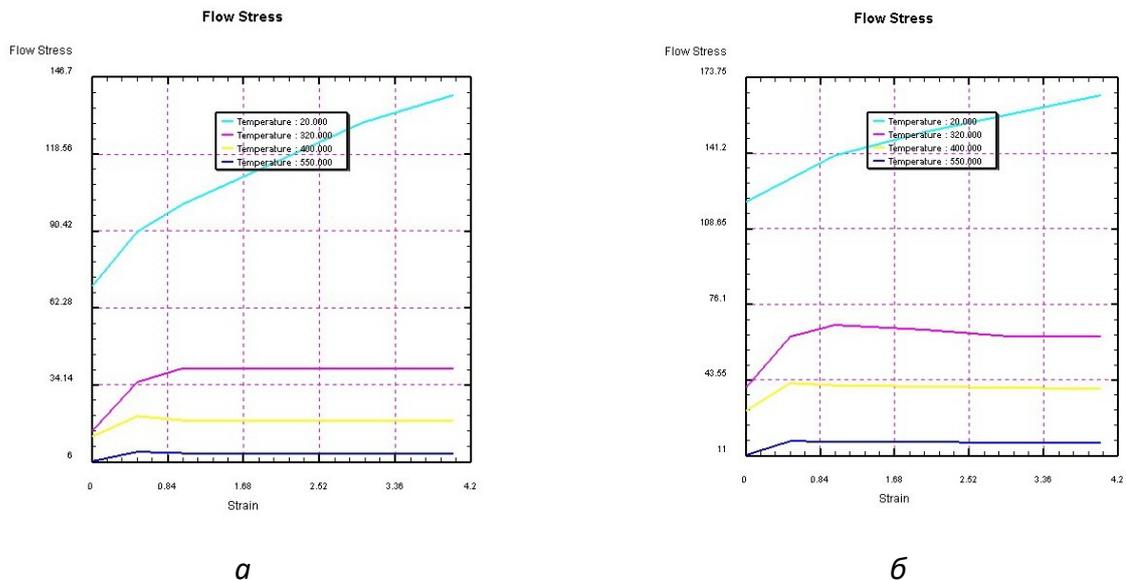


Рисунок 4.1 – Зависимость сопротивления пластической деформации сплава Al-1%PЗМ: *a* – скорость деформации (Strain rate) $0,2 \text{ c}^{-1}$; *б* – скорость деформации (Strain rate) 15 c^{-1}

Для получения прутков диаметром 5 и 9 мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм использовалась установка СПП-200, а для изготовления проволоки диаметром до 2 мм – цепной волочильный стан. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований описаны в разделе 3.1.

4.2. Моделирование процесса СПП

Цифровое моделирование комбинированного процесса прокатки-прессования было реализовано посредством последовательности шагов.

Первоначально была создана база данных, содержащая реологические характеристики сплава Al-1%РЗМ. Эти данные, представленные в графической форме, были импортированы в программный комплекс DEFORM 3D (см. рис. 4.1). На втором этапе было выполнено компьютерное моделирование инструментальной оснастки, используемой в процессе комбинированной прокатки-прессования, с применением программного обеспечения SolidWorks. После этого модели оснастки и данные о материальных свойствах заготовки были интегрированы в среду DEFORM 3D (см. раздел 3.2).

Затем было проведено моделирование процессов комбинированной прокатки-прессования, ориентированное на решение поставленных исследовательских задач.

В заключение был выполнен анализ полученных результатов, включающий оценку деформации металла, параметров деформации, энергосиловых и температурно-скоростных характеристик процесса, а также напряжений, возникающих в зоне деформации. На основе полученных данных были разработаны рекомендации по практической реализации процесса в промышленных масштабах.

В качестве параметров для моделирования процесса совмещенной прокатки прессования прутков из заготовки круглого поперечного сечения приняты следующие [235]:

- температура заготовки 480 и 550 °С;
- температура инструмента 100 °С;
- степень деформации при прокатке $\varepsilon = 50 \%$;
- диаметр заготовки 12 мм;
- диаметр калибрующего отверстия матрицы 5 мм;
- длина рабочего пояса матрицы 3 мм;
- частота вращения валков $\omega = 4$ и 8 об/мин.

Моделирование процесса проводилось со следующими условиями и допущениями [235, 236]:

- материал заготовки изотропный;
- материал валков и матрицы жесткопластический;
- показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы $\psi_M = 0,3$;
- показатель трения по Зибелю на валках и калибрующем пояске матрицы $\psi_B = 0,9$;
- охлаждение валков не предусмотрено;
- количество конечных элементов, на которые разбита заготовка, 20 тыс. шт.

В результате моделирования получено распределение температур и напряжений вдоль очага деформации при различных деформационных и скоростных параметрах процесса СПП.

Результаты моделирования формоизменения металла, распределения температуры и напряжений вдоль очага деформации при разной частоте вращения валков и диаметре прессуемого прутка представлены на рис. 4.2-4.4.

Анализ результатов моделирования показал, что процесс СПП осуществим в заданном диапазоне параметров процесса. При этом температура заготовки вдоль очага деформации изменяется в диапазоне от 480 до 200 °С.

Анализ распределения температур вдоль очага деформации (рис. 4.2) показал, что средняя температура изделия диаметром 9 мм. в зоне перед матрицей составляет порядка 270 °С при частоте вращения валков 4 об/мин и порядка 325 °С при 8 об/мин. При прессовании изделия диаметром 5 мм средняя температура на выходе из матрицы составляет порядка 320 °С при 4 об/мин и порядка 380 °С при 8 об/мин.

Наиболее высокие значения температур и наименьшие значения напряжений в зоне перед матрицей наблюдаются при частоте вращения валков 8 об/мин и диаметре изделия 5 мм. Это можно объяснить повышенным деформационным разогревом металла при максимальном значении вытяжки при прессовании и снижением сопротивления деформации вследствие этого.

Повышение частоты вращения валков до 8 об/мин приводит к снижению напряжений до значений порядка 53-62 МПа. Для случая прессования прутка диаметром 5 мм, значение напряжений в зоне перед матрицей составили 81 МПа при частоте вращения валков 4 об/мин и 45 МПа при 8 об/мин.

Следует обратить внимание на то, при каких условиях реализуются максимальные значения напряжений, наблюдающихся в зоне очага деформации перед матрицей. Здесь можно отметить, что для случая СПП при температуре заготовки 480 °С, частоте вращения валков 4 об/мин и получения пресс-изделия диаметром 9 мм, значение напряжений находятся в диапазоне 75-90 МПа.

При анализе результатов моделирования процесса СПП заготовки температурой 550 °С было выявлено, что при частоте вращения валков 4 об/мин в процессе прессования происходит

постепенное захлаживание заготовки в зоне перед матрицей. Так температура металла в зоне перед матрицей вначале процесса прессования составляет около 330 °С, а затем падает до температуры 250 °С, при этом температура пресс-изделия диаметром 5 мм составляет около 280 °С [235, 236].

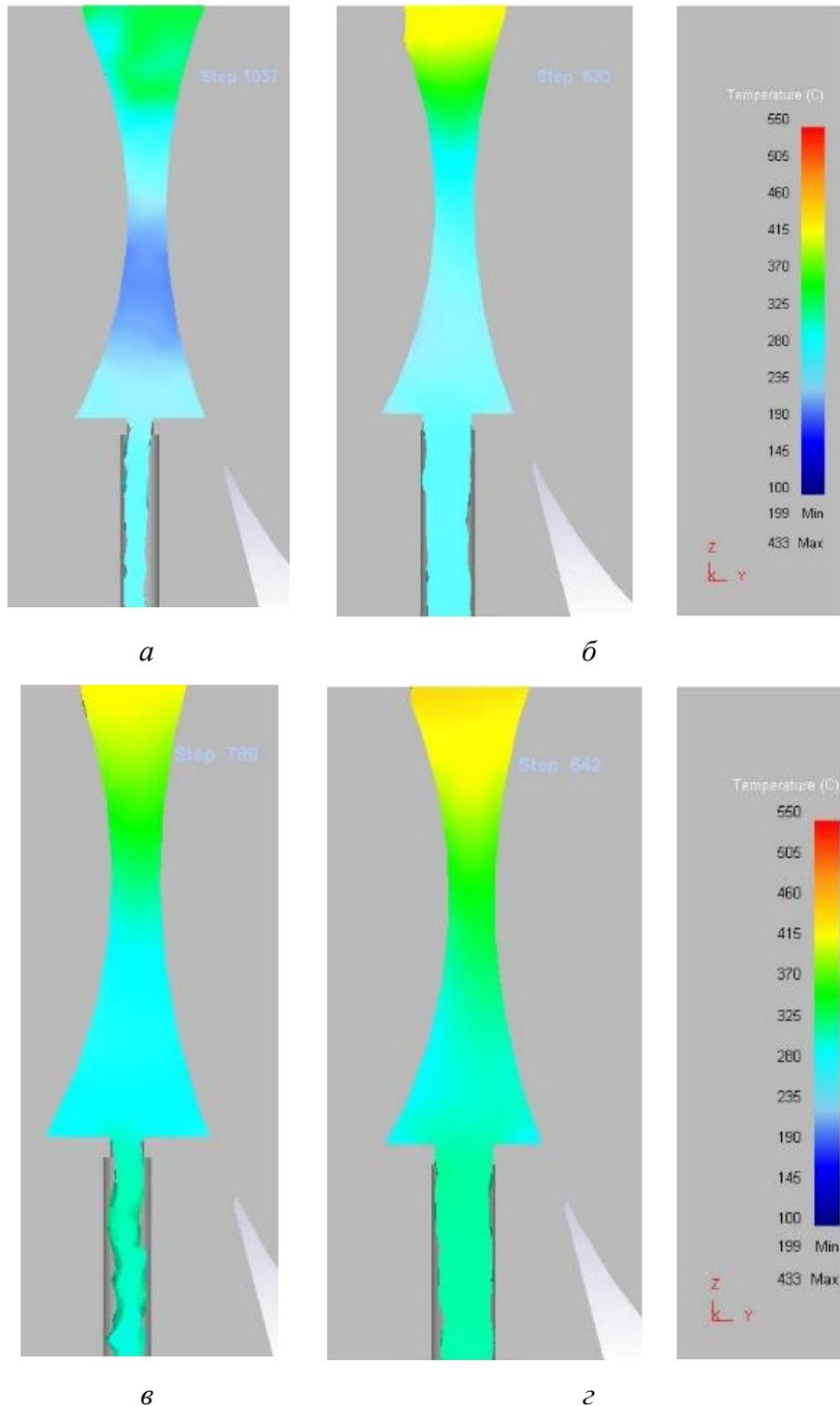


Рисунок 4.2 – Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки из сплава Al-1%РЗМ при частоте вращения валков $\omega = 4$ об/мин (*a*, *б*) и $\omega = 8$ об/мин (*в*, *з*):

a, *б* – диаметр прутка 5 мм; *в*, *з* – диаметр прутка 9 мм

На установившейся стадии прессования температура стабилизируется и составляет около 200 °С. Падение температуры заготовки приводит к росту значения сопротивления деформации металла, следствием чего является рост силы на валках со 186 кН (18,6 т) до 343 кН (рис. 4.3).

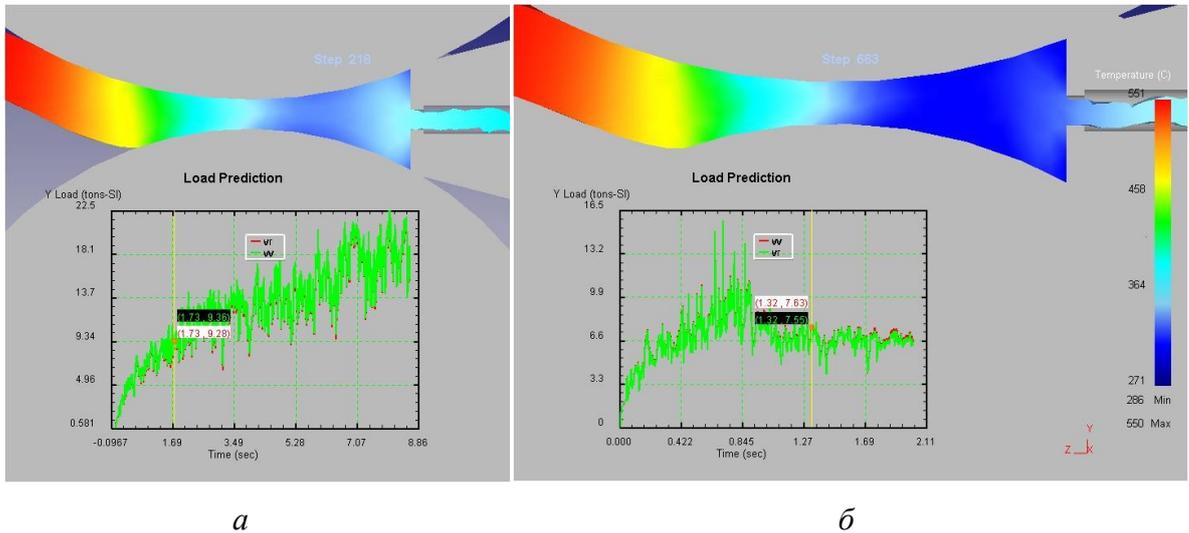


Рисунок 4.3 – Изменение температуры и графики силы, действующей на валки при обработке заготовки из сплава Al-1%PЗМ при температуре заготовки 550 °С и частоте вращения валков $\omega = 4$ об/мин (а) и $\omega = 8$ об/мин (б)

В результате анализа силы, действующей на матрицу в процессе прессования, выявлено, что она растет по ходу процесса с 84,6 кН до 124 кН, что также связано со снижением температуры металла в зоне прессования (рис. 4.4).

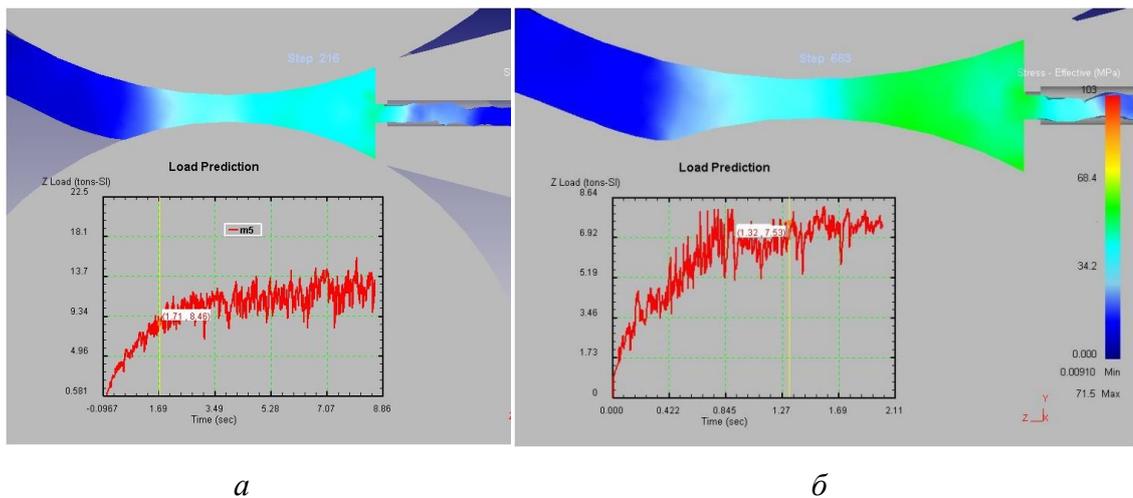


Рисунок 4.4 – Изменение напряжений вдоль очага деформации и графики силы, действующей на матрицу, при обработке заготовки из сплава Al-1%PЗМ при температуре заготовки 550 °С и частоте вращения валков $\omega = 4$ об/мин (а) и $\omega = 8$ об/мин (б)

Следует отметить, что моделирование проводилось без учета трения матрицы о валковый инструмент, поэтому при реализации процесса на практике значения усилий могут быть выше на величину до 20%.

При реализации процесса СПП при скорости вращения валков 8 об/мин, также как и в предыдущем случае, по мере заполнения очага деформации металлом наблюдается рост сил, действующих на валки и матрицу. В результате выделения деформационного тепла в зоне прессования происходит разогрев металла в зоне перед матрицей, и сила на валках снижается до 150 кН, а процесс приобретает стабильный характер.

На основе полученных результатов компьютерного и математического моделирования определены параметры инструмента и режимы обработки исследуемого сплава на установке СПП-200 для проведения экспериментальных исследований [235, 236].

4.3. Результаты экспериментальных исследований

Для проведения опытов по получению горячепрессованных прутков диаметром 5 и 9 мм из исследуемого сплава на установке СПП-200 была применена следующая методика. В электрической печи сопротивления нагревали непрерывнолитые заготовки диаметром 12 мм до заданной температуры (480 и 550 °С) и выдерживали их 10-15 минут. Температуру нагрева контролировали хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-3. Одновременно осуществляли нагрев валков до температуры 100 - 200 °С при помощи печи, выполненной в виде кожуха по форме валков и снабженного нихромовыми нагревателями. После нагрева до необходимой температуры приводили во вращение валки установки с частотой 4 или 8 об/мин.

Заготовку задавали в калибр и, после того как произошел захват, при помощи тензометрической аппаратуры фиксировали силы, действующие на валки и матрицу. Далее металл обжимался в калибре и достигал матрицы, смонтированной на матрицедержателе. С помощью гидравлического цилиндра матрица была плотно поджата к валкам снизу, поэтому металл распрессовывался перед матрицей, заполняя калибр, а затем, за счет его постоянного поступления в калибр, выдавливался через калибрующее отверстие матрицы в виде прутка.

Параметры режима получения прутков были следующие: диаметры получаемых прутков 5 и 9 мм, температура нагрева заготовки 480 и 550 °С, частота вращения валков 4 и 8 об/мин (8 режимов для эксперимента).

Полученные прутки диаметром 5 мм и 9 мм подвергали холодному волочению до получения проволоки диаметром 2 мм. Волочение производили на цепном волочильном стане однократного действия (см. табл. 3.2). Маршрут волочения для прутков диаметра 9 мм составлял: 9,0–8,5–7,0–6,5–5,9–5,4–5,0–4,5–4,0–3,6–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм. Маршрут

волочения для прутков диаметра 5 мм составлял: 5,0–4,5–4,2–4,0–3,6–3,3–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм.

От полученных длинномерных полуфабрикатов на всех технологических переделах отбирали образцы и проводили испытания на растяжение для определения механических свойств металла, которые определяли на оборудовании Walter + Bai AG LFM 400 кН и LFM 20 кН (Walter + Bai AG, Швейцария) в соответствии с ГОСТ 1497-84.

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

Для измерения энергосиловых параметров применяли кольцевые месдозы, которые были установлены под нажимные винты валков и матрицу и подключены к регистрирующей аппаратуре. Результаты измерений силы, действующей на валки $P_{\text{вал}}$, и силы $P_{\text{матр}}$, действующей на матрицу, при получении прутков методом СПП представлены в табл. 4.2. Частота вращения валков $\omega = 4$ об/мин соответствовала скорости деформации $\xi = 0,5 \text{ с}^{-1}$, а частота вращения валков $\omega = 8$ об/мин скорости деформации $\xi = 1,5 \text{ с}^{-1}$. Вытяжка при прессовании составляла $\mu = 6,5$ при диаметре прутка 9 мм и 15,3 при диаметре прутка 5 мм [235, 236].

Анализ энергосиловых параметров показал, что для процесса СПП круглой заготовки при температуре 480 °С сила $P_{\text{вал}}$ достигает 269 кН, а сила $P_{\text{матр}}$ не превышает 172 кН. С увеличением температуры заготовки до 550 °С (см. табл. 4.2) сопротивление деформации металла и силовые параметры процесса снижаются, что соответствует общим представлениям теории ОМД.

Механические свойства прутков (временного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$ и относительного удлинения δ) представлены в табл. 4.3. Изменение технологических параметров сказалось на механических свойствах металла. Влияние температуры заготовки традиционно, чем она выше, тем прочностные характеристики ниже, а пластические выше.

Таблица 4.2 – Результаты исследований энергосиловых параметров процесса СПП для получения прутков из сплава Al-1%PЗМ из заготовки диаметром 12 мм

Параметры	Температура нагрева заготовки при СПП, °С			
	480		550	
	Диаметр прутка, мм			
	9	5	9	5
$P_{\text{вал}}$, кН ($\omega = 4$ об/мин)	192	269	163	204
$P_{\text{матр}}$, кН ($\omega = 8$ об/мин)	151	172	131	133
$P_{\text{вал}}$, кН ($\omega = 4$ об/мин)	168	241	146	194
$P_{\text{матр}}$, кН ($\omega = 8$ об/мин)	123	151	98	126

При этом уровень прочностных характеристик находится в диапазоне 123-140 МПа, а пластических 14-26 %. С увеличением скорости деформации увеличивается пластичность металла прутков (растет величина относительного удлинения), и снижается прочность (падает временное сопротивление). С увеличением вытяжки при прессовании закономерность обратная: временное сопротивление металла увеличивается, а относительное удлинение снижается, так как происходит деформационное упрочнение металла за счет увеличения давления в очаге деформации, что подтверждают данные по силовым параметрам (см. табл. 4.3) [235, 236].

Таблица 4.3 – Результаты исследований механических свойств прутков из сплава Al-1%PЗМ, полученных методом СПП из заготовки диаметром 12 мм

Параметры	Температура нагрева заготовки при СПП, °С			
	480		550	
	Диаметр прутка, мм			
	9	5	9	5
$\sigma_{\text{в}}$, МПа ($\omega = 4$ об/мин)	129	140	126	137
δ , % ($\omega = 4$ об/мин)	18,0	14,0	24,0	15,0
$\sigma_{\text{в}}$, МПа ($\omega = 8$ об/мин)	123	128	123	127
δ , % ($\omega = 8$ об/мин)	25,0	24,0	26,0	25,0

Результаты измерения электрических свойств прутков диаметром 9 и 5 мм, проведенные согласно методике по ГОСТ 7229-76 с помощью омметра «Виток», показали, что значения удельного электросопротивления изменяются от 0,0271 до 0,0301 Ом·мм²/м в зависимости от

режимов обработки. При этом они ниже при температуре заготовки 480 °С и при частоте вращения валков 8 об/мин (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Результаты измерения электросопротивления прутков из сплава Al-1%РЗМ, полученных методом СПП из заготовки диаметром 12 мм

Параметры	Температура нагрева заготовки при СПП, °С			
	480		550	
	Диаметр прутка, мм			
	9	5	9	5
ρ , Ом·мм ² /м ($\omega = 4$ об/мин)	0,0282	0,0298	0,0295	0,0301
ρ , Ом·мм ² /м ($\omega = 8$ об/мин)	0,0271	0,0290	0,0290	0,0286

Анализ этих же параметров для полученной холодной деформацией проволоки диаметром 2 мм (табл. 4.5) показал, что с увеличением степени деформации за счет упрочнения металла прочностные характеристики увеличиваются, а пластические снижаются. Относительное удлинение падает до значений порядка 2-4 %.

Таблица 4.5 – Результаты исследований механических свойств проволоки диаметром 2 мм из сплава Al-1%РЗМ

Параметры	Температура нагрева заготовки при СПП, °С			
	480		550	
	Диаметр прутка, полученного СПП, мм			
	9	5	9	5
σ_B , МПа ($\omega = 4$ об/мин)	163	198	187	186
δ , % ($\omega = 4$ об/мин)	2,5	3,5	4,0	2,0
σ_B , МПа ($\omega = 8$ об/мин)	179	186	191	179
δ , % ($\omega = 8$ об/мин)	8,5	4,0	9,5	4,5

Температура нагрева при СПП не оказывает значительного влияния на механические свойства конечной проволоки при использовании круглой заготовки из ЭМК. Однако скорость деформации влияет на пластические свойства, увеличивая их практически в 2 раза. Это можно объяснить тем, что заготовка быстрее проходит зону деформации при СПП и меньше захлаживается, и, готовый пруток дольше остается в нагретом состоянии. Также с увеличением скорости деформации происходит рост температуры деформационного разогрева.

Таблица 4.6 – Результаты измерения электросопротивления проволоки диаметром 2 мм из сплава Al-1%РЗМ

Параметры	Температура нагрева заготовки при СПП, °С			
	480		550	
	Диаметр прутка, полученного СПП, мм			
	9	5	9	5
ρ , Ом·мм ² /м ($\omega = 4$ об/мин)	0,0299	0,0300	0,0297	0,0306
ρ , Ом·мм ² /м ($\omega = 8$ об/мин)	0,0301	0,0296	0,0299	0,0294

Следует отметить, что литые заготовки, полученные в электромагнитном кристаллизаторе, обладали достаточно высокой пластичностью, что дало возможность получить из них проволоку диаметром 2 мм без промежуточных отжигов.

Установлено также, что значения электросопротивления для проволоки диаметром 2 мм после холодной деформации выше, чем у прутков, полученных горячей деформацией. Поэтому для получения комплекса свойств, соответствующих действующим стандартам, необходимы исследования и установление параметров окончательного отжига [235, 236] (табл 4.6).

С этой целью проведены исследования параметров термообработки полученных прутков и проволоки при различных режимах обработки и отжига: температура отжига 230 °С, время выдержки 1 час; температура отжига 300 °С, 1 ч; температура отжига 400 °С, 1 ч; температура отжига 450 °С, 10 ч.

Таблица 4.7 – Значения механических свойств и электросопротивления проволоки из сплава Al-1%РЗМ диаметром 2 мм, полученной из прутков диаметром 9 и 5 мм совмещенными методами обработки, при различных режимах отжига

Вид обработки	Состояние	Режим	σ_b , МПа	δ , %	ρ , Ом·мм ² /м
Проволока диаметром 2 мм из прутка диаметром 9 мм					
ЭМК+СПП	Нагартованное	–	191	3,0	0,02990
	Отожженное	230 °С, 1 ч	163	9,5	0,02784
	Отожженное	300 °С, 1 ч	108	15,0	0,02786
	Отожженное	400 °С, 1 ч	87	28,3	0,02757
	Отожженное	450 °С, 10 ч	84	29,5	0,02753
Проволока диаметром 2 мм из прутка диаметром 5 мм					
ЭМК+СПП	Нагартованное	–	198	3,0	0,03000
	Отожженное	230 °С, 1 ч	155	3,5	0,02775
	Отожженное	300 °С, 1 ч	97	24,5	0,02750
	Отожженное	400 °С, 1 ч	93	31,0	0,02745
	Отожженное	450 °С, 10 ч	89	38,0	0,02705

В табл. 4.7 приведены данные по механическим свойствам и электросопротивлению проволоки диаметром 2 мм в нагартованном и отожженном состояниях.

Таким образом, результаты исследований показали, что для выполнения требований стандарта ИЕС 62004-07 для режима АТ1 рекомендуется применение режима отжига при температуре 230 °С и выдержке 1 час.

4.4. Исследование структуры литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов

Исследования микроструктуры проводили на световом микроскопе Axio Observer A1.m, Carl Zeiss при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$ в поляризованном свете после нанесения пленки, полученной на оборудовании «Кристалл» при напряжении $V = 30\text{В}$, силе тока $I = 0.2\text{-}0.4\text{ А}$, времени $t = 1$ мин, при комнатной температуре в составе: борной кислоты 5,5 г, HF 15 мл, H_2O 1000 мл [235].

Микроструктура литой заготовки для исследуемого сплава диаметром 12 мм при различных увеличениях приведена на рис. 4.5. Микроструктура и результаты SEM-EDS показаны на рис. 4.6. Видно, что структура металла непрерывнолитых заготовок, как и отмечалось ранее, характеризуется мелкозернистым строением по всему сечению слитка, а также по его длине.

При дальнейшей деформации непрерывнолитой заготовки с помощью совмещенной прокатки-прессования и получении прутка диаметром 9 мм и проволоки диаметром 2 мм из исследуемого алюминиевого сплава с добавкой 1% РЗМ происходит измельчение зерен твердого раствора и вытягивание их в направлении деформации. По границам зерен твердого раствора интерметаллидные включения распределяются более плотно друг к другу (рис. 4.7). Изменение частоты вращения валков от 4 до 8 об/мин при температуре 480 °С приводит к формированию более дисперсного зерна, как на прутке диаметром 9 мм, так и на проволоке, полученной из этого прутка, при переходах к диаметру 2 мм.

Повышение температуры деформирования до 550 °С приводит к получению более чистого по количеству включений твердому раствору на основе алюминия. Вероятно повышение температуры от 480 °С до 550 °С и увеличение скорости деформации способствует перераспределению включений интерметаллидов, их измельчению и растворению в твердом растворе (рис. 4.8).

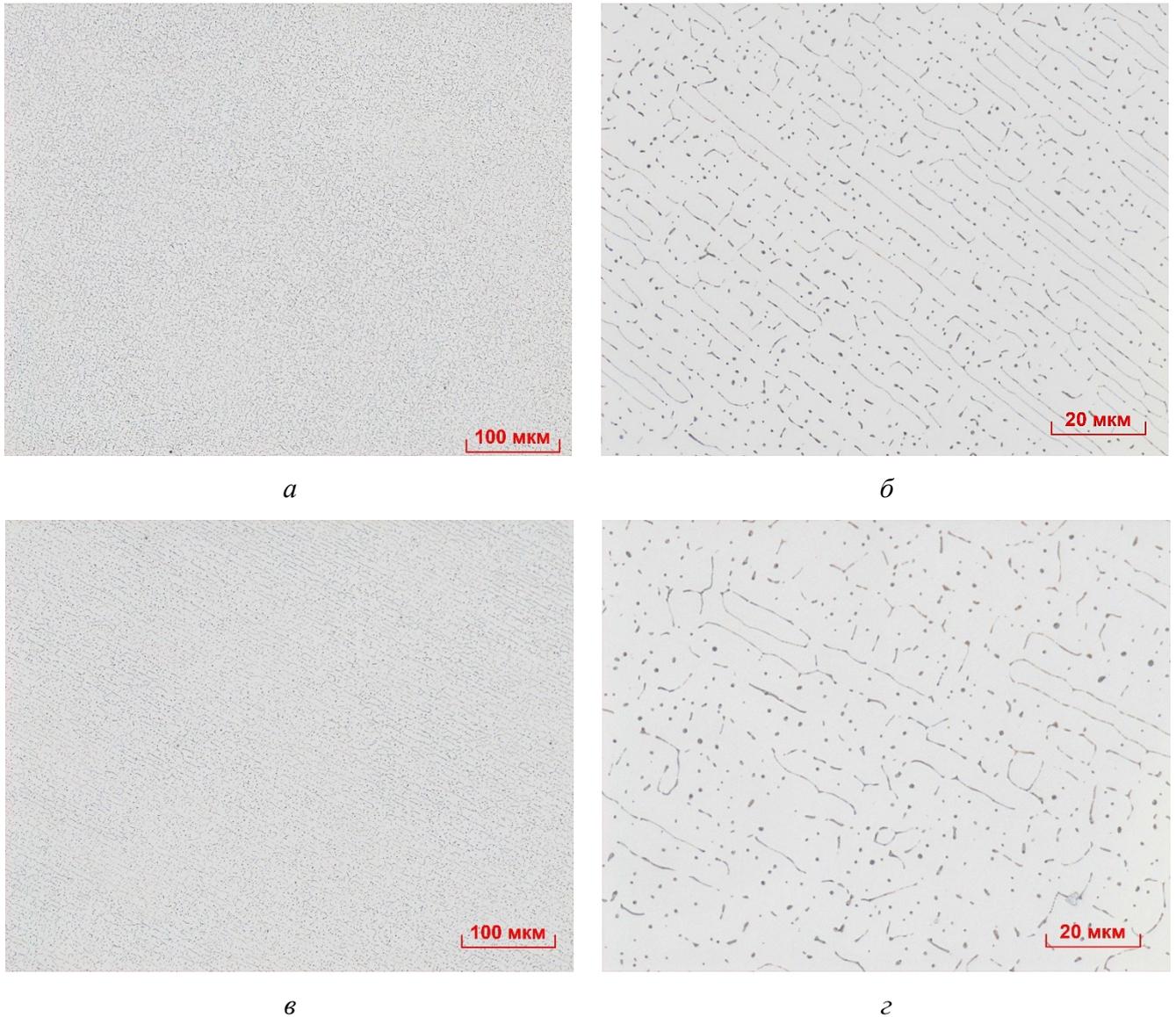
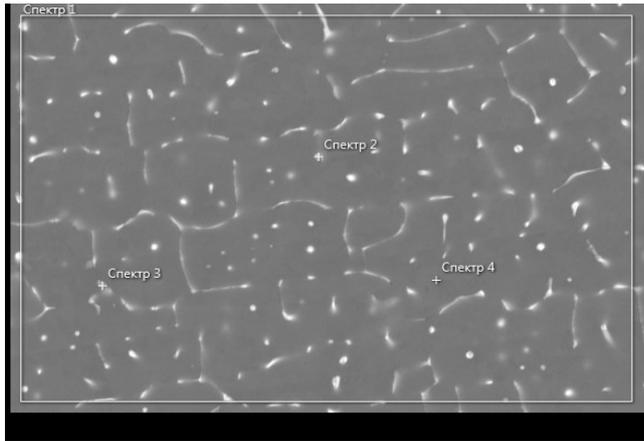


Рисунок 4.5 – Микроструктура литой заготовки диаметром 12 мм из сплава Al-1%PZM:

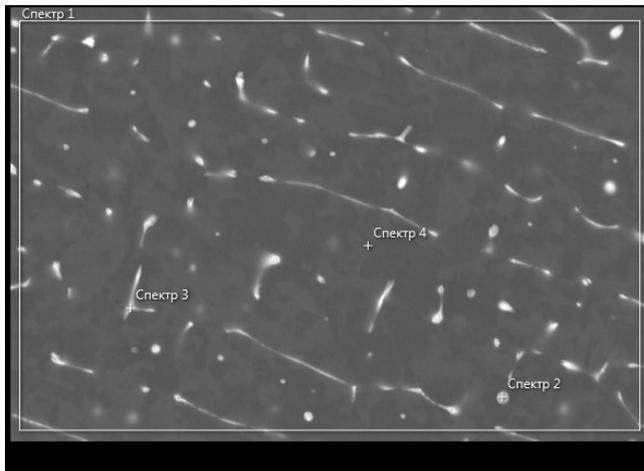
a, б – начало слитка; *в, г* – конец слитка

Деформация прутков диаметром 5 мм до 2 мм также способствует получению более тонких и вытянутых зерен твердого раствора в направлении деформирования. Наблюдается получение более дисперсных (измельченных) включений по границам зерен твердого раствора как при 4 об/мин, так и при 8 об/мин (рис. 4.9). Но количество включений резко снижается при деформации в условиях повышенной температуры 550 °С и частоте вращения 8 об/мин (рис. 4.10).



Спектр	Al	Ce	La	Fe	Si
Спектр 1	99,1	0,5	0,3	0,1	-
Спектр 2	90,6	5,3	2,6	1,0	0,5
Спектр 3	92,4	4,6	2,5	0,3	0,2
Спектр 4	100	-	-	-	-

а



Спектр	Al	Ce	La	Fe	Si
Спектр 1	99,2	0,5	0,2	0,1	-
Спектр 2	91,2	4,6	2,4	1,3	0,5
Спектр 3	89,8	6,1	3,5	0,5	0,1
Спектр 4	100	-	-	-	-

б

Рисунок 4.6 – Микроструктура и результаты SEM-EDS литой заготовки диаметром 12 мм из сплава Al-1%PЗМ: а – начало слитка; б – конец слитка

Волочение проволоки с 5 мм до 2 мм приводит к получению проволоки с достаточно равномерным распределением вторичных фаз по объему проволоки, хотя частично наблюдаются и более крупные частицы фаз (рис. 4.10).

После отжига при температуре 230 °С и выдержке 1 ч вся проволока сохраняет деформированное волокнистое строение, что свидетельствует о хорошей термической стабильности сплава Al-1%PЗМ (табл. 4.8 и 4.9).

Микроструктура проволоки из исследуемого сплава Al-1%PЗМ, полученная методом ЭМК+СПП из прутков диаметрами Ø 9 и 5 мм, состоит из алюминиевой матрицы и дисперсных частиц интерметаллидных фаз $Al_4(Ce, La)$, объемная доля которых в структуре составляет ~ 2,5%, часть частиц ориентирована в направлении деформации.

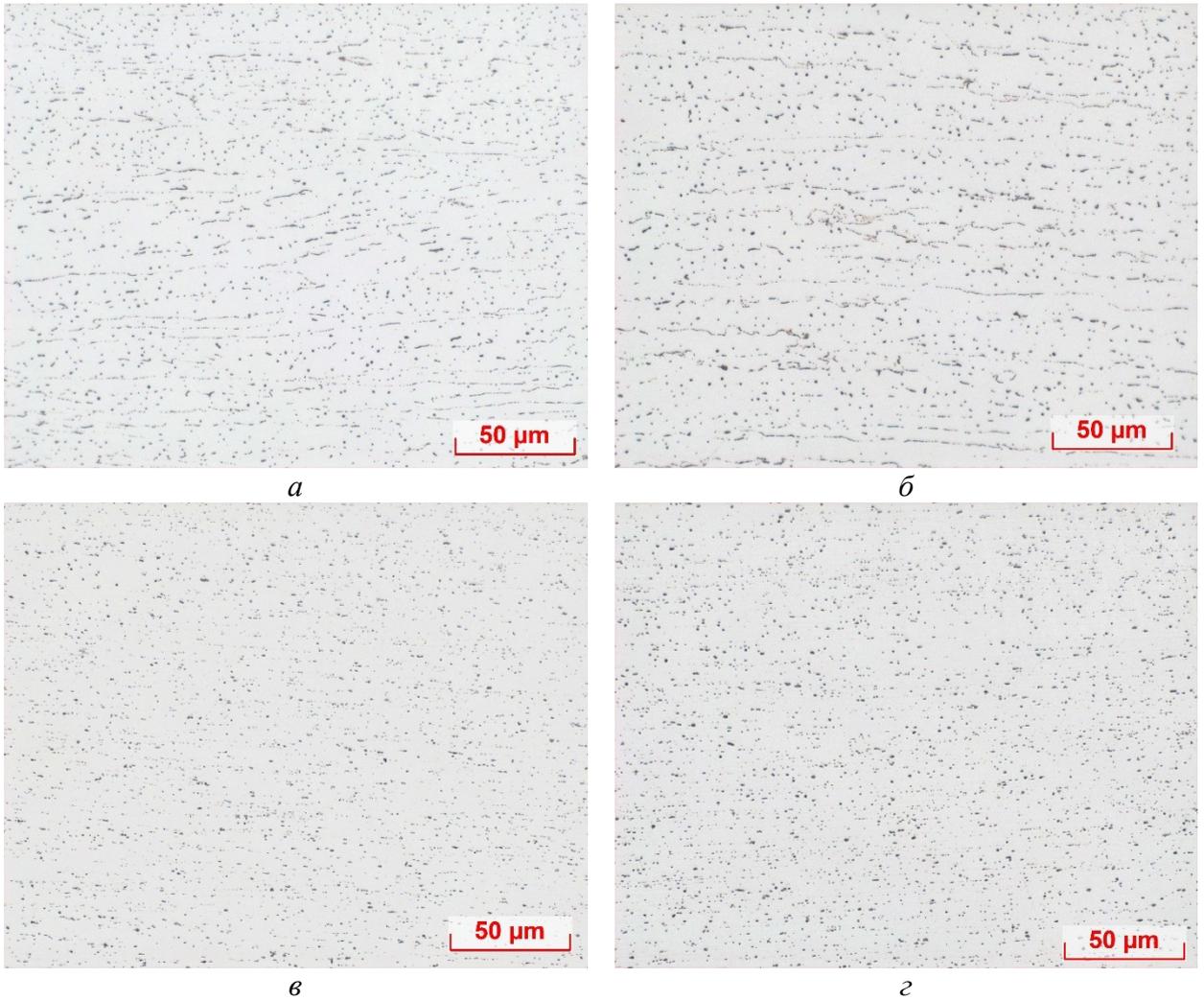


Рисунок 4.7 – Микроструктура прутков диаметром 9 мм (*а, б*) после ЭМК+СПП из заготовки диаметром 12 мм и проволоки диаметром 2 мм (*в, з*) при $T = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 200$:

а, в – $\omega = 4$ об/мин; *б, з* – $\omega = 8$ об/мин

Распределение частиц $\text{Al}_4(\text{Ce}, \text{La})$ в образце проволоки 2 мм из прутка 9 мм более однородное по сечению, а размер частиц несколько мельче (0,7 мкм) по сравнению с другими образцами проволоки, где средний размер фаз составляет 1,0-1,1 нм. В образце проволоки диаметром 2 мм из прутка 5 мм такая тенденция не прослеживается, структура практически не отличается от проволоки, полученной методом СПП.

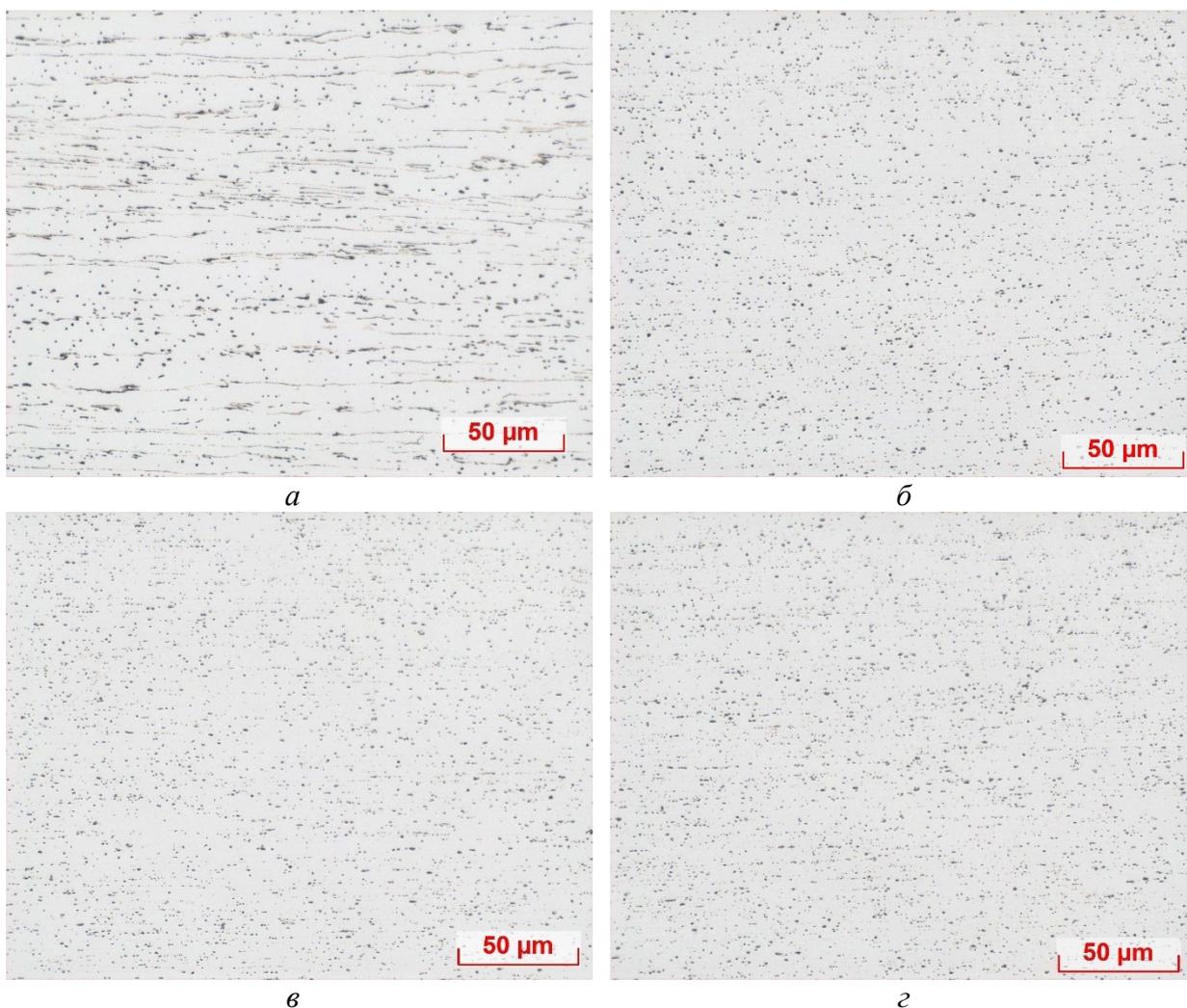


Рисунок 4.8 – Микроструктура прутков диаметром 5 мм (*a*, *б*), полученных СПП из заготовки диаметром 12 мм при $T = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$, и проволоки диаметром 2 (*в*, *г*) $\times 200$:

a, *в* – $\omega = 4$ об/мин; *б*, *г* – $\omega = 8$ об/мин

После отжига $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержке 1 ч проволока, полученная из прутка 5 мм по технологии ЭМК+СПП приобретает частично рекристаллизованную структуру (табл. 4.8), в то время как в проволоке с большей вытяжкой, полученной из прутка 9 мм, процессы рекристаллизации находятся только на начальной стадии (табл. 4.7).

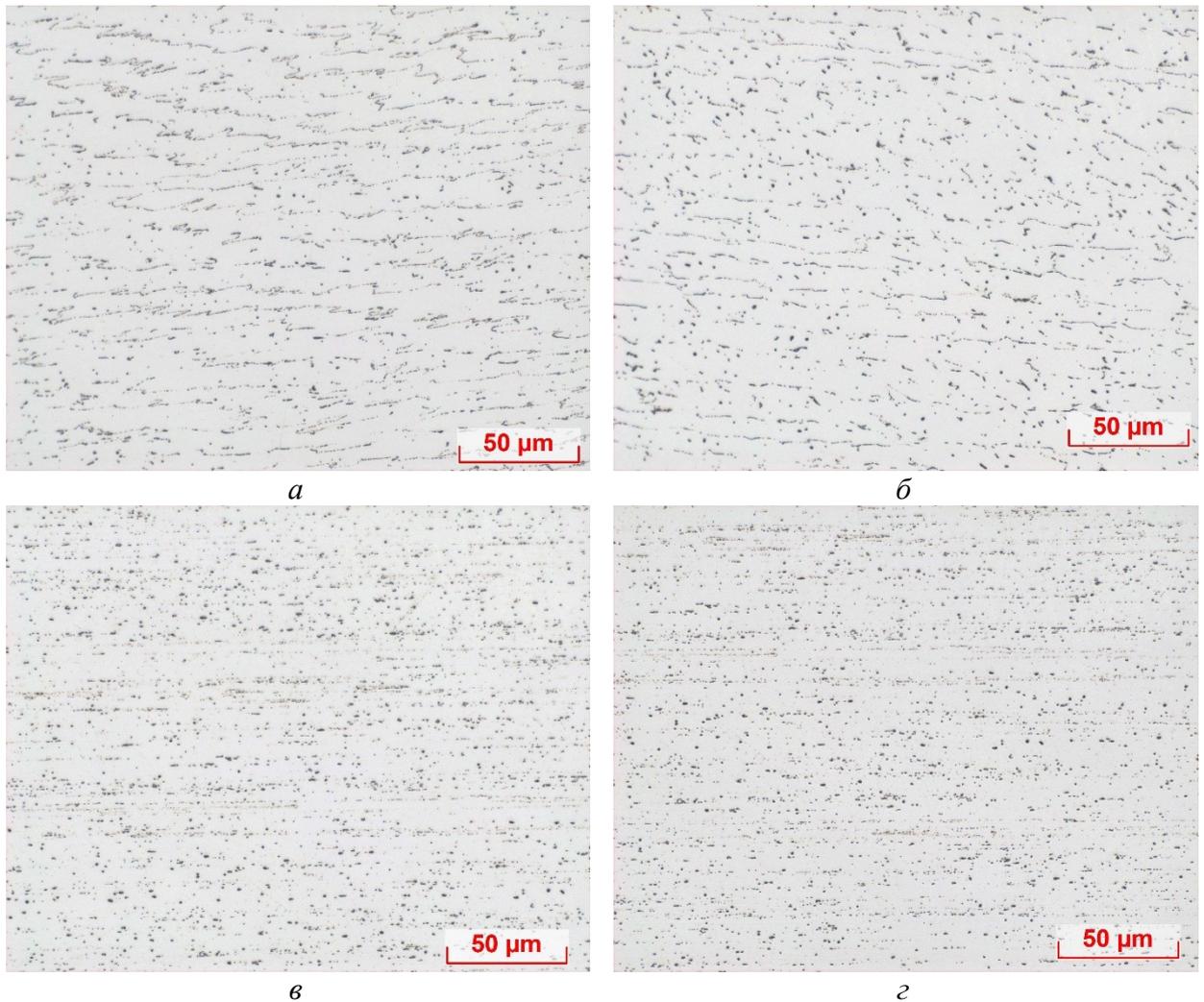


Рисунок 4.9 – Микроструктура прутков диаметром 9 мм (*а, б*), полученных СПП из заготовки диаметром 12 мм при $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, и проволоки диаметром 2 (*в, г*) $\times 200$:

а, в – $\omega = 4$ об/мин; *б, г* – $\omega = 8$ об/мин

При отжигах $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержке 1 ч и $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержке 10 ч для проволоки, полученной методом СПП, эта зависимость сохраняется. В проволоке, полученной методом СПП из прутка 9 мм, структура рекристаллизованная мелкозернистая и однородная по сечению (табл. 4.8), а в проволоке, полученной методом СПП из прутка 5 мм, в более деформированных периферийных слоях наблюдается некоторое увеличение зерна, что говорит о более интенсивном протекании процессов рекристаллизации (табл. 4.9).

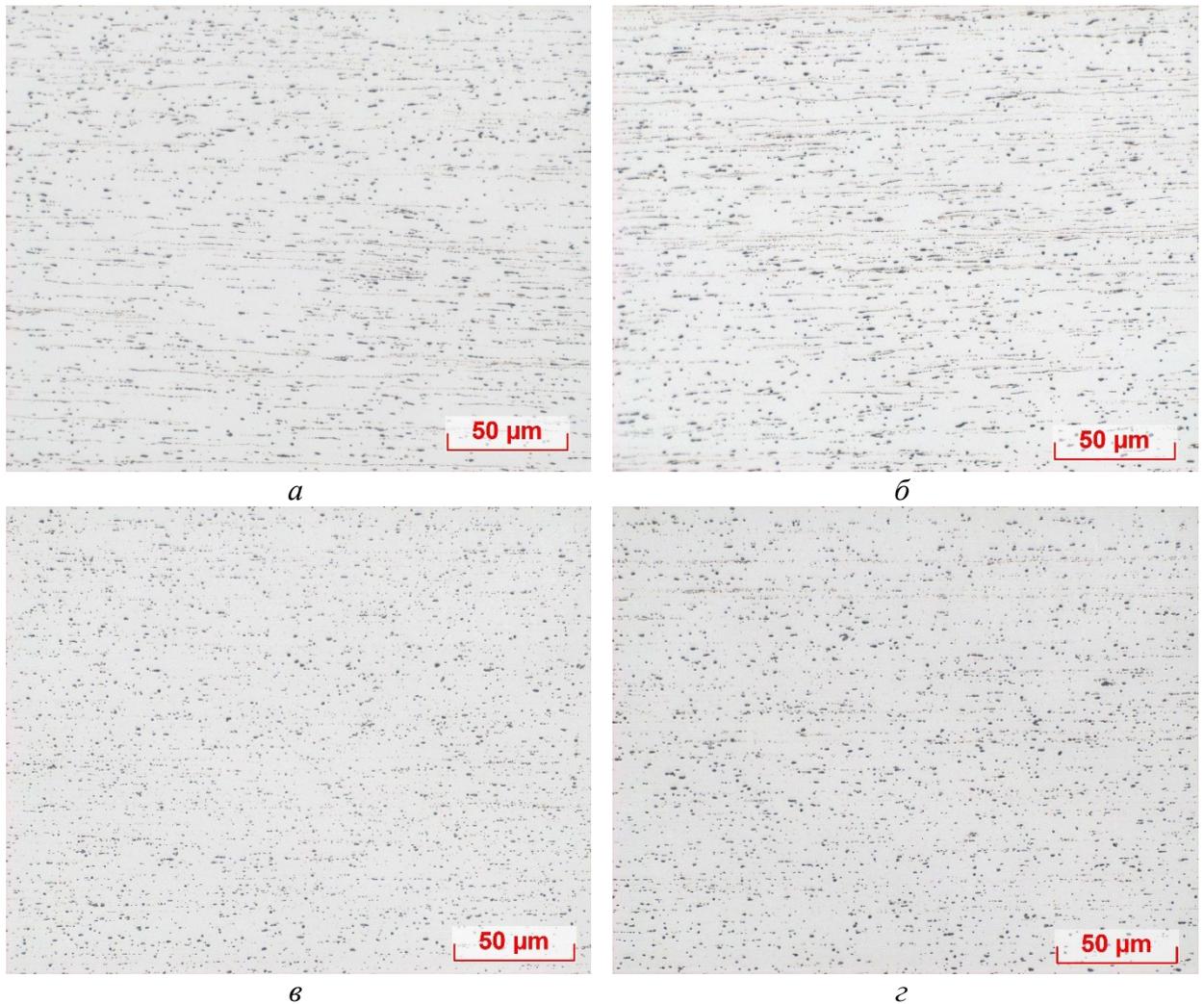


Рисунок 4.10 – Микроструктура прутков диаметром 5 мм (*а, б*), полученных СПП из заготовки диаметром 12 мм при $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, и проволоки диаметром 2 (*в, г*) $\times 200$:

$$a, в - \omega = 4 \text{ об/мин}; б, г - \omega = 8 \text{ об/мин}$$

В проволоке, полученной из прутка 5 мм, структура более мелкозернистая (табл. 4.9), в то время как в проволоке ЭМК+СПП из прутка 9 мм при отжиге $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержке 10 ч, наблюдается значительное укрупнение зерна в периферийной и центральной частях, что свидетельствует о начале прохождения вторичной рекристаллизации (табл. 4.9).

Таблица 4.8 – Микроструктура проволоки диаметром 2 мм из прутка диаметром 9 мм после термообработки

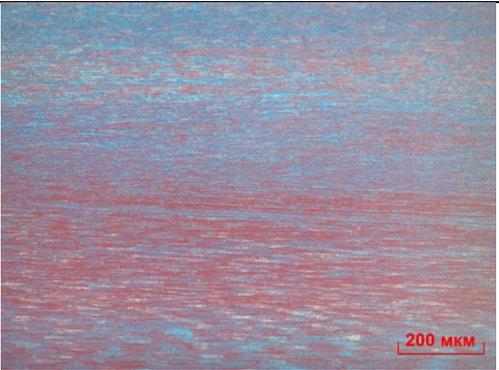
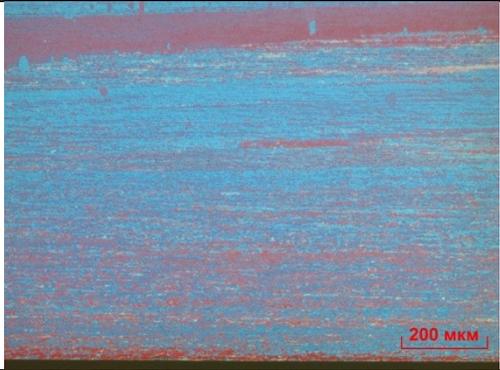
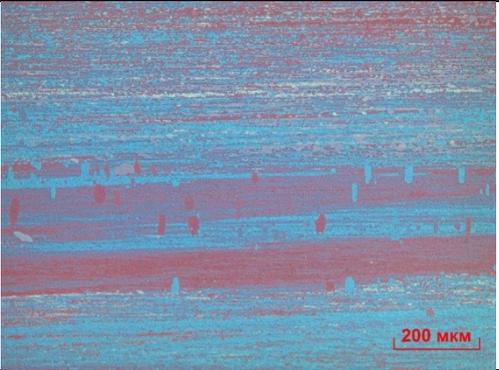
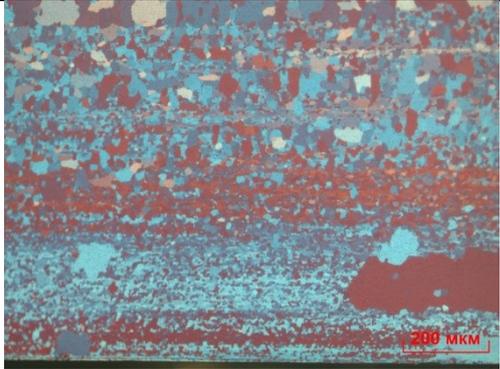
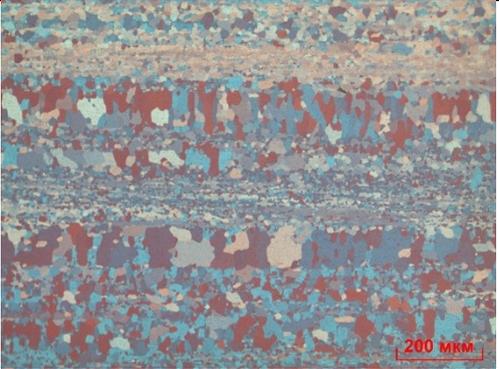
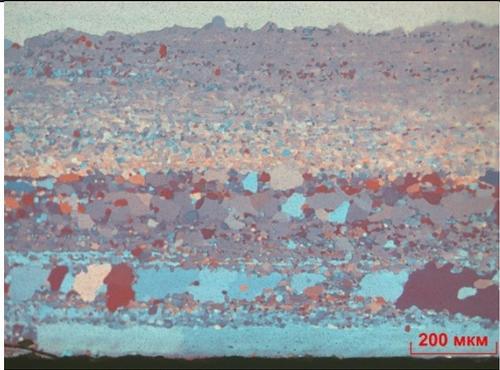
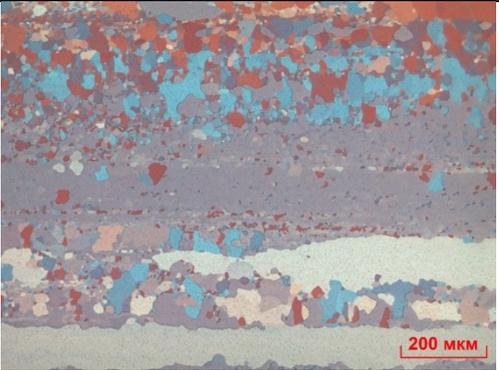
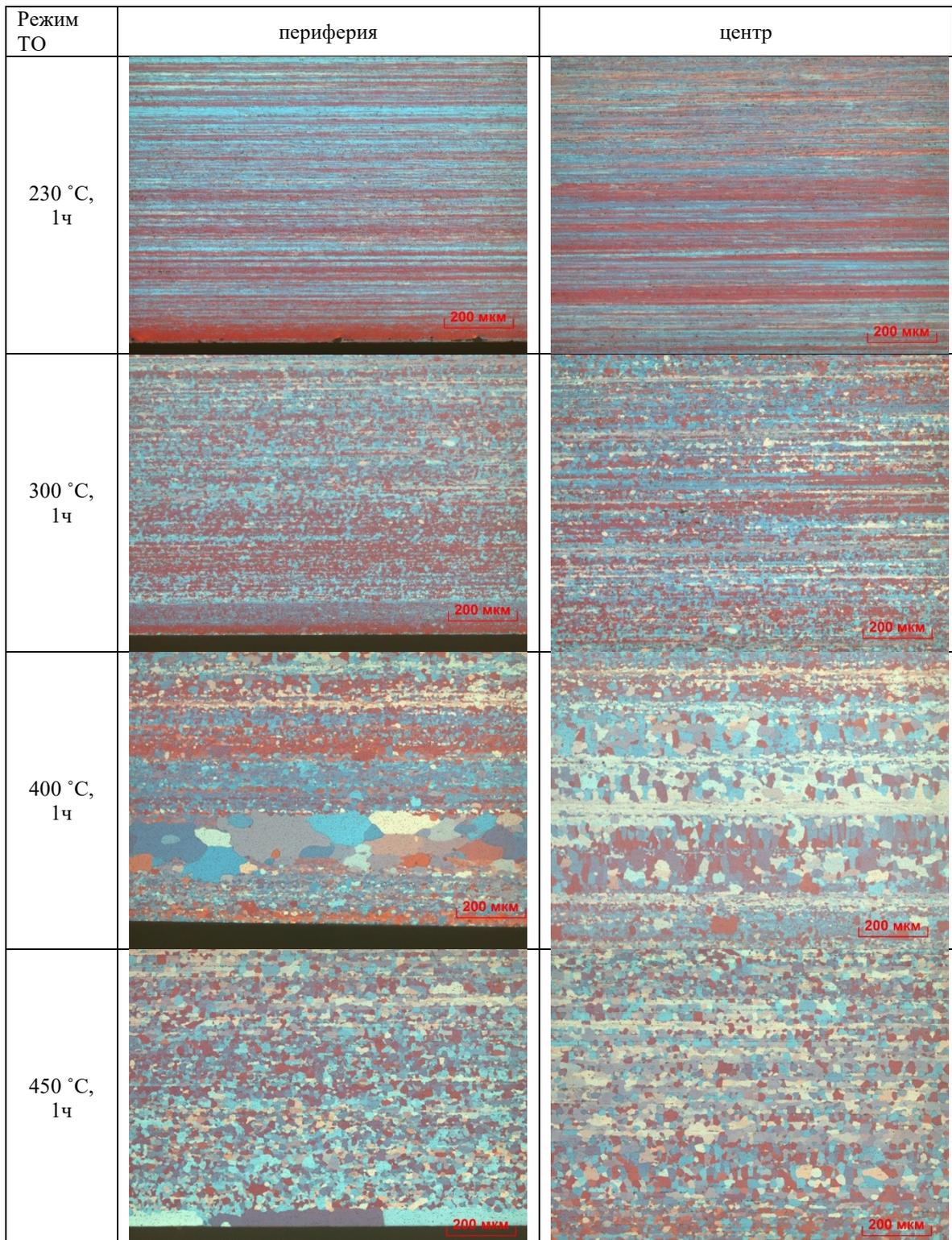
Режим ТО	периферия	центр
230 °С, 1ч		
300 °С, 1ч		
400 °С, 1ч		
450 °С, 10ч		

Таблица 4.9 – Микроструктура проволоки диаметром 2 мм из прутка диаметром 5 мм после термообработки



Стоит отметить, что в целом проволока, полученная методом СПП сохраняет более высокую термическую стабильность при нагревах 230-450 °С, это характеризуется более однородной и мелкозернистой структурой по сечению проволоки [235, 236].

4.5. Выводы по главе

Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Исследованы реологические характеристики непрерывно литых заготовок диаметром 12 мм, полученных из экспериментального сплава Al-PЗМ с добавлением редкоземельных металлов в количестве 1 %. Сформированы графики, отражающие зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости деформирования и степени деформации в предопределённом диапазоне, задаваемом условиями эксперимента.

2. Было выявлено, что у рассматриваемого сплава проявляется усиление скоростного упрочнения по мере повышения температуры испытания. В результате сопротивление деформации возрастает в 1,3 раза при 320 °С и в 2,3 раза при 550 °С.

3. На основе результатов компьютерного моделирования определены конструктивные параметры валкового и прессового инструмента, а также технологические режимы прокатки-прессования для последующего проведения экспериментальных исследований.

4. Используя разработанную компьютерную 3D модель процесса комбинированной прокатки-прессования, предназначенную для деформирования заготовки круглого сечения, полученной в электромагнитной кристаллизацией, были исследованы особенности изменения формы, распределение температур и напряжений, а также вычислены силовые параметры вдоль зоны деформации при изменении частоты вращения валков. В расчётах применялись данные о реологических свойствах экспериментального сплава.

5. Отлитые заготовки, полученные в электромагнитном кристаллизаторе, а также прутки, сформированные из них при помощи СПП, обладают значительной пластичностью. Благодаря этому возможно изготовление проволоки с диаметром 2 мм без необходимости проведения промежуточных отжигов.

6. Экспериментальные исследования получения проволоки диаметром 2 мм из опытного сплава выполнены с использованием разработанных технологических режимов: непрерывной отливки в ЭМК, непрерывного прессования методом СПП, волочения, а также промежуточных и финальных отжигов. Работы проводились в лабораторных и промышленных условиях.

7. Во всех фазах проведённых экспериментальных исследований выполнено исследование структуры металла. Обнаружены закономерные изменения временного сопротивления, относительного удлинения и удельного электрического сопротивления

исследуемых образцов в условиях горячей и холодной деформации в зависимости от параметров обработки.

8. Уровень прочностных характеристик горячепрессованных прутков находится в диапазоне 123-140 МПа, пластических - 14-26 %, а электросопротивления - от 0,0271 до 0,0301 Ом·мм²/м;

9. Установлено, что при деформации непрерывнолитой в ЭМК заготовки, имеющей мелкозернистую структуру, происходит измельчение зерен твердого раствора и вытягивание их в направлении деформации, кроме того установлено, что при изготовлении проволоки диаметром 2 мм опробованные режимы термомодеформационной обработки приводят к получению структуры с достаточно равномерным распределением вторичных фаз по объему проволоки.

10. Установлено, что при достаточно высоких характеристиках механических свойств, значения электросопротивления для проволоки диаметром 2 мм после холодной деформации выше, чем у прутков, полученных горячей деформацией, поэтому для получения комплекса свойств, соответствующих действующим стандартам, необходимо применение отжига при температуре 230 °С и выдержке 1 час.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ АІ-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ

В этой главе представлены итоги экспериментального изучения процесса бесслитковой прокатки и прессования. Целью работ в данной главе являлось получение длинномерных деформированных полуфабрикатов (прутков и проволоки) из сплава системы АІ-РЗМ с повышенным содержанием редкоземельных элементов (церия и лантана) до 7 % (сплав 01417) и до 1%. Материалы главы опубликованы в работах [1, 210, 222-224, 227, 230-232].

5.1. Методика проведения экспериментальных исследований методом БПП

Принципиальная схема, предназначенная для реализации экспериментальных исследований, приведена на рисунке 5.1.

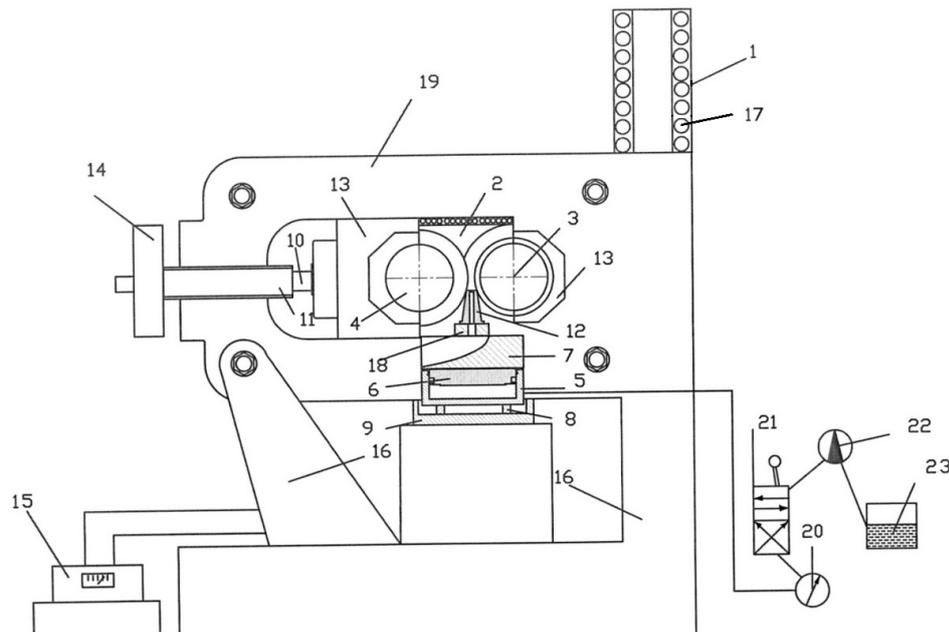


Рисунок 5.1 – Схема установки совмещенного литья-прокатки-прессования: 1 – печь приготовления расплава или нагрева заготовок; 2 – заливочное устройство; 3 – валок с выступом; 4 – валок с канавкой; 5 – гидроцилиндр; 6 – плунжер; 7 – подставка; 8 – месдоза под матричным блоком; 9 – опора матричного блока; 10 – месдозы под нажимными винтами; 11 – нажимной винт; 12 – матрица; 13 – подшипники скольжения; 14 – штурвал-шестерня; 15 – тензометрическая аппаратура; 16 – опоры; 17 – селитовые нагреватели; 18 – матрицедержатель; 19 – станина; 20 – манометр; 21 – двухпозиционный гидрораспределитель с ручным управлением; 22 – ручной насос МР01/1; 23 – бак с маслом

Для реализации процесса БПП использовали нагрев металла, помещенного в тигель в печи 1. Технические характеристики установки приведены в соответствии с таблицей 5.1.

Таблица 5.1 – Технические характеристики установки совмещенной обработки

№	Параметры	Единицы измерения	Значения
1.	Количество оборотов вала	об/мин	4, 8, 14
2.	Передаточное число редуктора	-	40
3.	Начальный диаметр вала	мм	200
4.	Диаметр шейки вала	мм	100
5.	Длина бочки вала	мм	240
6.	Мощность электродвигателя	кВт	40

Кинематическая схема устройства для поджима матрицы к валкам представлена на рисунке 5.2.

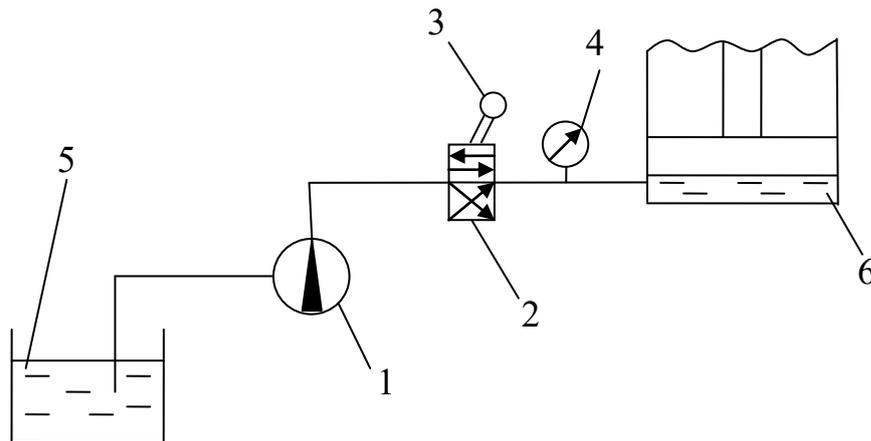


Рисунок 5.2 – Кинематическая схема устройства для поджима матрицы к валкам: 1 – ручной насос МР01/1; 2 – двухпозиционный гидрораспределитель с ручным управлением; 3 – рычаг переключения позиций гидроцилиндра; 4 – манометр; 5 – бак; 6 – гидроцилиндр с поршнем

Устройство состоит из ручного насоса модели МР01/1, развивающего номинальное и максимальное давление, соответственно, 250 и 500 атм., двухпозиционного гидрораспределителя, гидроцилиндра (внутренний диаметр цилиндра $d_b = 180$ мм) с поршнем, манометра для измерения давления и бака для закачки и слива масла.

Процесс поджима осуществляли в следующем порядке. Рычаг 3 гидрораспределителя 2 устанавливали в крайнее левое положение, при этом открывается впускной канал и запирается

выпускной. Ручным насосом 1 из бака 5 масло закачивали в гидрораспределитель и затем в гидроцилиндр 6. С помощью манометра 4 устанавливали необходимое давление поджима.

После окончания процесса прессования сбрасывали давление в гидроцилиндре, для этого рычаг 3 устанавливают в крайнее правое положение, в результате чего в гидрораспределителе открывается выпускной канал и масло сбрасывается в бак 5.

Спроектированная установка обеспечила проведение ряда экспериментов по изучению влияния размеров поперечного сечения калибра на силовые условия процесса при варьировании заданных параметров. Рабочая клетка установки представляла собой две стальные станины закрытого типа, скрепленные между собой стяжными болтами и смонтированные на общем основании с двигателем, коробкой передач, редуктором и шестеренной клетью.

В подушках на бронзовых подшипниках скольжения установлены оси, на которых смонтированы различные конструкции валкового инструмента в соответствии с типом калибра. Рабочий инструмент (валки) изготовлен из стали 5ХНМ и термообработан до твердости HRC 48-50. Устройство для уравнивания валков, применяемое на данном стане, пружинное. Установка зазора между валками производится с помощью шестерни через систему зубчатых передач, позволяющую производить совместное и раздельное вращение нажимных винтов.

Для проведения опытов методом СПП был разработана следующая методика. В электрической печи сопротивления одновременно нагревали несколько заготовок до заданной температуры (480-550 °С) и выдерживали 10-15 минут. Температуру нагрева заготовок контролировали хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-3. Одновременно осуществляли нагрев валков до максимальной температуры 80-100 °С при помощи специальной печи, выполненной в виде кожуха по форме валков и снабженного нихромовыми нагревателями. После нагрева заготовок и валков до необходимой температуры приводили во вращение валки установки со скоростью 4 и 8 об/мин.

Эксперименты проводили в следующей последовательности. После того, как произошел захват заготовки валком с выступом 3 и валком с канавкой 4, тензометрическая аппаратура 15 фиксирует силу, оказываемое металлом на валки с помощью месдоз 10. Далее металл заготовки попадает в калибр и достигает матрицы 12, смонтированной на матрицедержателе 18. С помощью гидроцилиндра 5 и плунжера 6 матрица плотно поджата к валкам снизу. Металл распрессовывается, заполняя калибр в зоне распрессовки. Затем, за счет постоянного поступления металла в калибр – металл выпрессовывается через канал матрицы в виде прутка. Сила на матрице фиксируется тензометрической аппаратурой, с использованием месдозы 8.

Для осуществления экспериментальных исследований были спроектированы прессовый, валковый узлы и нагревательное устройство для подогрева валков и матричного узла, а также

смонтирована тензометрическая аппаратура для замера основных энергосиловых параметров (рисунок 5.1).

Опыты по методу БПП проводили по следующей методике. Металл, расплавленный в тигле с помощью печи 1, захватывается валками 3 и 4. В процессе работы регулятор 2 дозирует количество металла, подаваемого в калибр валков, уменьшая или увеличивая поток расплава. При этом на поверхностях водоохлаждаемых валков 3,4 начинается кристаллизация металла. Далее закристаллизовавшийся в виде заготовки металл обжимается в закрытом калибре, распрессовывается перед матрицей 7 и выдавливается в калибрующее отверстие матрицы с образованием пресс-изделия заданной формы и размеров. Выходной конец движущегося пресс-изделия попадает в направляющие ролики 10, которые изменяют его направление движения на 90 градусов и передают на моталку 11, где производится смотка в бухту.

Скорость валков в опытах изменялась на двух уровнях: 4 и 8 об/мин, а температура расплава также на двух уровнях: 750 и 780 °С. Далее полученные пресс-изделия подвергались испытаниям по определению механических свойств и исследованиям структуры металла.

Металлографические исследования проводили на световом микроскопе Axio Observer.A1m, Carl Zeiss и растровом электронном сканирующем микроскопе «EVO 50», Carl Zeiss с энергодисперсионным микроанализатором Inca Energy 350. Для исследований механических свойств деформируемых полуфабрикатов использовали универсальную электромеханическую машину LFM 400 усилием 400 кН.

5.2. Результаты экспериментальных исследований по получению прутков из сплава 01417 методом БПП и разработка новой технологии получения проволоки из этих прутков

Путем экспериментальных исследований было изучено влияние температуры и скорости деформации на структуру и свойства прутков полученных БПП. Прутки получали при температурах расплава $T_p = 750$ °С и $T_p = 780$ °С и скоростях деформации $0,74$ с⁻¹ и $1,49$ с⁻¹. Структуры полуфабрикатов представлены на рисунках 5.3 и 5.4.

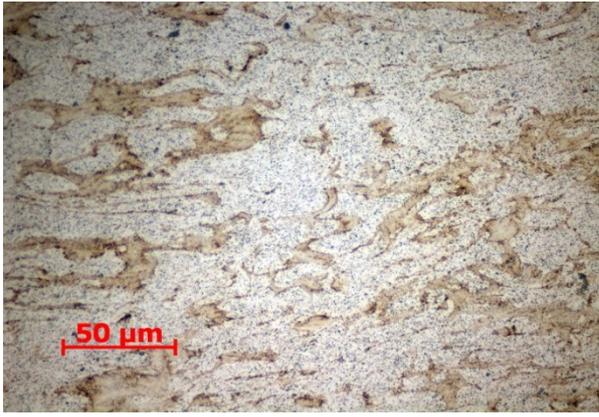
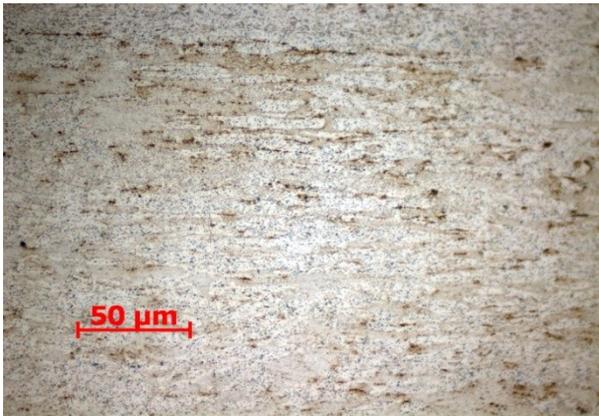
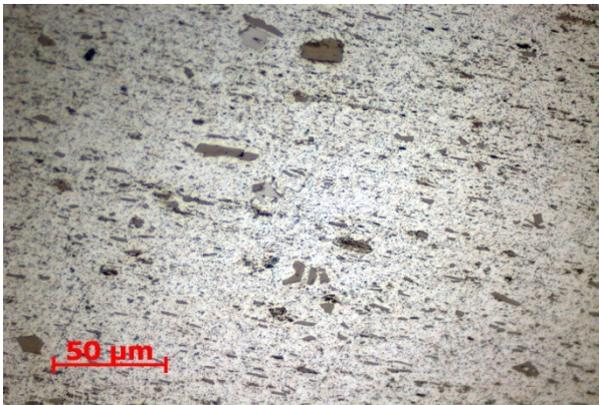
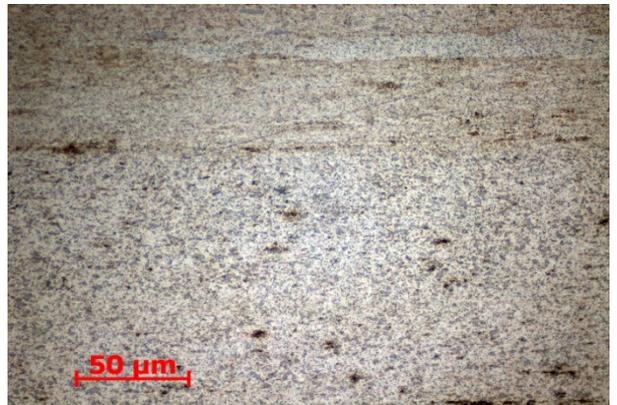
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 5.3 – Микроструктура прутков, полученных методом БПП при температуре 750 °С, диаметры: *a, б* – 9 мм, *в, г* – 7 мм, *д, е* – 5 мм, скорость деформации: *a, в, д* – 0,74 с⁻¹, *б, г, е* – 1,49 с⁻¹

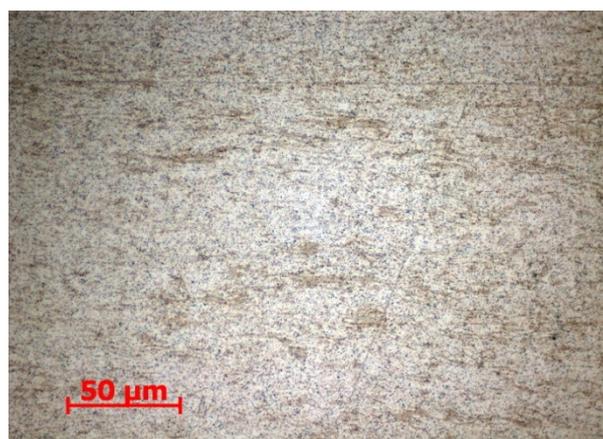
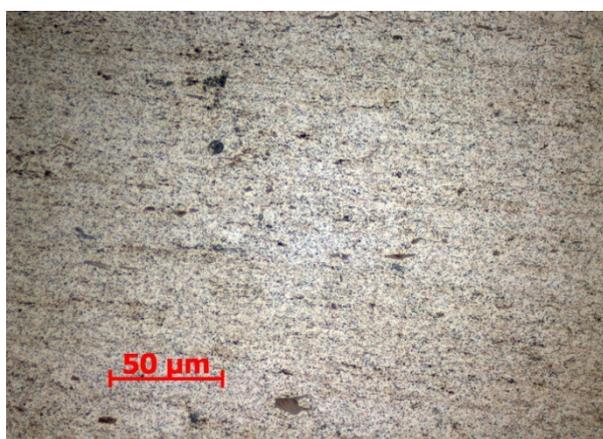
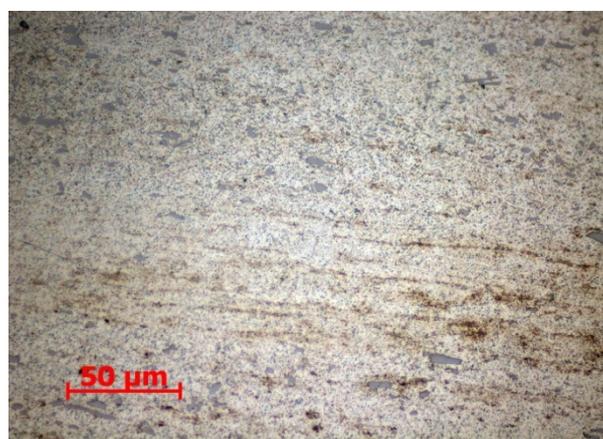
*a**б**в**г**д**е*

Рисунок 5.4 – Микроструктура полуфабрикатов, полученных методом БПП при температуре 780 °С, диаметры: *a, б* – 9 мм, *в, г* – 7 мм, *д, е* – 5 мм, скорость деформации: *a, в, д* – $0,74 \text{ с}^{-1}$, *б, г, е* – $1,49 \text{ с}^{-1}$

Металлографический анализ показал, что полученная структура не однородна. Деформация с разными скоростями приводит к формированию сильно отличающейся структуры

в крайних зонах прутков и центральных частей. В крайних зонах наблюдается однородное распределение мелких частиц по твердому раствору.

В центральных зонах наблюдаются светлые участки α твердого раствора и темные участки эвтектики ($\alpha + Al_4M$) (см. рис. 5.3). При температуре 780 °С неоднородность в различных слоях прутков менее выражена (см. рис. 5.4). В прутках диаметром 5мм наблюдаются крупные частицы следующими размерами от 9×3 мкм до 15×7 мкм. Скорее всего, это связано с большими скоростями охлаждения металла и высокими степенями деформации. Наиболее оптимальная структура прутков получается при температуре деформации 780 °С и скорости 1,49 с⁻¹.

Как видно из экспериментальных данных, приведенных в таблице 5.2, силы на валках и матрице увеличиваются с ростом коэффициента вытяжки. С увеличением температуры нагрева заготовки силы на валках и матрице уменьшаются. С ростом скорости деформации силы на валках и матрице снижаются. То есть сохраняется та же закономерность, как и при использовании метода СПП.

Таблица 5.2 – Результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров экспериментального сплава по методу БПП

Параметры		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$			$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		
		$\mu = 4,8$	$\mu = 8,0$	$\mu = 15,7$	$\mu = 4,8$	$\mu = 8,0$	$\mu = 15,7$
$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$	$P_{\text{вал}}, \text{кН}$	372,5	384,3	397,3	291,3	305,8	321,9
	$P_{\text{матр}}, \text{кН}$	267,1	298,0	367,4	230,9	254,2	315,2
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$	$P_{\text{вал}}, \text{кН}$	350,2	376,8	382,5	262,2	281,9	303,4
	$P_{\text{матр}}, \text{кН}$	225,2	255,7	333,1	187,5	215,7	269,5

Механические свойства прутков, полученных совмещенной прокаткой-прессованием, приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Механические свойства полуфабрикатов (временное сопротивление и относительное удлинение), полученных методом БПП

Параметры		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$			$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		
		$\mu = 4,8$	$\mu = 8,0$	$\mu = 15,7$	$\mu = 4,8$	$\mu = 8,0$	$\mu = 15,7$
$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$	$\delta, \%$	13,3	13,5	12,8	13,5	12,8	11,9
	$\sigma_b, \text{МПа}$	212	238	253	212	232	242
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$	$\delta, \%$	10,2	10,5	9,6	11,7	10,6	10,3
	$\sigma_b, \text{МПа}$	199	226	247	192	218	232

Из таблицы 5.3 видно, что изменение технологических параметров сказалось на механических свойствах. С увеличением скорости деформации, в отличие от метода СПП,

уменьшается пластичность металла прутков. Также пластические характеристики почти не увеличиваются с ростом температуры заготовки. Временное сопротивление прутков, полученных по методу БПП, составляет в среднем 190-250 МПа, а относительное удлинение 10-14 %.

Графики зависимости механических свойств (временного сопротивления и относительного удлинения) прутков, полученных методом БПП, приведены на рис. 5.5, 5.6. Для сравнения на тех же рисунках показаны значения механических свойств прутков, полученных из экспериментального сплава методом СПП.

Из рисунка 5.5 становится ясно, что у прутков, полученных методом БПП, прочность на разрыв в среднем уступает на 60–80 МПа прочности прутков, произведенных методом СПП. Относительное удлинение (см. рис. 5.6) показывает уменьшение: на 6–10 % при коэффициенте вытяжки от 4,8 до 8, и на 2–5 % при коэффициенте вытяжки от 8 до 15,7.

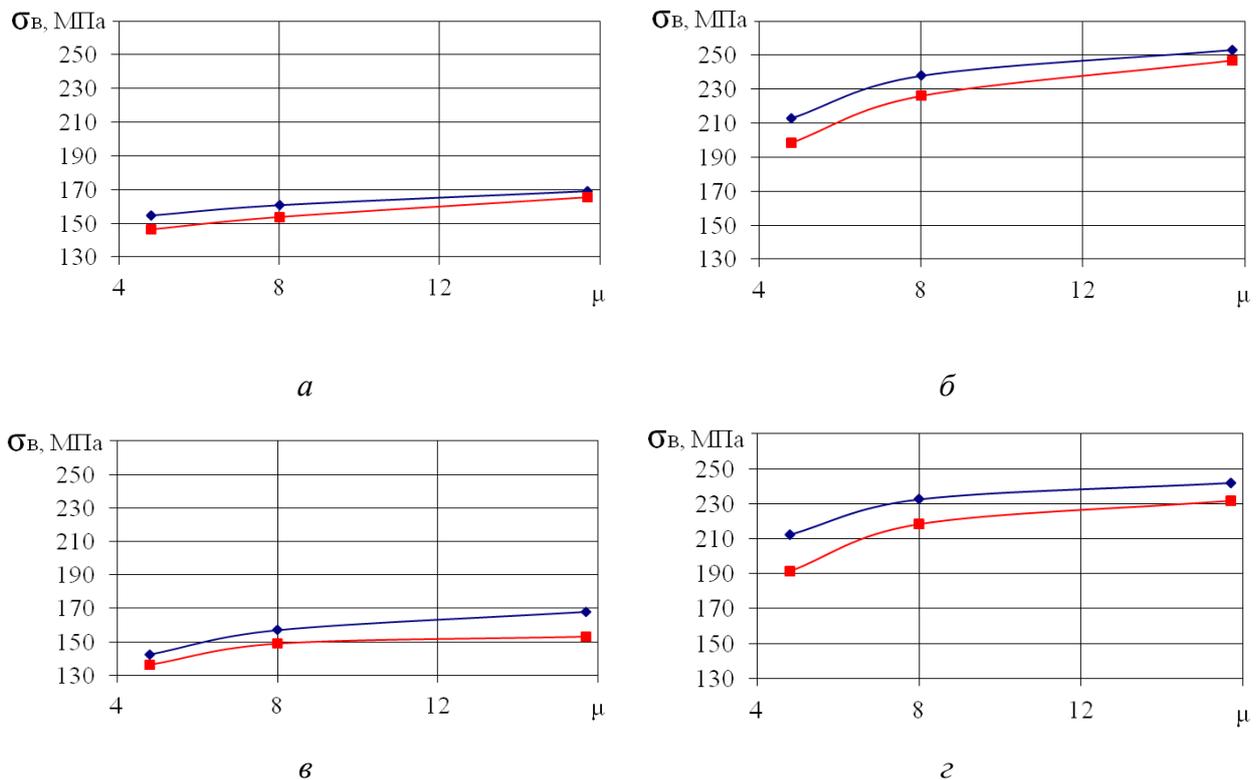


Рисунок 5.5 – Графики зависимости временного сопротивления от коэффициента вытяжки для прутков из экспериментального сплава; а, в – по методу БПП, температура расплава $T_p = 750$ и $T_p = 780$ °С соответственно; б, г – по методу СПП, температура заготовки 480 и 550 °С соответственно;

—♦— и —■— – экспериментальные значения при $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ и $1,49 \text{ с}^{-1}$ соответственно

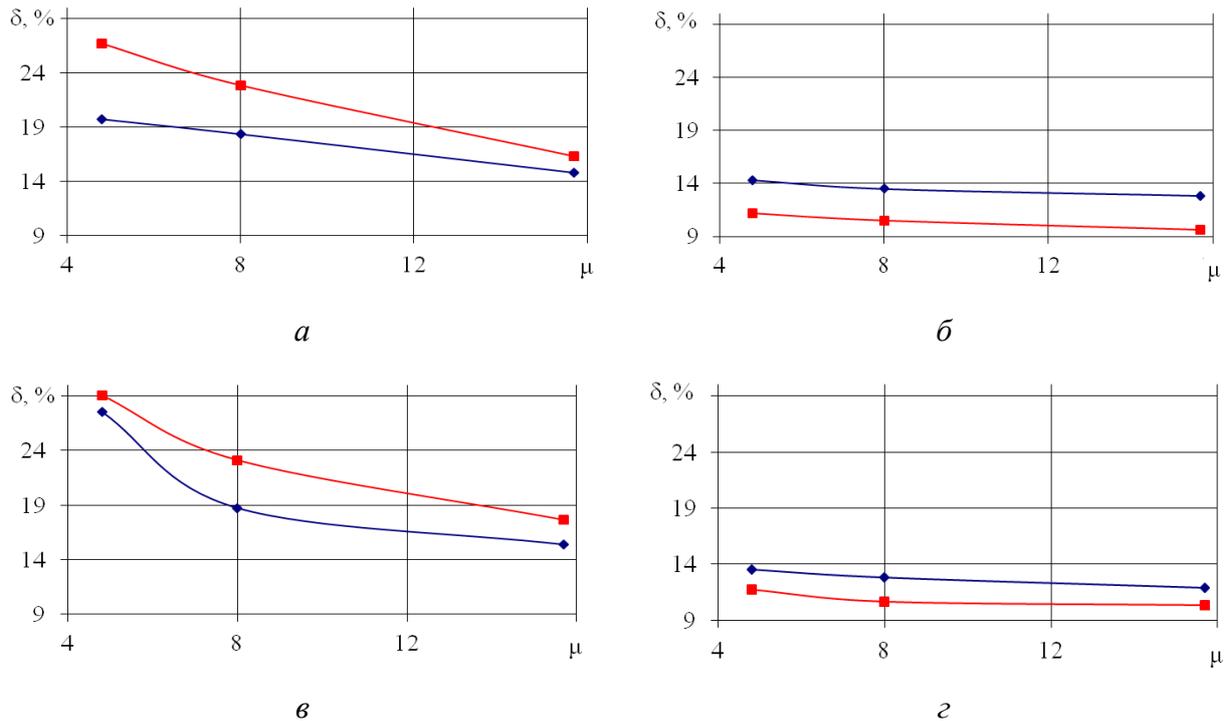


Рисунок 5.6 – Графики зависимости относительного удлинения от коэффициента вытяжки для прутков из экспериментального сплава; а, в – по методу БПП, температура расплава $T_p = 750$ и $T_p = 780$ °С соответственно; б, г – по методу СПП, температура заготовки 480 и 550 °С соответственно;

◆ и ■ – значения при $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ и $1,49 \text{ с}^{-1}$ соответственно

Сравнив прочностные и пластические характеристики прутков, полученных по методам СПП и БПП, можно сделать вывод, что в целом прутки, полученные методом БПП более пластичны. Это может быть объяснено тем, что однородное мелкозернистое строение заготовки из ЭМК, применяемой для деформации, благоприятно сказывается на показателях прочностных и пластических свойств на более поздних этапах деформирования, а в процессе БПП частично сохраняется неоднородная структура металла.

В процессе разработки технологии были отработаны различные режимы получения литых и деформированных полуфабрикатов.

Реализация технологии получения проволоки заключалась в следующем:

1. Приготовление расплава заданного химического состава.
2. Бесслитковая прокатка-прессование подразумевала подачу расплавленного металла в калибр нагретых до температуры $T = 100$ °С валков. Далее происходило выдавливание материала, формирование прутков с варьирующимся диаметром. Визуальный осмотр поверхности был обязателен, как и отбор проб. Пробы предназначались для анализа микроструктуры готового прутка, а также для изучения его механических характеристик.

3. Последующим этапом являлась холодная сортовая прокатка, в результате которой получалась заготовка, имеющая диаметр 1 мм.

4. Заключительный этап - волочение прессованной заготовки до конечного размера 0,3 мм. Параллельно осуществлялся отбор образцов для механических испытаний, равно как и для проведения металлографического анализа.

На первом этапе разработки технологии ставилась цель проверить принципиальную возможность реализации процесса совмещенной прокатки-прессования сплавов системы Al-P3M при заданных параметрах технологического процесса.

На втором этапе последовательно обрабатывались нескольких заготовок с целью получения пресс-изделий большой длины за счет сварки заготовок в очаге деформации.

Третий этап заключался в подборе рациональных технологических режимов БПП и изготовлении проволоки диаметром 0,3 мм. В ходе эксперимента были зафиксированы следующие параметры технологического процесса: температура расплава, обозначенная как T , составляла 780 °С; температура затвердевшей заготовки, находящейся в валках, равнялась $T = 550$ °С; частота вращения валков – 4 оборота в минуту (соответствующая скорость деформации металла $\xi = 0,74$, с-1); степень вытяжки при прессовании, обозначенная μ , составила 8,0 (что привело к получению прутка диаметром 7 мм).

Далее, полученные прутки, имеющие диаметры 9, 7 и 5 мм и изготовленные методом БПП, подвергались деформации на сортовом прокатном стане, модели «Mario di Maio» LG 200, произведенном той же фирмой, с целью снижения их размеров в поперечнике. В результате чего была получена катанка квадратного сечения с размерами 2,2×2,2 мм. Калибровка валков прокатного стана имеет следующие сечения со стороной квадрата: 9,2 – 8,3 – 7,5 – 6,8 – 6,2 – 5,5 – 5,0 – 4,5 – 4,2 – 3,7 – 3,4 – 3,1 – 2,8 – 2,6 – 2,4 – 2,2 – 2,0 – 1,8 – 1,6 – 1,5 – 1,4 – 1,3 – 1,2 – 1,1 – 1,0 мм.

На следующем этапе производства полученную катанку протягивали в холодном состоянии, чтобы получить проволоку, имеющую диаметр 0,3 мм. Для этого была разработана технологическая схема волочения проволоки из сплава, который был получен экспериментальным путём. Процесс проходил на десятикратной волочильной машине, имеющей скольжение при работе (тип машины «Т 10 N.F.S.»). Исходный диаметр проволоки составлял 1,0 мм, а конечный – 0,3 мм. На рисунке 5.7 представлена схема, отображающая расположение тянущих и направляющих конусов волочильной машины. В таблице 5.4 приведены основные технические характеристики этого оборудования.

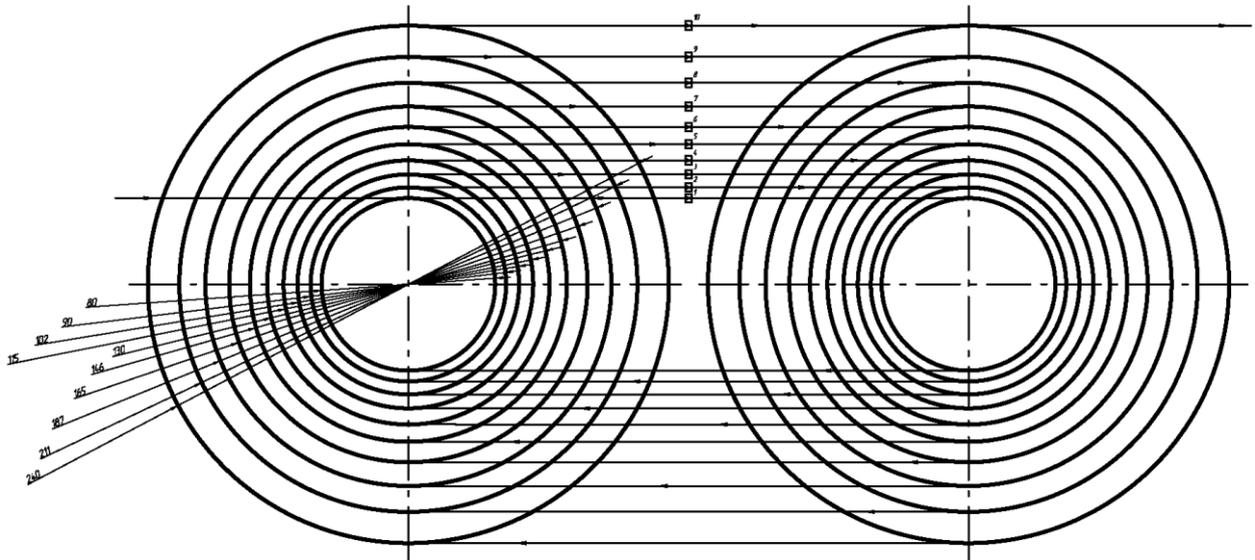


Рисунок 5.7 – Схема тянущих и направляющих конусов десятикратной волочильной машины со скольжением «Т 10 N.F.S.»

Таблица 5.4 – Основные технические характеристики волочильной машины «Т 10 N.F.S.»

Характеристика	Значение
Мощность главного мотора	7,36 кВт
Мощность мотора приспособления для волочения	0,37 кВт
Мощность мотора насоса смазки	0,01 кВт
Максимальная скорость волочения	250 м/мин
Количество проходов волочения	10
Постоянное удлинение проволоки	13 %
Максимальный диаметр намотки	250 мм
Максимальный начальный диаметр проволоки	2 мм
Минимальный (конечный) диаметр проволоки	0,15 мм

Основные формулы и параметры приведены ниже. В соответствии с ней для расчета напряжений волочения по проходам использовалась формула

$$\sigma_i^{\text{гол}} = \sigma_{i-1}^{(B)} \cdot k_i^{\text{гол}}, \quad (5.1)$$

где $k_i^{\text{гол}}$ – коэффициент напряжения волочения в соответствующем i -ом проходе, вычисляемый по формуле:

$$k_i^{\text{гол}} = \left\{ \frac{m(\lambda_i - 1)}{2(m - \cos \alpha)} \cdot \left[\lambda_i + \frac{k_i^{\text{нп}} \cdot \frac{m - \cos \alpha}{m} - 0,5\lambda_i(\lambda_i - 1)}{1,5\lambda_i - \lambda_i^{3/2} \cdot \frac{\cos \alpha}{m} - 0,5} \right] + \frac{m}{3} \cdot \left[\sin \gamma_0 + \frac{k_i^{\text{нп}}}{\lambda_i^{1/2}} \cdot \sin \gamma_k \right] \right\}, \quad (5.2)$$

где i – номер прохода (перехода волочения);

$\sigma_{i-1}^{(B)}$ – временное сопротивление обрабатываемого металла для i -го прохода.

Коэффициент запаса прочности процесса в i -ом проходе рассчитывался по формуле:

$$\eta_i^{зан} = \frac{\sigma_{i-1}^{(B)}}{\sigma_i^{вол}} = \frac{k_i^{ynp}}{k_i^{вол}}, \quad (5.3)$$

где $k_i^{ynp} = \frac{\sigma_i^{(B)}}{\sigma_{i-1}^{(B)}}$ – коэффициент упрочнения металла в i -ом проходе.

Для выполнения расчета переходов волочения использовали следующие данные:

- коэффициент трения $tg\gamma_0=0,09$, откуда $\gamma_0=5,142764558^\circ$

- $tg\gamma_{Ki}$, γ_{Ki} – коэффициент трения и угол трения на выходе из рабочей зоны волоки в i -ом проходе, определенные по формуле:

$$tg\gamma_{Ki} = \frac{\lambda_i^{1/2}}{ctg\gamma_0 - (\lambda_i^{1/2} - 1)ctg\alpha}, \quad (5.4)$$

где $\lambda_i = \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}$ – коэффициент вытяжки;

d_{i-1} , d_i – размеры проволоки соответственно до и после деформации в i -ом проходе;

- полуугол рабочей зоны волоки α при среднем коэффициенте трения $tg\gamma_{cp} = 0,10$, при средней степени логарифмической деформации $ln\lambda_{cp}=0,22$ для алюминиевых сплавов и вычисленный как оптимальный по всему маршруту волочения по формуле:

$$\alpha = \sqrt{1,5 \cdot tg\gamma_{cp} \cdot \ln \lambda_{cp}} = 0,18 \text{ рад} \approx 10^\circ = \text{const}; \quad (5.5)$$

Относительную скорость скольжения при движении проволоки и поверхности тяговой шайбы определяли по выражению

$$S_i^{омн} = \frac{S_i^{abc}}{V_i^{uv}} \cdot 100, \%. \quad (5.6)$$

Параметр, обратный коэффициенту неравномерности деформации, независимый от величины последнего:

$$m = \frac{\sin(\alpha + \gamma_0)}{\sin \gamma_0} = 2,94 = \text{const} \quad (5.7)$$

Используя паспортные данные волочильной машины, определяли также скорость протягиваемой проволоки и окружные скорости тяговых шайб по проходам для поиска коэффициентов относительного скольжения S_i и коэффициентов относительного опережения:

$$k_i^{oper} = \frac{\lambda_i^{ном}}{\lambda_i^{кин}} \quad (5.8)$$

Для назначения номинальных коэффициентов вытяжки по проходам $\lambda_i^{ном}$ использовали значения кинематических коэффициентов вытяжки волочильной машины $\lambda_i^{кин}$, которые соответствуют паспортным данным стана «Т 10 N.F.S.». Кроме того, необходимо учитывать линейную (окружную) скорость намотки проволоки на приемный барабан и его диаметр, которые равны соответственно 250 м/мин и 250 мм.

Механические свойства протягиваемого сплава задавали из экспериментальных данных, определяющих их значения в зависимости от диаметра проволоки в расчетном размере.

Рассчитанный режим волочения приведен в табл. 5.5. С его использованием были получены образцы проволоки диаметром 0,3 мм из исследуемого сплава (рис. 5.8).

Следует отметить, что для получения проволоки не потребовались отжиги.

Механические свойства полуфабрикатов по технологическим переделам приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.5 – Режимы волочения проволоки из экспериментального сплава по переходам и размеры полуфабрикатов

№ про-хода	d_i^{np} , мм	$\sigma_i^{(B)}$, МПа	V_i^{np} , м/с	$S_i^{скольж}$, %	$\lambda_i^{кин}$	$\lambda_i^{ном}$	$k_i^{упр}$	k_i^{oper}	$k_i^{вол}$	$\eta_i^{зан}$	$\sigma_i^{вол}$, МПа	$P_i^{вол}$, Н	$N_i^{вол}$, Вт
1	0,73	382	0,703	49,3	1,00	1,20	1,04	1,20	0,45	2,24	171	69,3	50,2
2	0,65	408	0,855	43,2	1,13	1,26	1,07	1,12	0,56	1,90	215	71,2	63,2
3	0,58	424	0,258	37,0	1,33	1,26	1,04	1,11	0,55	1,89	224	59,1	65,9
4	0,52	431	0,321	31,1	1,14	1,24	1,02	1,09	0,53	1,93	223	47,4	68,3
5	0,47	440	0,393	24,8	1,12	1,22	1,02	1,09	0,50	2,04	215	37,4	61,2
6	0,42	448	0,492	16,7	1,13	1,25	1,09	1,09	0,54	1,89	236	32,7	61,2
7	0,38	454	0,601	9,9	1,13	1,22	1,01	1,07	0,49	2,05	222	25,1	65,3
8	0,35	460	0,735	6,2	1,13	1,18	1,01	1,04	0,44	2,36	199	19,1	58,6
9	0,32	468	0,879	0,5	1,13	1,20	1,07	1,06	0,47	2,27	217	17,5	63,9
10	0,30	476	4,161	0,0	1,13	1,14	1,02	1,01	0,38	2,68	178	12,6	57,4



Рисунок 5.8 – Пресс-остаток, пруток диаметром 7 мм и проволока диаметром 1,9-0,3 мм из исследуемого сплава, полученные с применением метода БПП

Таблица 5.6 – Результаты механических испытаний полуфабрикатов сплава системы Al-PZM

Полуфабрикат	Диаметр/ размер образца, мм	Механические свойства	
		Относительное удлинение, %	Временное сопротивление, МПа
Пруток горячепрессован- ный	5,0	12,0	170
	7,0	13,0	160
	9,0	13,5	140
Пруток, после сортовой прокатки	3,7×3,7	12,0	200
	3,1×3,1	11,0	225
	2,4×2,4	10,5	230
	2,2×2,2	9,2	240
Проволока, после волочения	1,35	5,6	245
	1,0	4,2	250
	0,7	3,1	255
	0,3	0,7	265

В результате анализа механических характеристик были сформированы графики, отображающие зависимость прочности на разрыв и относительного удлинения от уровня деформации для проволоки, произведенной из прутков методом БПП (см. рис. 5.9-5.12). Для наглядности и сравнения, на тех же графиках представлены данные по механическим свойствам проволоки, изготовленной из прутков методом СПП. Как видно из графиков на рис. 5.9 и 5.10 на конечной стадии при максимальной степени деформации при скорости деформации $1,49 \text{ с}^{-1}$, вся проволока после метода СПП, а также вся проволока после метода БПП, полученная из прутка диаметром 5-7 мм, имеют временное сопротивление в пределах 260-265 МПа [1].

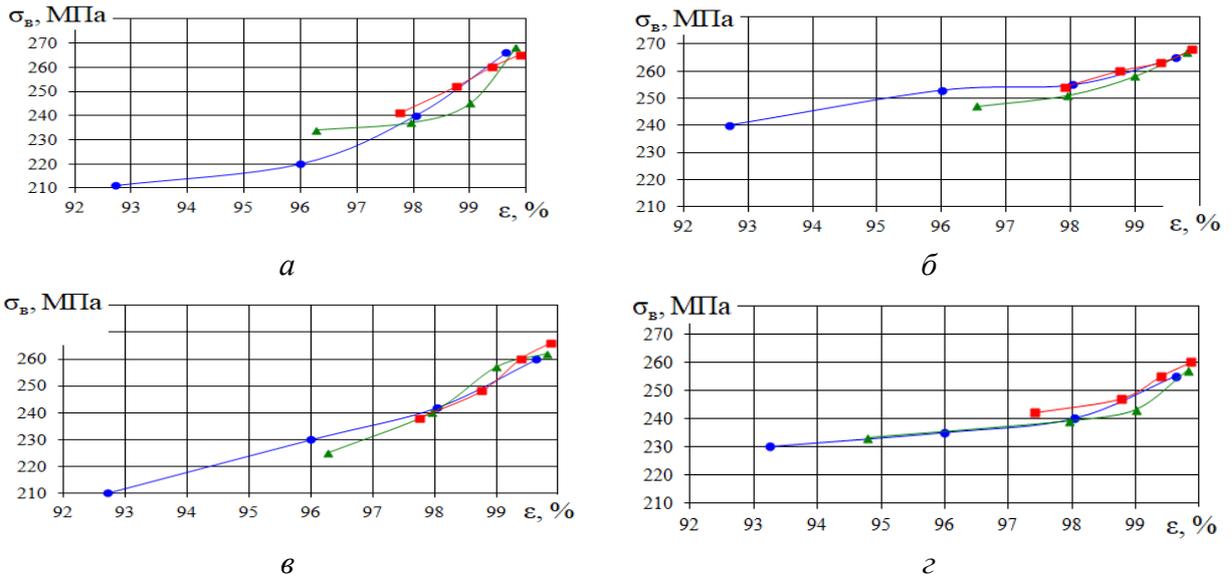


Рисунок 5.9 – Графики зависимости временного сопротивления от степени деформации для проволоки из экспериментального сплава, полученной в результате применения различных режимов обработки при скорости деформации $0,74 \text{ с}^{-1}$: а – СПП; $T_3 = 480 \text{ °C}$; б – БПП; $T_p = 750 \text{ °C}$; в – СПП; $T_3 = 550 \text{ °C}$; г – БПП; $T_p = 780 \text{ °C}$;
●, ▲, ■ – из прутков диаметром 5, 7 и 9 мм соответственно

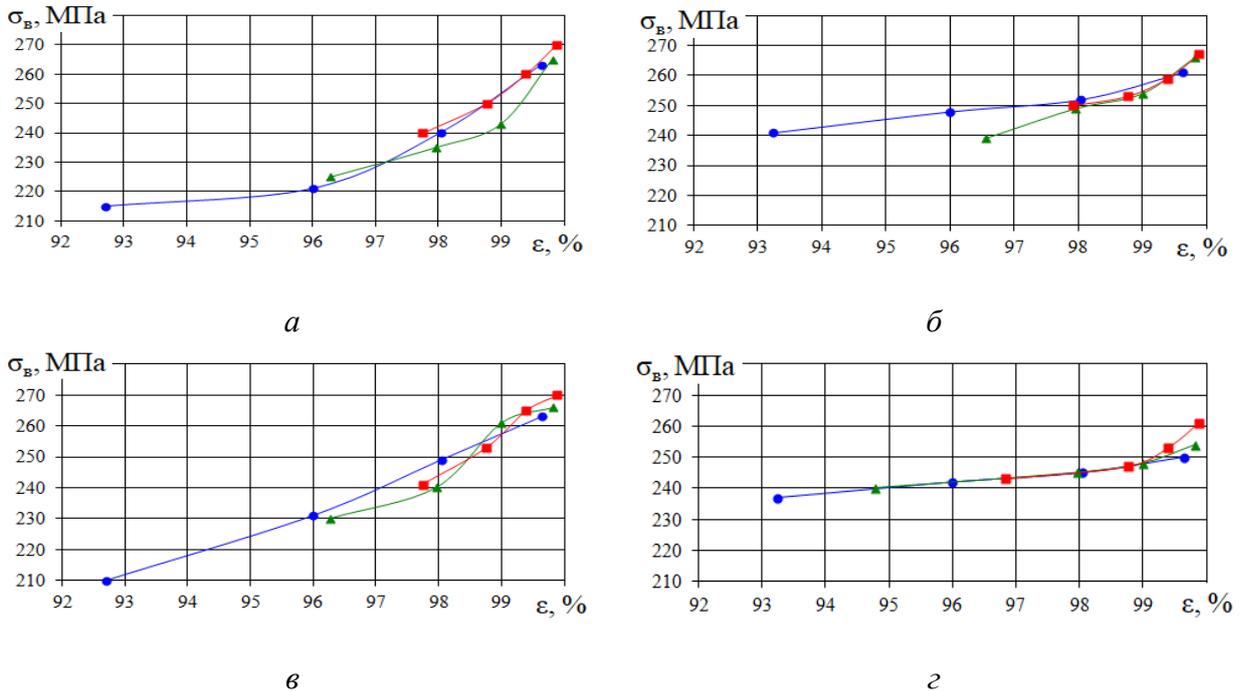


Рисунок 5.10 – Графики зависимости временного сопротивления от степени деформации для проволоки из экспериментального сплава, полученной в результате применения различных режимов обработки при скорости деформации $1,49 \text{ с}^{-1}$: а – СПП; $T_3 = 480 \text{ °C}$; б – БПП; $T_p = 750 \text{ °C}$; в – СПП; $T_3 = 550 \text{ °C}$; г – БПП; $T_p = 780 \text{ °C}$;
●, ▲, ■ – из прутков диаметром 5, 7 и 9 мм соответственно

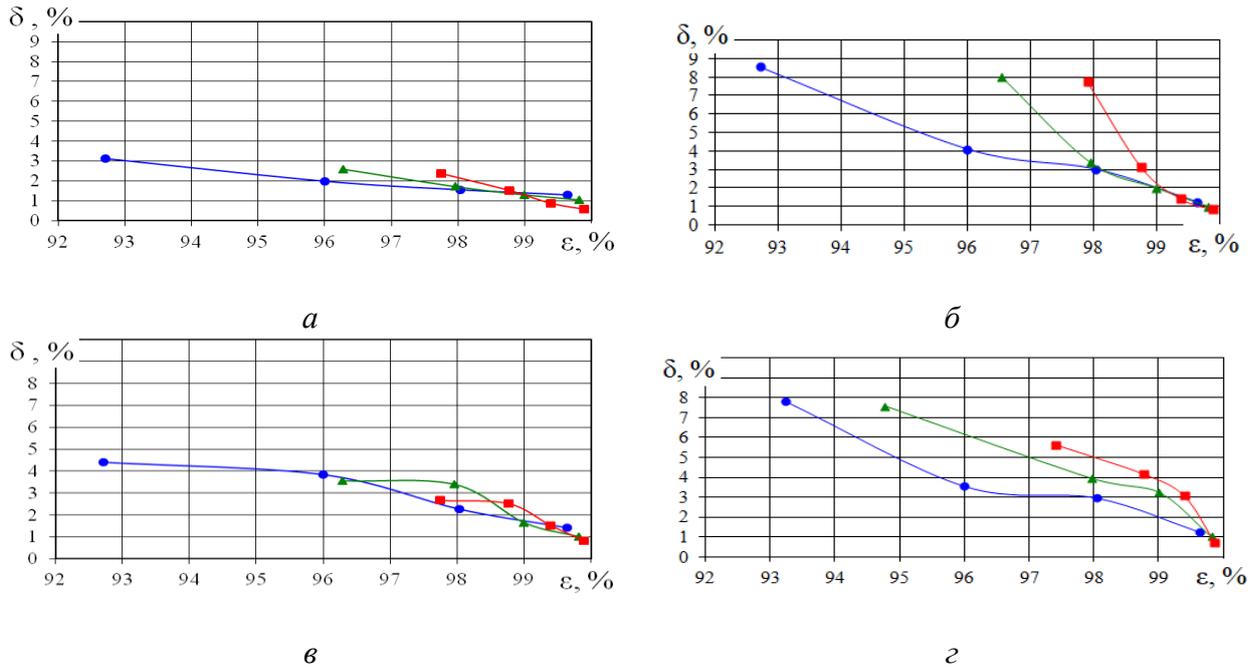


Рисунок 5.11 – Графики зависимости относительного удлинения от степени деформации для проволоки из экспериментального сплава, полученной в результате применения различных режимов обработки при скорости деформации $0,74 \text{ c}^{-1}$: *а* – СПП; $T_3 = 480 \text{ °C}$; *б* – БПП; $T_p = 750 \text{ °C}$; *в* – СПП; $T_3 = 550 \text{ °C}$; *г* – БПП; $T_p = 780 \text{ °C}$;
 ●, ▲, ■ – из прутков диаметром 5, 7 и 9 мм соответственно

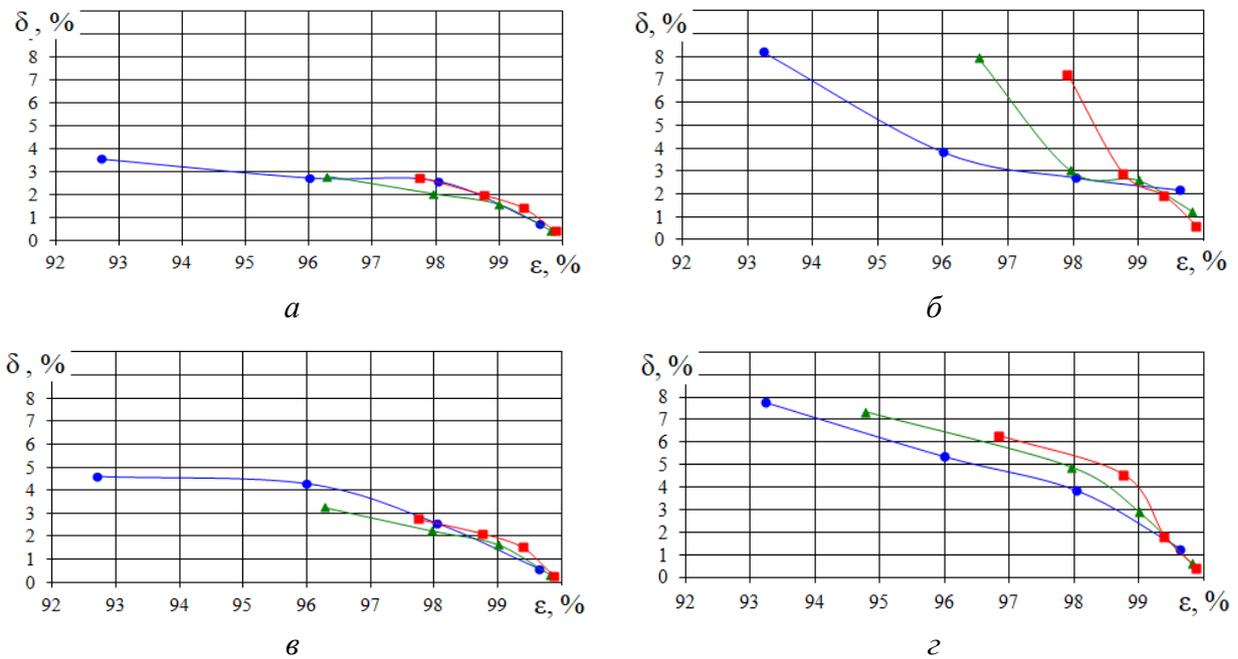


Рисунок 5.12 – Графики зависимости относительного удлинения от степени деформации для проволоки из экспериментального сплава, полученной в результате применения различных режимов обработки при скорости деформации $1,49 \text{ c}^{-1}$: *а* – СПП; $T_3 = 480 \text{ °C}$; *б* – Б; $T_p = 750 \text{ °C}$; *в* – СПП; $T_3 = 550 \text{ °C}$; *г* – БПП; $T_p = 780 \text{ °C}$;
 ●, ▲, ■ – из прутков диаметром 5, 7 и 9 мм соответственно

На рисунке 5.11 видно, что при степени деформации, приближенной к 100 %, вся проволока из прутков 9 мм, 7 мм и 5 мм, полученная методами СПП и БПП, имеет относительное удлинение в пределах 0,5-1,5 %. Но на начальных этапах волочения при степени деформации 93-97 %, пластические характеристики у проволоки полученной методом БПП выше, чем у проволоки после СПП. Относительное удлинение у проволоки после БПП в пределах 5,5-9 %, а у СПП от 2-4,5 %. По графикам на рис. 5.11, 5.12 видно, что наиболее пластична на конечном этапе волочения проволока из прутка диаметром 5 мм, полученного по методу БПП ($\delta = 2-2,5$ % при степени деформации более 99 %). Во всех остальных случаях при степени деформации около 99 %, относительное удлинение составляет 1 % и меньше.

Микроструктура проволоки, полученная с применением метода БПП характеризуется волокнистым строением (рис. 5.13), причем с увеличением степени деформации эта неоднородность уменьшается, и проволока диаметром 0,3 мм имеет достаточно однородную структуру по сечению. Проведенные исследования показали, что проволока имеет регламентированную структуру и механические свойства в соответствии с ТУ 1-809-1038-2018.

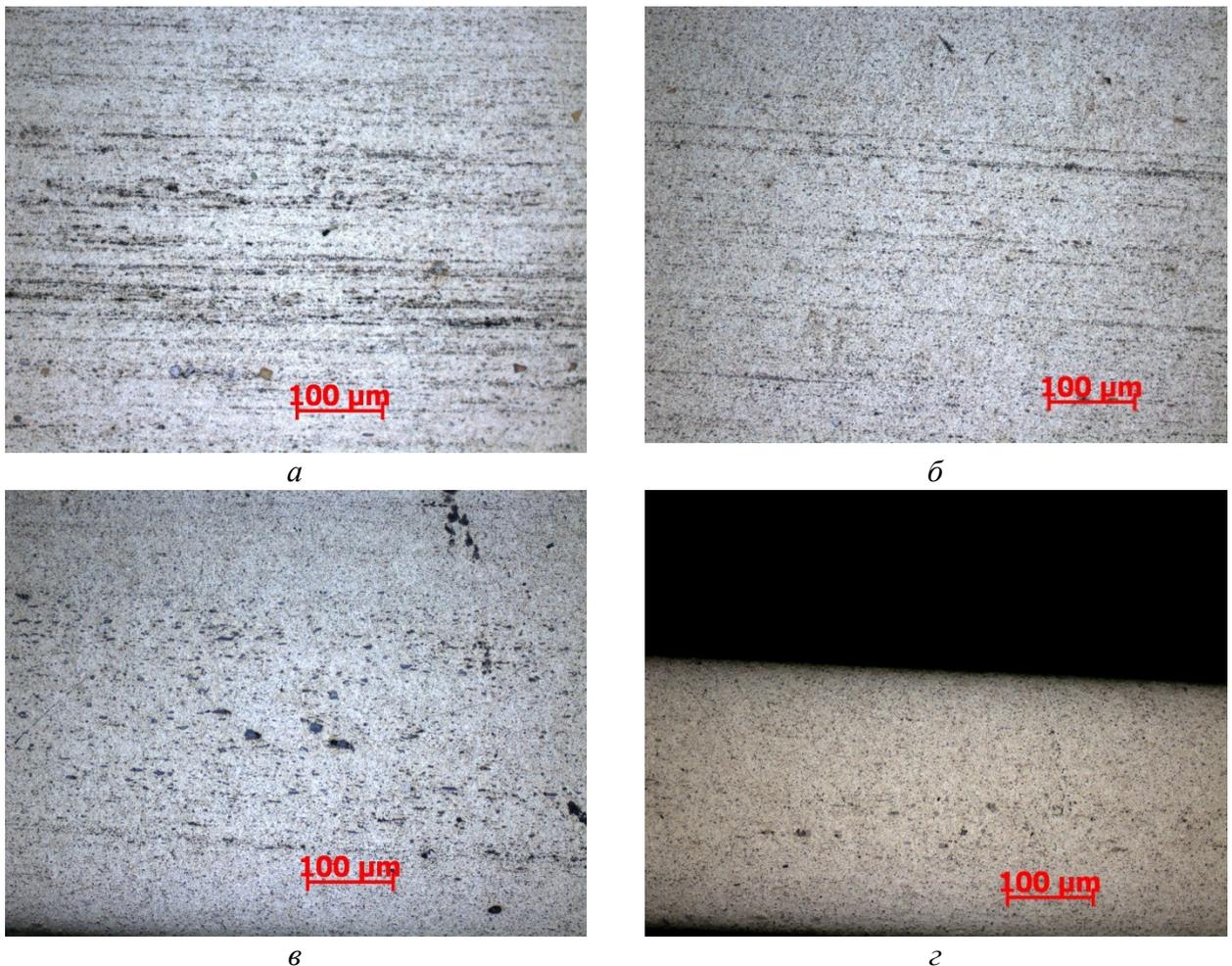


Рисунок 5.13 – Микроструктура проволоки полученной с применением метода БПП и последующего волочения. Диаметры: *а* – 2 мм; *б* – 1 мм; *в* – 0,6 мм; *г* – 0,3 мм

На конечном этапе исследований замеряли электросопротивление полученных полуфабрикатов с помощью измерительного прибора «Виток». Замеры электросопротивления на деформированных полуфабрикатах, полученных по различным технологиям, показали, что значения этого параметра находятся в пределах 0,031-0,032 Ом·мм²/м.

Исследования продемонстрировали, что при нагреве до 250 °С временное сопротивление полуфабрикатов зафиксировано на отметке 160 МПа. При комнатной температуре (20 °С) этот показатель составил 170 МПа. Отсюда следует вывод: снижение прочности при прогреве до 250 °С достигает всего 6%, что свидетельствует о высокой термической стойкости созданных изделий.

Опытные образцы деформированных полуфабрикатов, полученные в результате этих испытаний, были направлены в ООО «НПЦ МГД» (г. Красноярск) для производства электропроводников, предназначенных для использования в авиационной промышленности (Приложение Б, В).

5.3. Результаты экспериментальных исследований по получению прутков из сплава Al-1%РЗМ методом БПП и разработка новой технологии получения проволоки из этих прутков

Аналогичные исследования с применением метода БПП были проведены для сплава алюминия, легированного РЗМ в количестве 1 % масс. ед.

Как видно из экспериментальных данных по силовым параметрам получения прутков диаметром 5 (вытяжка при прессовании $\mu=15,7$) и 9 мм ($\mu=4,8$) при разной температуре расплава T_p , приведенных в табл. 5.7, силы на валках и матрице увеличиваются с ростом коэффициента вытяжки, что является результатом увеличения объема деформируемого металла с повышением степени деформации по мере заполнения пространства металлом между валками и матрицей. Чем выше температура расплава, тем меньше силы на валках и матрице, что связано со снижением сопротивления металла деформации.

Из табл. 5.8 видно, что изменение технологических параметров сказалось и на механических свойствах. С увеличением скорости деформации, увеличивается пластичность металла прутков. Временное сопротивление прутков, полученных по методу БПП, составляет в среднем 103-124 МПа, а относительное удлинение 24-39 %.

Из отпрессованных прутков вырезали образцы для испытаний на растяжение и оценивали по результатам испытаний их временное сопротивление σ_b и σ_T предел текучести, относительное удлинение δ и относительное сужение Ψ .

Таблица 5.7 – Результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса БПП экспериментального сплава Al+1 % P3M

Параметры		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$	
		$\mu=4,8$	$\mu=15,7$	$\mu=4,8$	$\mu=15,7$
$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	$P_{\text{вал}}$, кН	-	279	-	230
	$P_{\text{матр}}$, кН	-	155	-	145
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	$P_{\text{вал}}$, кН	208	270	190	223
	$P_{\text{матр}}$, кН	146	171	127	150

Таблица 5.8 – Механические свойства полуфабрикатов, полученных методом БПП

Параметры		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$	
		$\mu=4,8$	$\mu=15,7$	$\mu=4,8$	$\mu=15,7$
$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	σ_B , МПа	123	124	115	122
	σ_T , МПа	-	105	-	102
	δ , %	24,0	32,0	27,0	31,4
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	σ_B , МПа	107	120	103	117
	σ_T , МПа	69	89	65	88
	δ , %	31,4	32,9	35,8	39,4

Полученные прутки диаметром 9 мм и 5 мм подвергали холодному волочению до диаметра 2 мм. Волочение производили на цепном волочильном стане однократного действия. Технические характеристики волочильного стана приведены в табл. 5.9, а маршруты волочения – в табл. 5.10 и в табл. 5.11.

Таблица 5.9 – Технические характеристики волочильного стана

Характеристики	Значения характеристик
Длина волочения, мм.	2000
Количество ниток, шт.	1
Сила волочения, кН	50
Скорость волочения, м/с.	0,17
Потребляемая мощность, кВт	25
Габаритные размеры, мм	3000×1800×1300

Таблица 5.10 – Маршрут волочения проволоки сплава Al+1 % PЗМ для прутка диаметром 9 мм

№	Диаметр канала волоки, мм	Единичная вытяжка	Суммарная вытяжка	Степень деформации
1	9	-	-	-
2	8,5	1,12	1,12	10,8
3	8	1,13	1,26	11,4
4	7	1,30	1,64	23,4
5	6,5	1,12	1,84	13,7
6	5,9	1,21	2,23	17,6
7	5,4	1,12	3,34	16,2
8	4,8	1,27	4,25	20,9
9	4,5	1,30	5,53	12,1
10	4,2	1,14	6,3	12,9
11	4	1,13	7,12	9,3
12	3,6	1,15	8,19	19
13	3,3	1,19	9,74	15,9
14	3	1,21	11,79	17,4
15	2,8	1,15	13,56	12,9
16	2,5	1,28	17,35	21,5
17	2,2	1,27	22,04	21,3
18	2	1,20	26,45	17,3

Таблица 5.11 – Маршрут волочения проволоки из сплава Al+1 % PЗМ для прутка диаметром 5 мм

№	Диаметр канала волоки, мм	Единичная вытяжка	Суммарная вытяжка	Степень деформации
1	5	-	-	
2	4,8	1,08	1,08	7,84
3	4,5	1,13	1,22	12,1
4	4,2	1,14	1,39	12,9
5	4	1,13	1,59	9,3
6	3,6	1,19	1,87	19
7	3,3	1,21	2,26	15,9
8	3	1,15	2,60	17,4
9	2,8	1,28	3,33	12,9
10	2,5	1,27	4,23	21,5
11	2,2	1,20	5,07	21,3
12	2	1,17	5,93	17,3

Следует отметить, что для получения проволоки не потребовалось ни одного промежуточного отжига.

В процессе волочения отбирались образцы для промежуточного испытания механических свойств получаемой проволоки. Результаты от проведенных измерений показаны в таблицах 5.12 и 5.13.

Таблица 5.12 – Механические свойства проволоки сплава Al-1 % РЗМ из прутка диаметром 9 мм полученных методом БПП

Скорость деформации	Диаметр полуфабриката, мм											
	9				7				5,4			
	-				$\varepsilon = 40\%$				$\varepsilon = 64\%$			
	$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$	
	σ_B , МПа	δ , %										
$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$	123	24,0	115	27,0	128	15,0	120	15,0	155	8,8	133	10,7
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$	122	31,4	103	35,8	128	17,1	115	17,8	150	10,3	133	12,1
Скорость деформации	4,5				3,6				2			
	$\varepsilon = 75\%$				$\varepsilon = 84\%$				$\varepsilon = 95\%$			
	$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C}$	
	σ_B , МПа	δ , %										
	$\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$	168	5,5	159	6,5	176	5,0	170	5,1	178	2,5	173
$\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$	163	6,4	159	7,3	168	6,0	163	6,3	170	3,0	165	3,3

Таблица 5.13 – Механические свойства проволоки сплава Al-1 % РЗМ из прутка диаметром 5 мм полученных методом БПП

Скорость	Диаметр полуфабриката, мм											
	5,0				4,5				3,6			
	$\varepsilon = 0 \%$				$\varepsilon = 19 \%$				$\varepsilon = 48 \%$			
	$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
$\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	124	18,4	122	32,0	128	13,2	123	15,9	139	11,0	130	11,4
$\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	120	30,9	121	34,4	121	18,75	124	19,6	130	12,0	139	12,6
Скорость	3,0				2,5				2,0 мм			
	$\varepsilon = 64 \%$				$\varepsilon = 75 \%$				$\varepsilon = 84 \%$			
	$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_p = 780 \text{ }^\circ\text{C}$	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
	$\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	160	5,7	144	6,7	172	4,2	158	4,6	178	3,0	170
$\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	151	5,9	154	7,0	156	4,3	161	4,7	167	3,5	169	3,7

Для сравнения между собой механических свойств проволоки, полученной из прутков различными методами совмещенной обработки, были построены графики зависимости измеряемых величин от степени деформации (рис. 5.14-5.19).

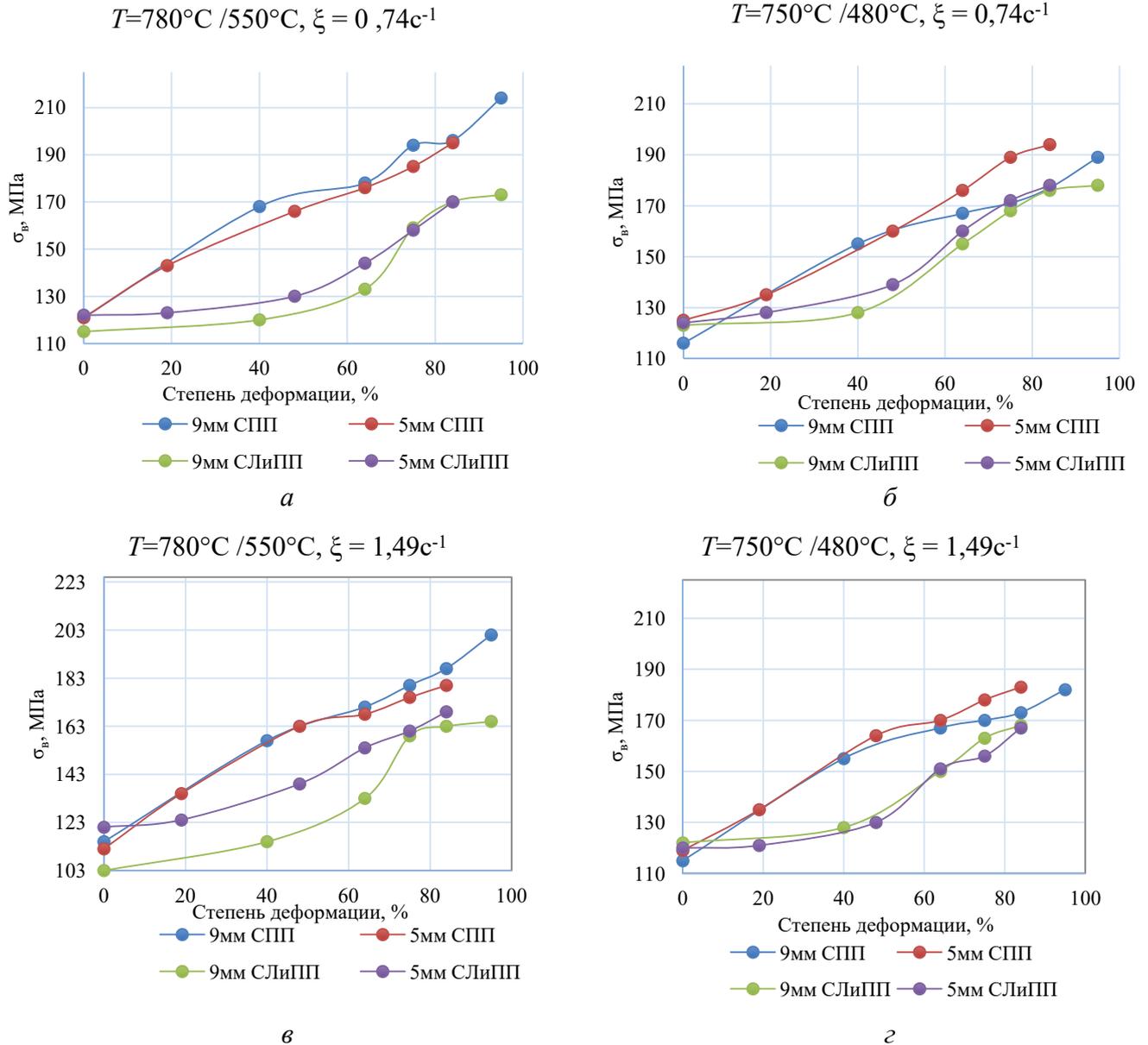


Рисунок 5.14 – Механические свойства прутков из сплава Al-1 % РЗМ (сравнение по степени деформации)

Как видно из рисунка 5.14, наибольшей прочностью обладают прутки СПП при $T = 550^{\circ}\text{C}$ и скорости равной $\xi = 0,74\text{c}^{-1}$ (рис 5.14, а), а при БПП максимальные показатели прочности наблюдаются на рисунке 5.14, б. Колебания значения $\sigma_{\text{в}}$ в зависимости от режима получения полуфабриката составляют 10-40 МПа.

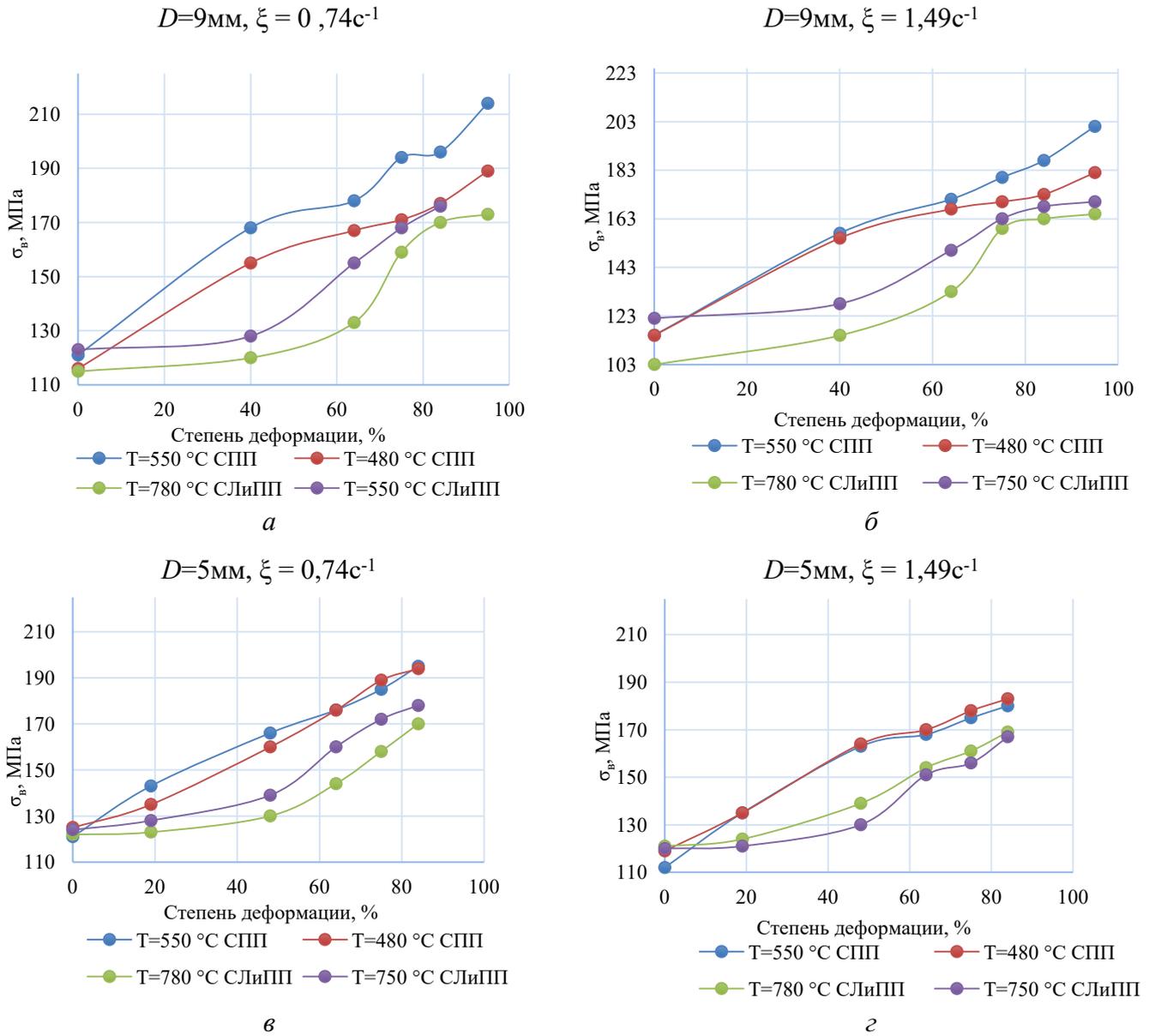


Рисунок 5.15 – Механические свойства прутков по температуре расплава из сплава Al-1 % РЗМ (сравнение по температуре)

Как видно из рисунка 5.15, наибольшей прочностью обладают прутки обработки при $T = 550\text{ °С}$ и скоростью равной $\xi = 0,74\text{ с}^{-1}$ (рис. 5.15, а). Температура оказывает влияние на режимы СПП: диаметр получаемого прутка 9 мм и обоими скоростями, а вот при диаметре 5 мм в конечные точки влияние температуры незначительно отличаются.

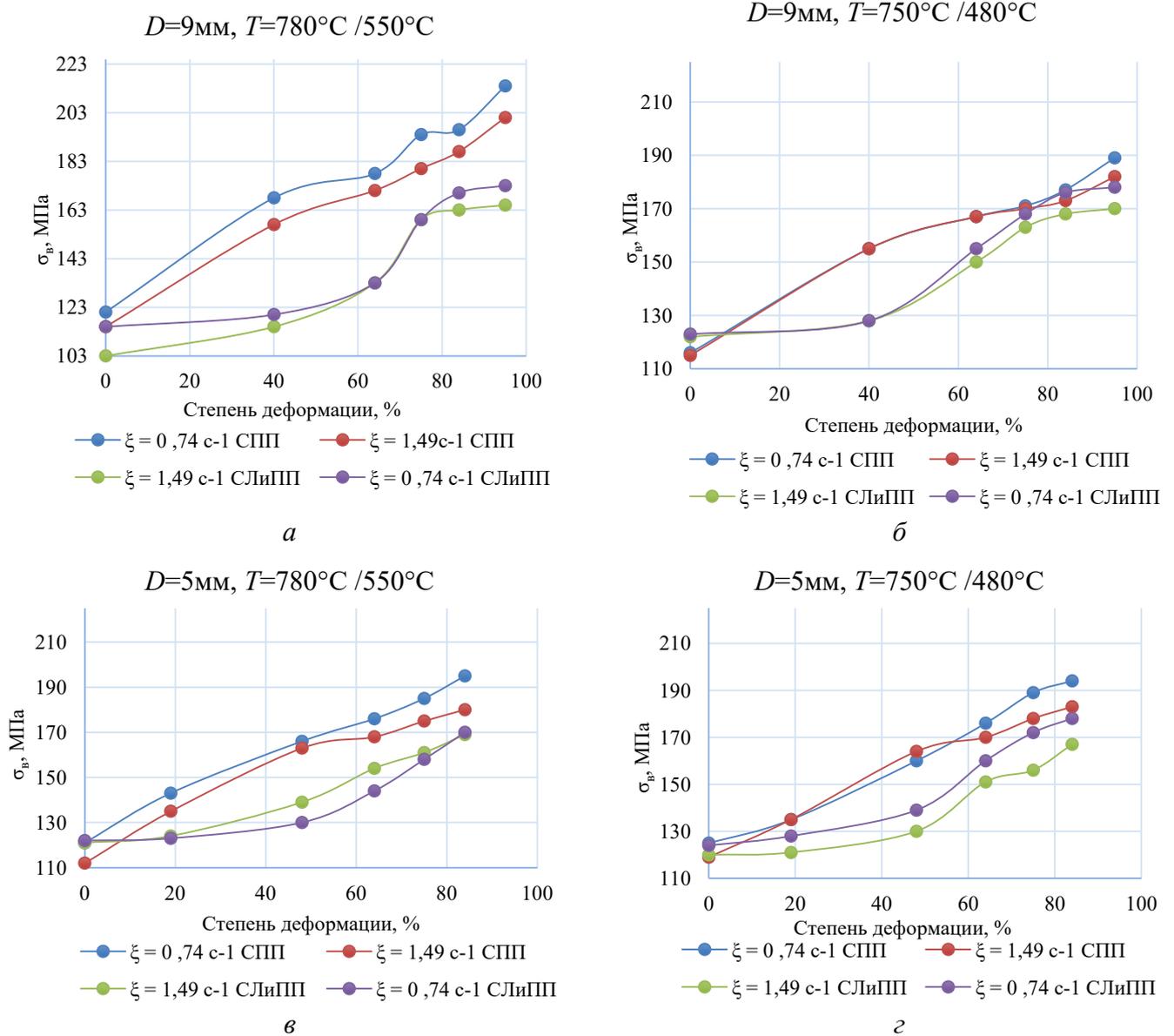


Рисунок 5.16 – Механические свойства прутков по скорости деформации из сплава Al-1 % РЗМ (сравнение по скорости деформации)

Как видно из рисунка 5.16, наибольшей разницей по значениям прочности между СПП и БПП можно наблюдать на рис. 5.16, а. Так как в результате холодного волочения происходит так называемый “наклеп” металла, т.е. его упрочнение. Скорость деформации оказывает незначительное влияние на временное сопротивление (колебания значения $\sigma_{\text{в}}$ составляют 1-10 МПа).

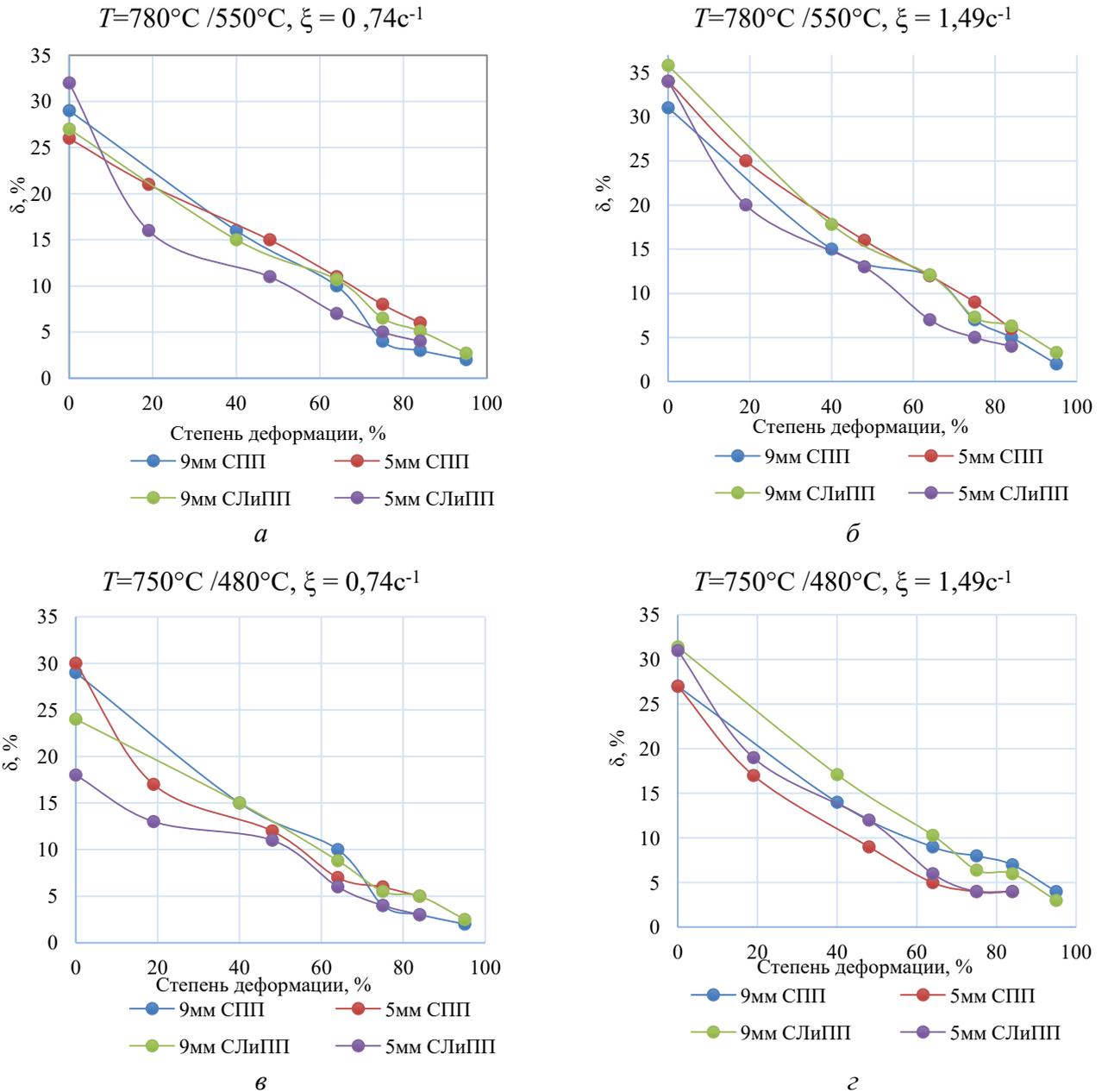


Рисунок 5.17 – Пластические свойства прутков по вытяжке из сплава Al-1 % РЗМ (сравнение по степени деформации)

Как видно из рисунка 5.17, наибольшей пластичностью обладают прутки с режимами обработки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (БПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП) скоростью равной $\xi = 1,49\text{c}^{-1}$ (рис. 5.17, *б*). Однако хорошей пластичностью так же обладает и режим при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (БПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП) и скоростью равной $\xi = 0,74\text{c}^{-1}$ (рис. 5.17, *а*). При сравнении можно сделать вывод, что они практически схожи по свойствам.

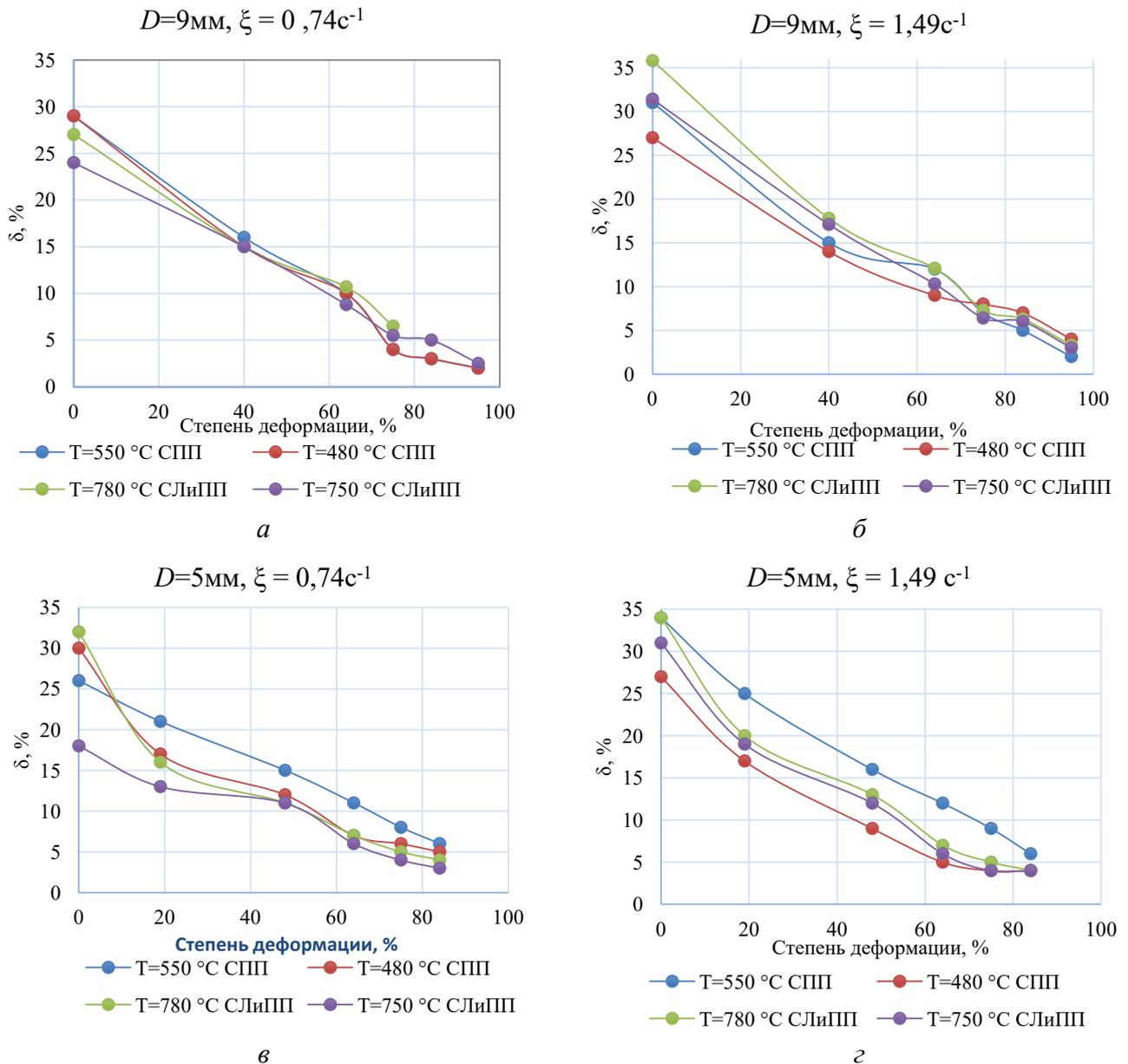


Рисунок 5.18 – Пластические свойства прутков по температуре расплава из сплава А1-1 % РЗМ (сравнение по температуре)

Как видно из рисунка 5.18, наибольшей пластичностью обладают прутки обработки при $T = 780\text{ °C}$ (БПП) и диаметром прутка 9 мм при скорости $\xi = 1,49\text{ с}^{-1}$ (рис. 5.18, б), а среди режимов СПП высокая пластичность видна при $T = 550\text{ °C}$ и диаметром 5мм со скоростью обработки $\xi = 1,49\text{ с}^{-1}$ (рис. 5.18, г),

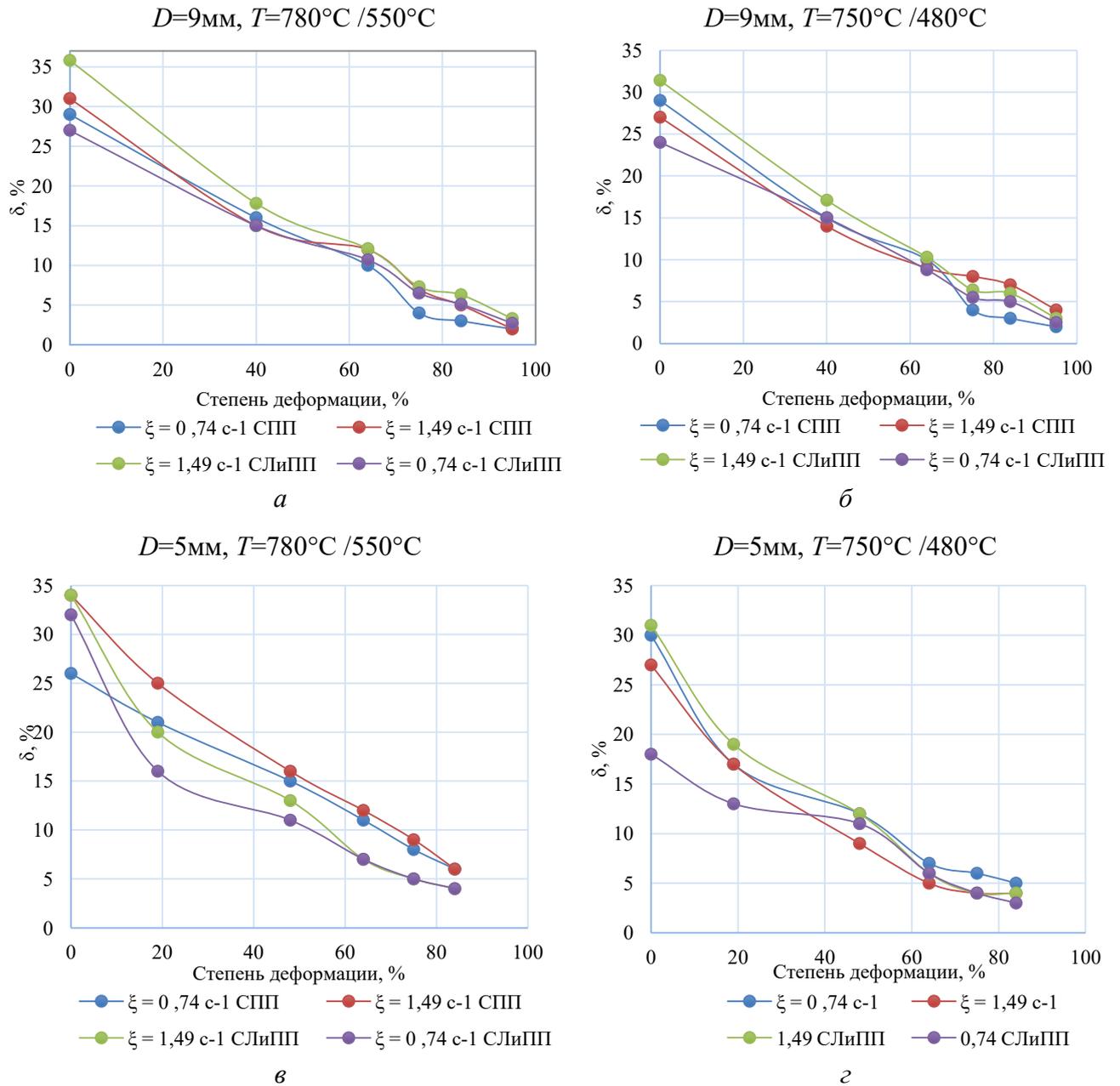


Рисунок 5.19 – Пластические свойства прутков по температуре расплава из сплава Al-1 % РЗМ

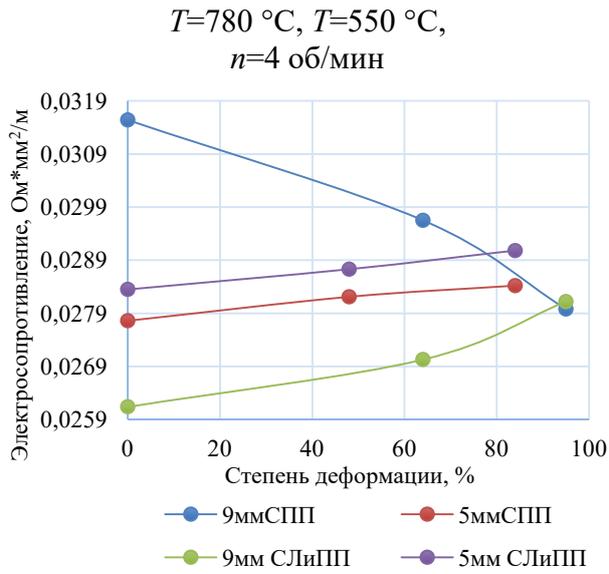
Как видно из рисунка 5.19, наибольшей пластичностью обладают прутки обработки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (БПП) и диаметром прутка 9 мм (рис. 5.19, а). Скорость деформации оказывает существенное влияние только на начальных этапах получения прутков (колебания значения δ составляют 10-15 % (рис. 5.19, б, в, г)).

Таблица 5.14 – Результаты измерения электросопротивления прутка и проволоки из сплава Al-1 % РЗМ

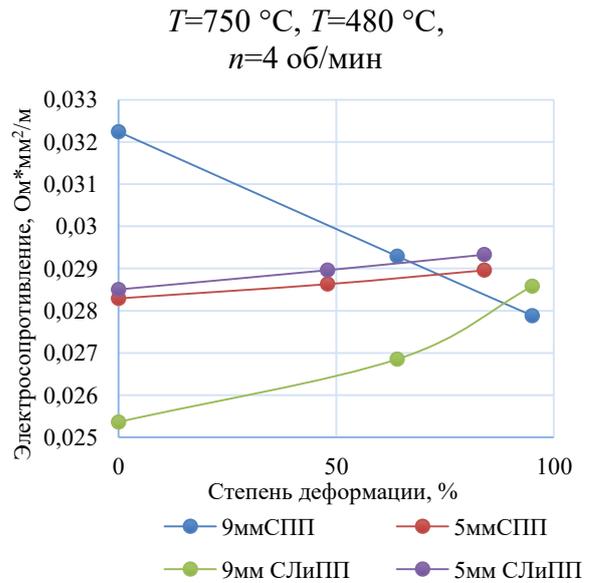
Параметры		$T_p = 780\text{ }^\circ\text{C} / T_3 = 550\text{ }^\circ\text{C}$						
		9 мм			5 мм			
			9 мм	5,4 мм	2 мм	5 мм	3,6 мм	2 мм
		$\varepsilon, \%$	0	64	95	0	48	84
$\rho,$ Ом·мм ² /м	$\xi = 0,74\text{c}^{-1}$ (4 об/мин)	БПП	0,02536	0,02685	0,02858	0,0285	0,02896	0,02933
		СПП	0,03154	0,02965	0,02798	0,02776	0,02821	0,02842
	$\xi = 1,49\text{c}^{-1}$ (8 об/мин)	БПП	0,02602	0,02938	0,03059	0,02854	0,02889	0,02916
		СПП	0,03296	0,02931	0,02759	0,02909	0,02839	0,02761
Параметры		$T_p = 750\text{ }^\circ\text{C} / T_3 = 480\text{ }^\circ\text{C}$						
		9 мм			5 мм			
			9 мм	5,4 мм	2 мм	5 мм	3,6 мм	2 мм
		$\varepsilon, \%$	0	64	95	0	48	84
$\rho,$ Ом·мм ² /м	$\xi = 0,74\text{c}^{-1}$ (4 об/мин)	БПП	0,02614	0,02703	0,02812	0,02835	0,02873	0,02908
		СПП	0,03224	0,02929	0,02788	0,02829	0,02863	0,02896
	$\xi = 1,49\text{c}^{-1}$ (8 об/мин)	БПП	0,02659	0,03001	0,0304	0,02838	0,02881	0,02926
		СПП	0,03413	0,02916	0,02807	0,02949	0,02835	0,02789

На основе результатов из таблицы 5.14 для более наглядного понимания значений электросопротивления были построены графики на рис 5.20-5.22.

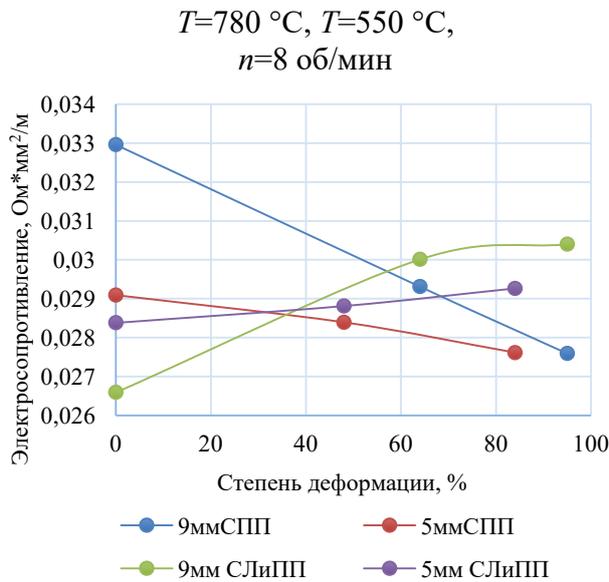
Из графиков (рис. 5.20, а, б) видно, что температура расплава влияет на электросопротивление незначительно, для режимов СПП и БПП при прутке в 5 мм изменение температуры параллельно отображаются линии на графике. Сравнивая режимы на прутке 9 мм видно, что СПП от начальной точки к конечной (2 мм) электросопротивление падает, в случае БПП идет наоборот повышение электросопротивления.



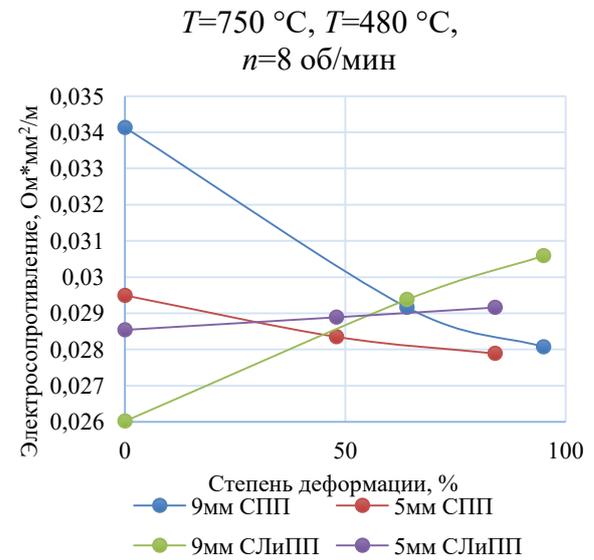
а



б



в



г

Рисунок 5.20 – Графики зависимости электросопротивления (по вытяжке прутка и проволоки) из сплава Al-1 % РЗМ, полученных совмещёнными методами обработки

Графики (рис. 5.20, в, г) показывают, что при увеличении скорости деформации растёт и электросопротивление.

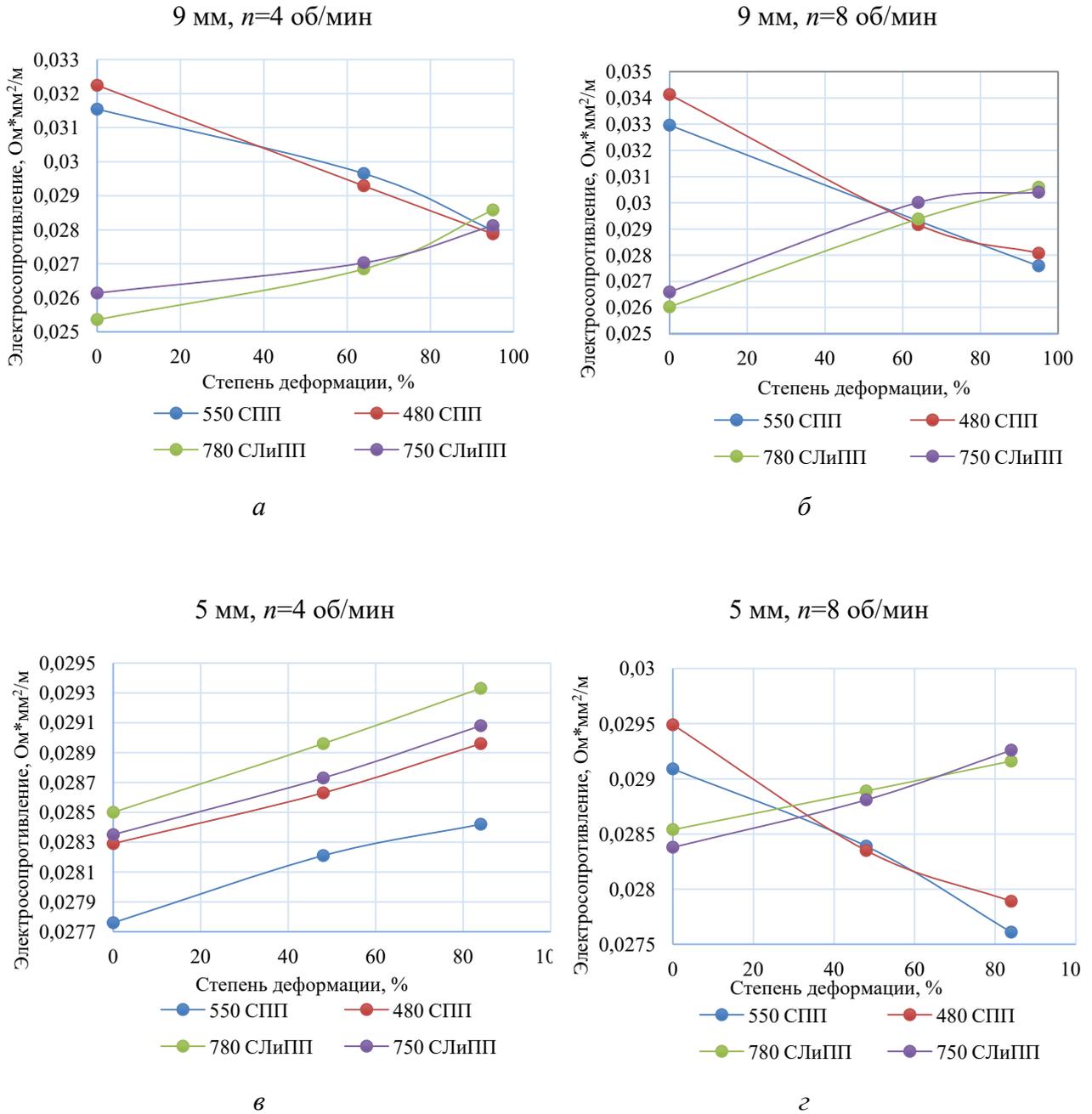


Рисунок 5.21 – Графики зависимости электросопротивления (сравнение по температуре) из сплава Al-1% РЗМ.

На (рис. 5.21, а, б) видно, что наибольшая величина электросопротивления получается при температуре расплава $T_p = 780$ °С (БПП) и скорости деформации $\xi = 1,49$ с⁻¹ (8 об/мин). Электросопротивление при этом режиме равняется $\rho = 0,03004$ Ом·мм²/м. Наименьшее значение электросопротивления получено при режиме СПП $T_p = 550$ °С, скорости деформации $\xi = 1,49$ с⁻¹ (8 об/мин), на $D = 5$ мм, и составляет $\rho = 0,02761$ Ом·мм²/м (рис. 5.21, г).

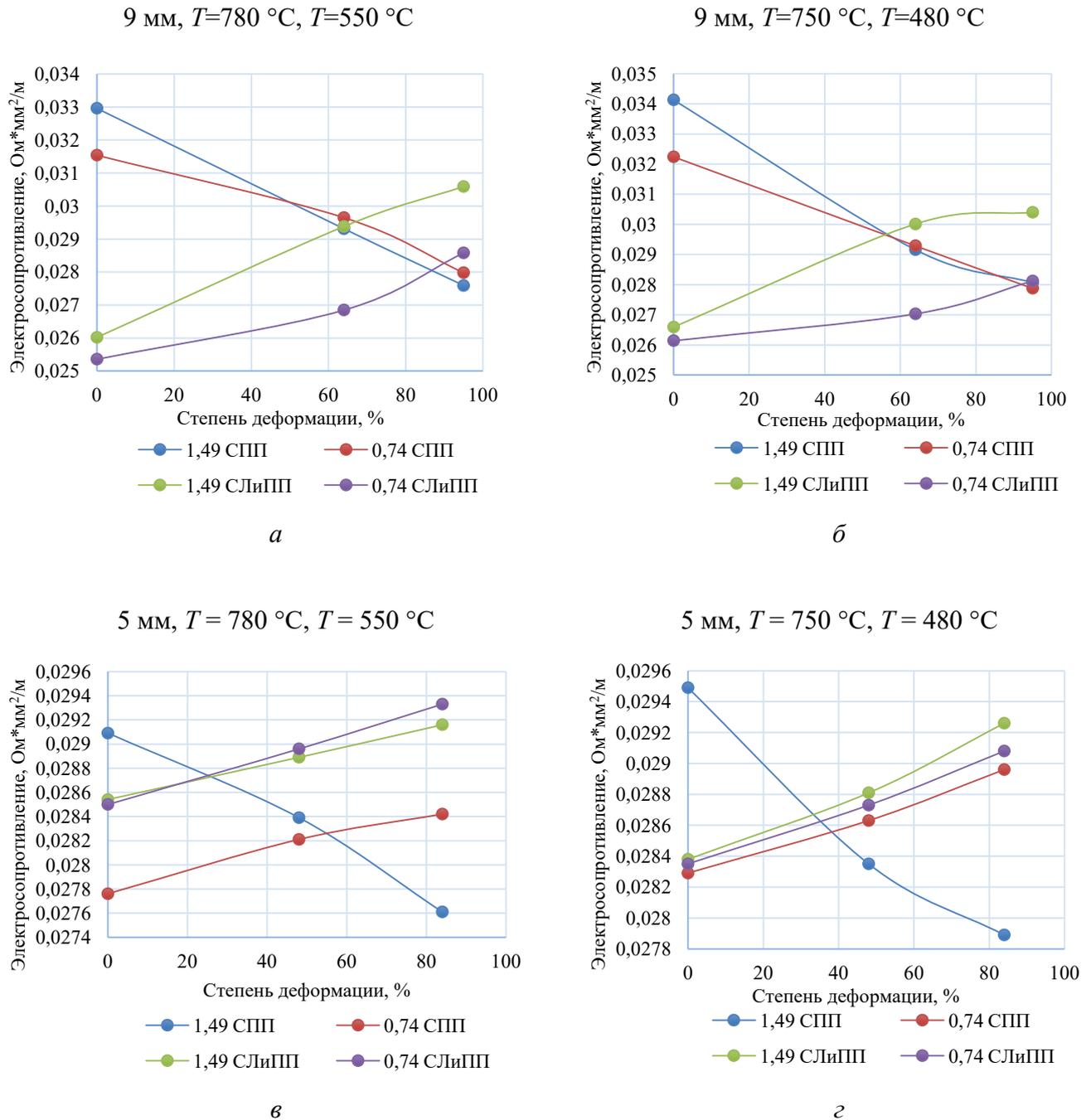


Рисунок 5.22 – Графики зависимости электросопротивления (сравнение по скорости деформации) из сплава Al-1% РЗМ

По (рис. 5.21, а, б) видно, что в начальной точке прутков $D = 9$ мм значение электросопротивления на режимах СПП большое, в отличии от БПП, а в процессе деформации оно снижается и разница между режимами в конечной точке достигает $\rho = 0,00001-0,00099$ Ом·мм²/м (рис. 5.21, а, б).

Исследования микроструктуры проводили на световом микроскопе Axio Observer A1.m, Carl Zeiss при увеличениях $\times 200$ и $\times 500$ в поляризованном свете после нанесения пленки,

полученной на оборудовании «Кристалл» при напряжении $V = 30\text{В}$, силе тока $I = 0.2-0.4\text{ А}$, времени $t = 1\text{ мин}$, при комнатной температуре в составе: Борной кислоты 5,5 г, HF 15 мл, H_2O 1000 мл.

Как видно по металлографическому исследованию структуры зерна твердого раствора на основе алюминия имеют вытянутость вдоль направления деформации как от температуры 750 °С, так и от 780 °С (таблицы 5.15-5.17). На оксидированных пленках также отмечено вытягивание зерен. Наличие округлых зерен свидетельствует о протекании рекристаллизационных процессов при деформации от этих температур. Причем при деформации от 780 °С она проходит полнее.

При дальнейшем деформировании прутков, содержащих 1% РЗМ, также отмечается вытягивание зерен твердого раствора по направлению действия силы: зерна становятся тоньше, что видно и на оксидированных пленках.

При рассмотрении прутка диаметром 5 мм отмечено неравномерное распределение включений по сечению прутка: в центральной части их меньше, по краям – больше, и распределяются они вдоль границ твердого раствора.

При деформации со скоростью $0,74\text{ с}^{-1}$ структура более равномерна, что видно на снимках микроструктур и на оксидных пленках. Текстурованность структуры сохраняется.

Таблица 5.15 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава диаметром 9 и 5 мм

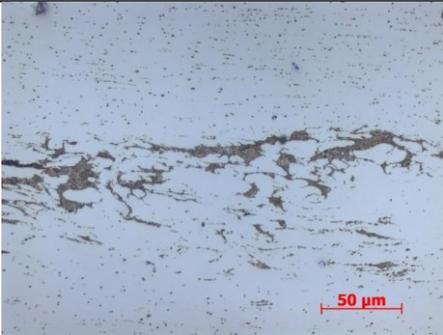
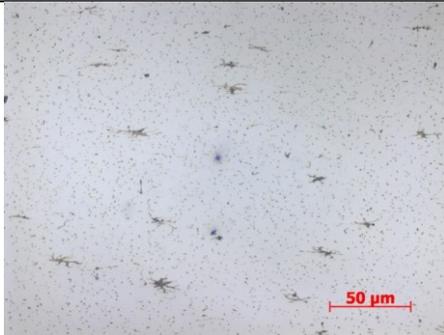
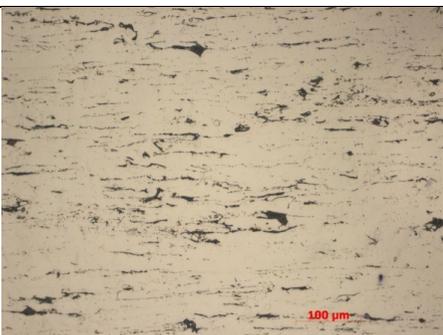
	$T = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
$\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)				
	9 мм	5 мм	9 мм	5 мм
$\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)				
	9 мм	5 мм	9 мм	5 мм

Таблица 5.16 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава

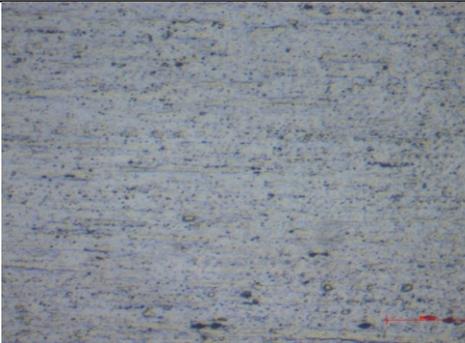
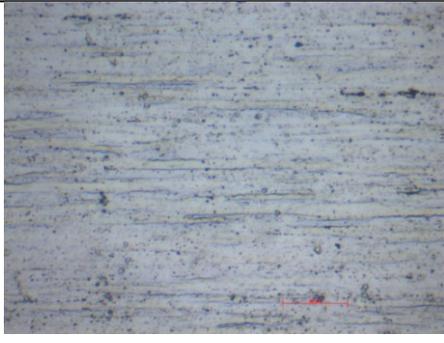
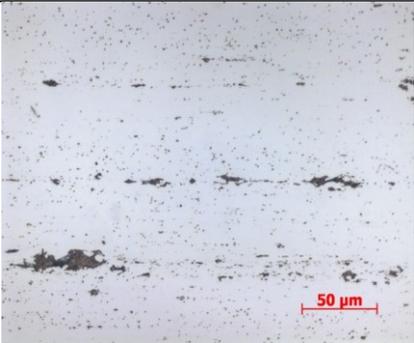
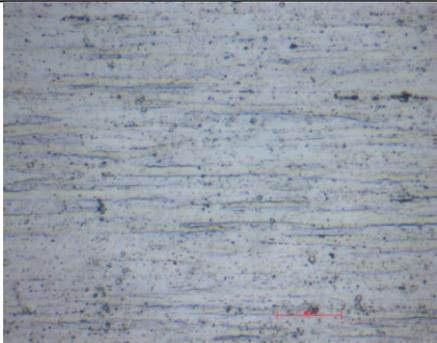
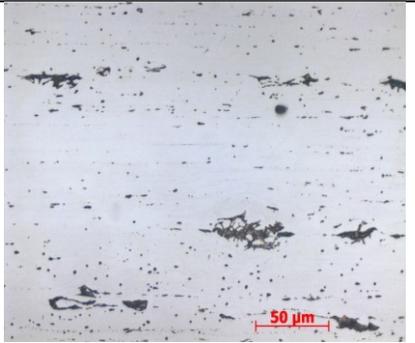
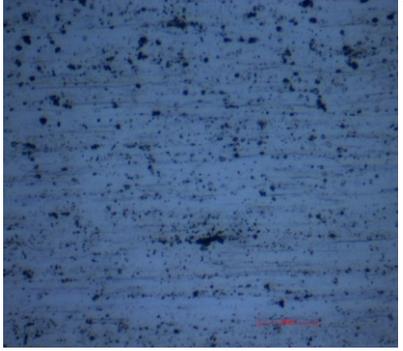
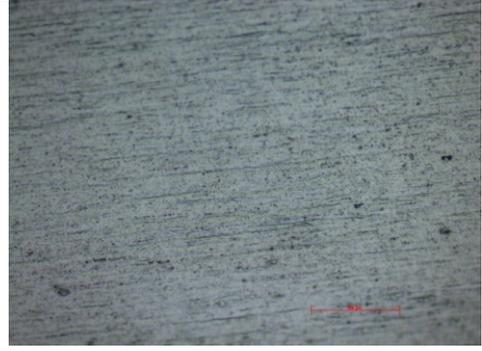
	$T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$		$T = 780 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\xi = 0,74$ с^{-1} (4 об/мин)				
	9 мм→ <u>5,4 мм</u>	5 мм→ <u>3,6 мм</u>	9 мм→ <u>5,4 мм</u>	5 мм→ <u>3,6 мм</u>
$\xi = 1,49$ с^{-1} (8 об/мин)				
	9 мм→ <u>5,4 мм</u>	5 мм→ <u>3,6 мм</u>	9 мм→ <u>5,4 мм</u>	5 мм→ <u>3,6 мм</u>

Таблица 5.17 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава (прутки 9 и 5 мм):

	$T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$	
$\xi = 0,74$ с^{-1} (4 об/мин)				
	9 мм→ <u>2 мм</u>	5 мм→ <u>2 мм</u>	9 мм→ <u>2 мм</u>	5 мм→ <u>2 мм</u>
$\xi = 1,49$ с^{-1} (8 об/мин)				
	9 мм→ <u>2 мм</u>	5 мм→ <u>2 мм</u>	9 мм→ <u>2 мм</u>	5 мм→ <u>2 мм</u>

Анализ структуры, представленной в таблице 5.17, продемонстрировал неизменность распределения вторичных фаз при второй скорости деформации с ростом температуры. Отмечается ярко выраженная текстура структуры, ориентированная вдоль направления деформационного воздействия. Зерна твердого раствора демонстрируют вытягивание, и вдоль границ фиксируются выделения вторичных фаз, сосредотачивающиеся преимущественно на поверхности образцов.

Обработка со скоростью $0,74 \text{ с}^{-1}$ выявляет более равномерное распределение дисперсных частиц, выделившихся из твердого раствора, при температуре $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Повышение температуры до $780 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к увеличению количества частиц второй фазы и смещению их ближе к поверхности образцов, в то время как внутренняя часть образца остается практически свободной от вторичных фаз.

Исследование образцов диаметром 9 мм также свидетельствует о локализации вторичных фаз по границам зерен, главным образом у поверхности. Деформация со скоростью 8 об/мин при $780 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождается различиями в травлении поверхностной и внутренней зон. Вторичные фазы располагаются рядами вдоль границ зерен, а также приближаются к переходной зоне у поверхности, что способствует упрочнению поверхностных слоев проволочных образцов.

В таблице 5.17 представлены образцы, полученные в ходе холодного волочения прутков на волочильном стане однократного действия, с диаметром прутков 9 и 5 мм, до 2 мм.

Изменение толщины проволоки от 9 мм до 2 мм при температуре $750 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к вытянутости зерен твердого раствора в направлении действия деформации. Включения второй фазы дисперсные и распределяются одиночно вдоль границы зерен α - твердого раствора. При малых увеличениях они не определяются. Основные включения располагаются у поверхности образца.

При получении проволоки в условиях температуры $780 \text{ }^\circ\text{C}$ в центре образца образуются полосы, по центру наблюдаются небольшие скопления вторичных фаз. Включения наблюдаются при увеличении $\times 1000$ крат, при этом увеличении вторичные фазы видны по границам α - твердого раствора. При малых увеличениях они не наблюдаются. При повышении температуры деформации от 750 до $780 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается повышение строчечности структурных составляющих.

При получении проволоки от $\varnothing 5$ мм до $\varnothing 2$ мм край образца не протравливается, и при увеличении $\times 200$ микроструктура не выявляется, с увеличением разрешающей способности до $\times 500$ видны полосы деформации, структурные составляющие: зерна α - твердого раствора и мелкие интерметаллиды, которые расположены мелкими группами.

На основании изученных закономерностей изменения механических свойств сплава Al+1% РЗМ по методу БПП были получены эмпирические зависимости для определения механических свойств, в результате расчета по которым погрешность в среднем не превысила 5 %:

$$\sigma_B = a \cdot \varepsilon_{\Sigma}^2 + b \cdot \varepsilon_{\Sigma} + c \quad (5.9)$$

$$\delta = a \cdot \varepsilon_{\Sigma}^2 + b \cdot \varepsilon_{\Sigma} + c \quad (5.10)$$

где a, b, c – безразмерные коэффициенты, зависящие от воздействия температуры и скорости вращения валков на сплав (табл. 5.18).

Таблица 5.18 – Эмпирические формулы для определения прочностных характеристик сплава

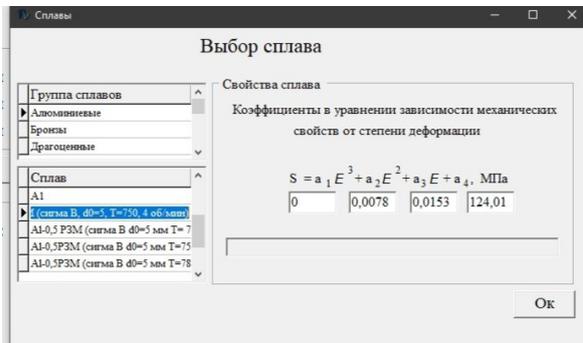
Температура и скорость	Механические свойства	Безразмерные коэффициенты		
		a	b	c
$T = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$	σ_{ϵ}	0,0078	-0,0153	124,01
	δ	0,00007	-0,1735	17,854
$T = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$	σ_{ϵ}	0,0081	-0,061	116,38
	δ	0,0037	-0,6127	30,122
$T = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$	σ_{ϵ}	0,008	-0,1035	119,81
	δ	0,0027	-0,5447	30,047
$T = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$	σ_{ϵ}	0,0051	-0,1644	120,25
	δ	0,0034	-0,6277	33,093

Зависимость $\sigma_B = f(\varepsilon_{\Sigma})$ и $\delta = f(\varepsilon_{\Sigma})$ исследуемого сплава Al+1% РЗМ характеризуется в основном скоростью вращения валков и температурой, наблюдается закономерность. При дальнейшем увеличении температуры и скорости вращения валков изменение значения прочностных характеристик уменьшается, но увеличиваются пластические характеристики. Характер роста временного сопротивления для представленных режимов различается незначительно.

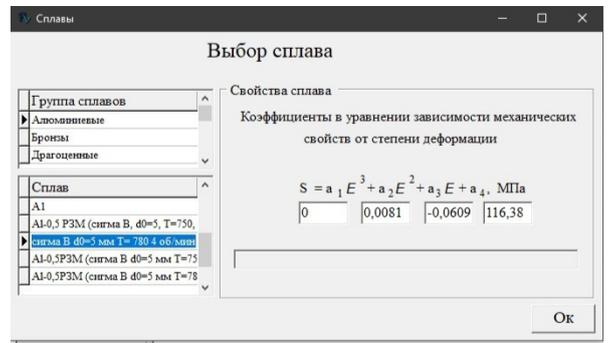
Для сплава характерны самые низкие прочностные характеристики при скорости 4 об/мин и температуре 750 °С. Объясняется это тем, что при повышении скорости вращения валков повышается температура в очаге деформации, что ведет к разупрочнению металла. Пластические характеристики достигают самых высоких показателей при температуре 780 °С и скорости 8 об/мин, так как в этом случае растет величина энергии активации процесса деформации.

При волочении на однократном стане с диаметра проволоки 5 миллиметров до 2 мм за 12 переходов будет применен более производительный многократный волочильный стан с маршрутом в 10 переходов. В свою очередь это даст прирост производительности за счет уменьшения времени, затрачиваемого на производство продукции. Разработка будет производиться в автоматизированной системе "Provol", где будет разработан режим получения проволоки для сплава Al+1 % РЗМ, а также будет произведен анализ режима.

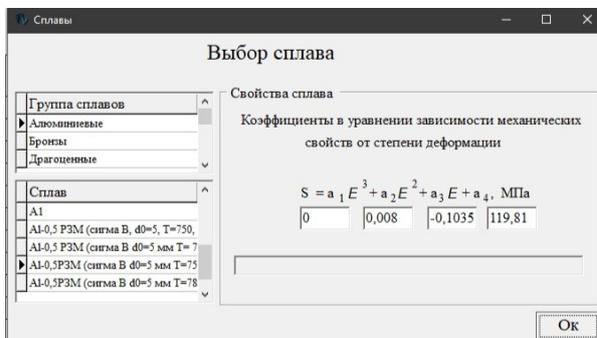
Основываясь на том, что основными данными для разработки рациональных технологических режимов волочения являются свойства обрабатываемого металла, таблица по сплавам представлена на рисунке 5.23 и содержит аналитические зависимости экспериментальных данных по механическим свойствам рассматриваемых сплавов.



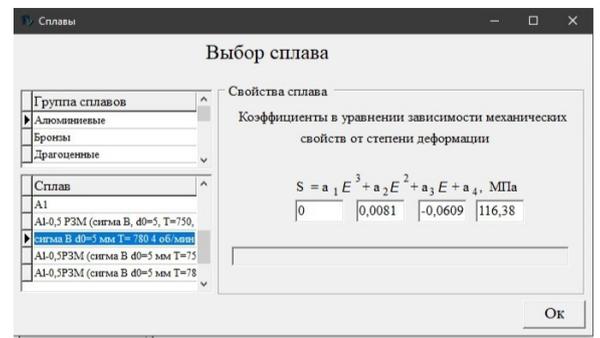
а



б



в



г

Рисунок 5.23 – Меню выбора материала, а – $T = 750 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; б – $T = 750 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$;
в – $T = 780 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; г – $T = 780 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$

Основой практического воплощения схемы производства полуфабрикатов из сплавов служит технологическое оборудование, обеспечивающее обработку и формирование деформированных заготовок, таких как прутки и проволока. На рисунке 5.24 показан выбор оборудования, а также характеристики стана.

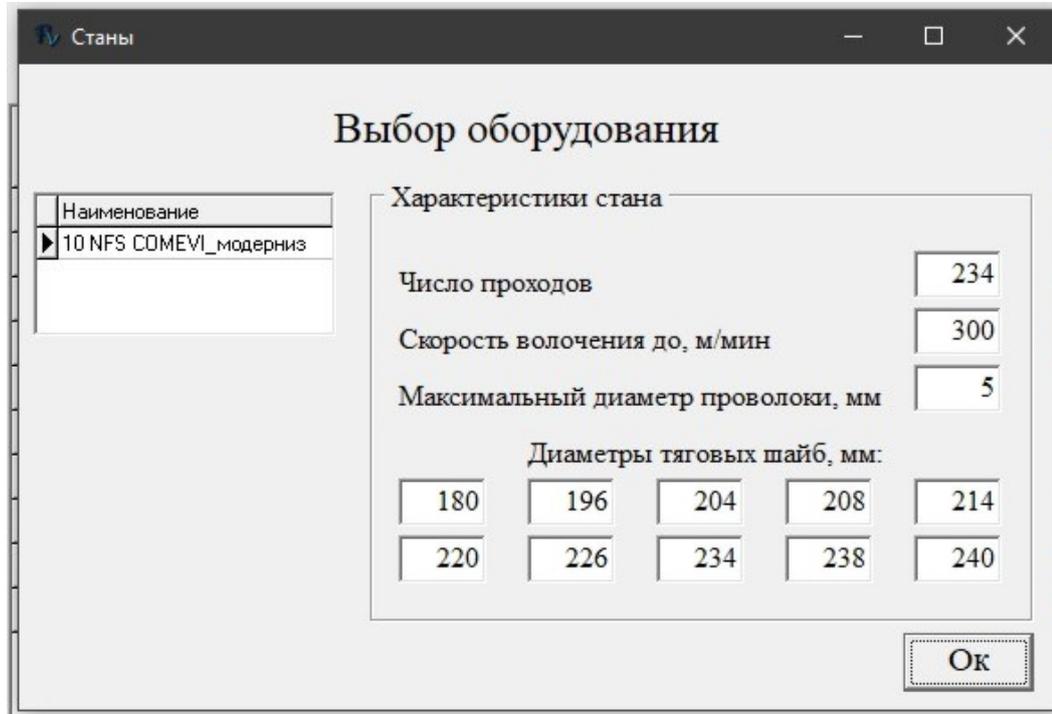


Рисунок 5.24 – Меню выбора оборудования волоченного стана и его характеристики

Далее определяли характеристики процесса волочения и кинематических параметров используемого для этого оборудования:

- безразмерный коэффициент, учитывающий физическое упрочнение металла $K_{\text{вол}}^B$;
- напряжение волочения $\sigma_{\text{вол}}^B$;
- коэффициент запаса в каждом проходе $\eta_{\text{зап}}^B$;
- относительная скорость скольжения при движении проволоки по поверхности тяговой шайбы $S_i^{\text{отн}}$;
- коэффициенты кинематической вытяжки $S_i^{\text{отн}}$;
- степень деформации $\epsilon^{\text{отн}}$.

Анализ графиков на рисунке 5.25 показал, что суммарные степени деформации имеют максимальное значение 84% для всей линейки сплавов. Это соответствует пластическим характеристикам сплавов и позволит не проводить отжиг между проходами, так как не достигается 95%. Анализ результатов показывает, что новые режимы позволяют уменьшить количество переходов, и при этом не достигнув суммарной степени деформации 95%.

Анализируемый режим волочения показывает равномерное распределение степени деформации, что должно положительно сказаться на реализации технологического процесса волочения с применением машин многократного волочения.

На рисунке 5.26 можно наблюдать графики, отражающие напряжение волочения в каждом проходе для всей линейки сплавов.

При анализе напряжения волочения можно заметить следующие максимальные значения: 86,17 МПа, 80,46 МПа, 82,44 МПа и 84,15 МПа, что позволяет увидеть закономерность влияния температуры и скорости вращения валков. На рисунке 5.26 (б) можно увидеть самое низкое напряжение, что говорит о благоприятном влиянии температуры при одинаковой скорости с графиком 5.26 (а). То же самое происходит с влиянием скорости на напряжение. Уменьшение напряжения волочения при увеличении скорости вращения валков. Повышение температуры дает лучший показатель, нежели увеличение скорости, эта разница 2 МПа. Увеличение скорости и температуры одновременно не дало такого эффекта, чем увеличение одного или второго параметра по отдельности. Напряжение волочения изменяется по ходу изменения площади поперечного сечения: чем меньше площадь, тем ниже напряжение.

Характер изменения усилия вытяжки, представленный на рисунке 5.27, аналогичен характеру изменения напряжения волочения. Анализ результатов показывает, что во всей линейке сплавов самое низкое усилие у сплава с параметрами $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ равно 1114,36 Н. Самый высокий показатель усилия вытяжки линейки сплавов $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ равно 1193,42 Н, что в свою очередь ведет к выводу, что при температуре $750 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличение скорости дало эффект снижения усилия вытяжки, хотя ситуация кардинально меняется с температурой $780 \text{ }^\circ\text{C}$, это можно увидеть на рисунке 5.27 (в, г), где при увеличении скорости вращения валков начальное усилие вытяжки повышается. Зная эти факты, оптимальным будет увеличение скорости при температуре $750 \text{ }^\circ\text{C}$, хоть и не исключает остальную линейку сплавов.

Коэффициент вытяжки (или вытяжка) показывает во сколько раз увеличилась длина или уменьшилась площадь поперечного сечения изделия за переход волочения. Анализ графиков коэффициента вытяжки дает понять, что характер движения распределен равномерно и аналогичен с напряжением волочения. Предлагаемый технологический режим обработки для представленного сплава дает понять одинаковые ли коэффициенты вытяжки на каждом проходе (рис. 5.28).

Скорость прохождения проволоки и прутков через волоки определяет производительность волочения. Чем больше скорость, тем больше производительность. При многократном волочении, когда проволока непрерывно проходит через несколько волок о производительности судят по скорости волочения через последнюю волоку. Исходя из формулы относительной скорости скольжения, которая показывает разницу скорости тяговых

шайб и скорости проволоки, деленной на скорость тяговых шайб, можно сделать вывод о том, насколько высокая производительность процесса. График скорости показывает плавное снижение относительной скорости скольжения, что говорит о том, что скорость переходов выбрана правильно, что в свою очередь дает гарантию безобрывного производства. А так как значение скорости одинаковое, то режим подходит для всех моделей представленных сплавов. Графики относительной скорости скольжения для всех представленных режимов показаны на рисунке 5.29.

Коэффициент запаса процесса представлен на рисунке 5.30, который позволяет определить безобрывность процесса производства проволоки. Так как существует предельное обжатие, при котором величина коэффициента запаса γ_3 становится меньше допустимого значения, и происходит обрыв проволоки, что не происходит. В данном случае величина коэффициента запаса повышается постепенно от перехода к переходу до конца обработки.

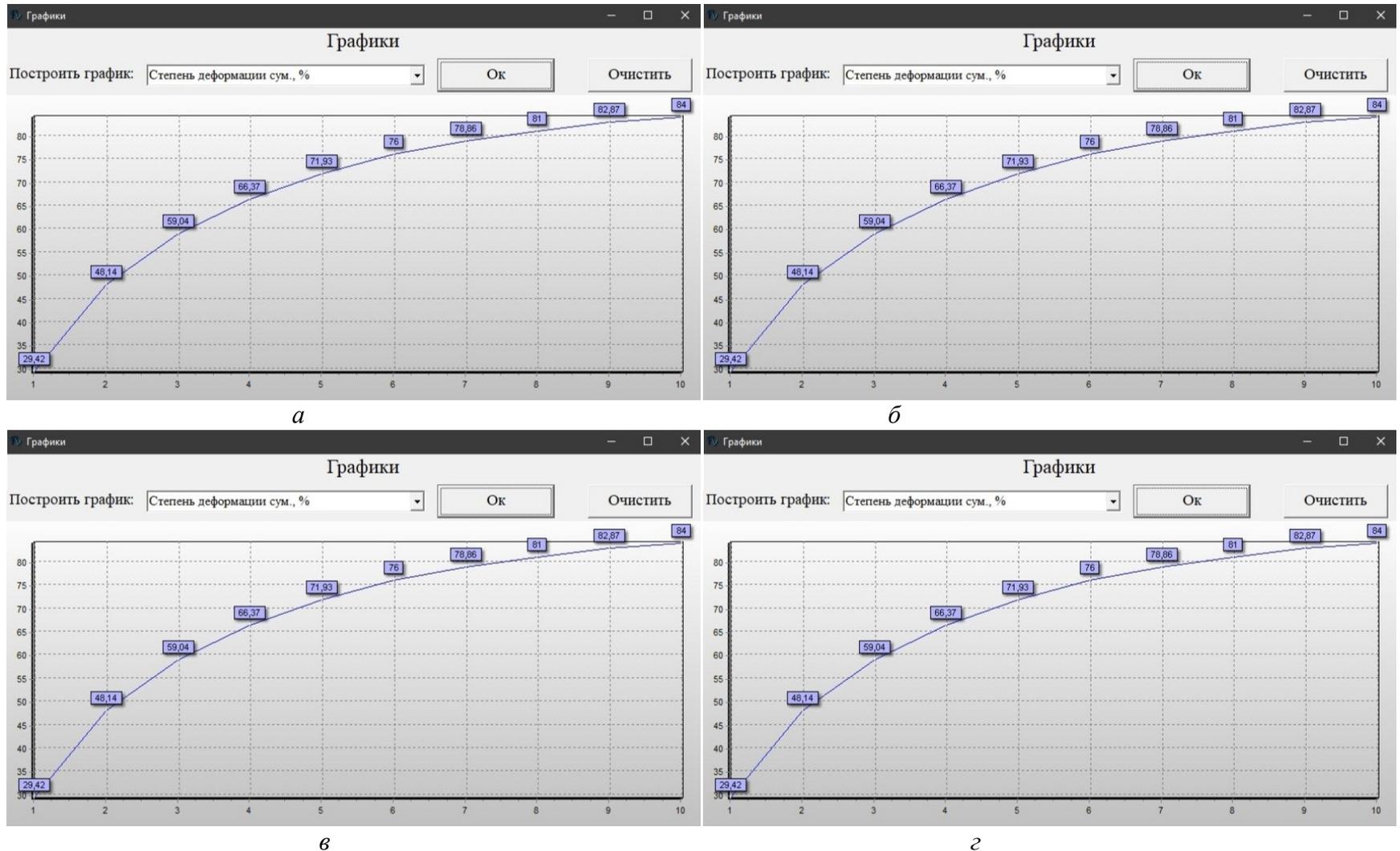
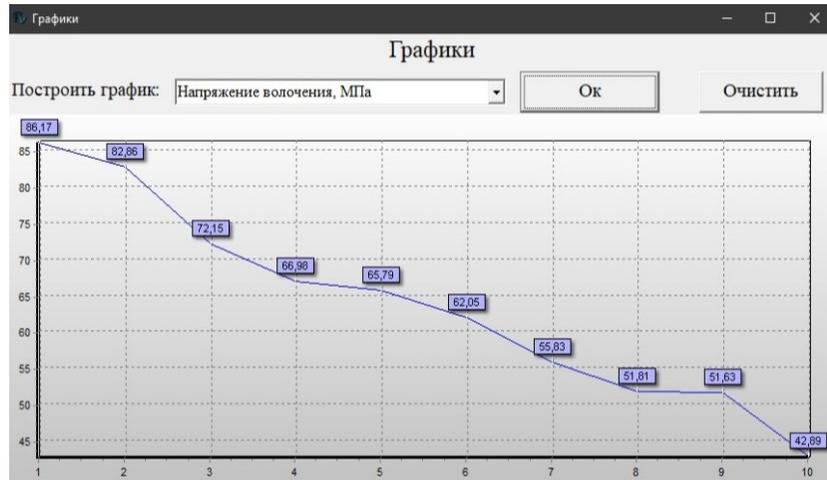
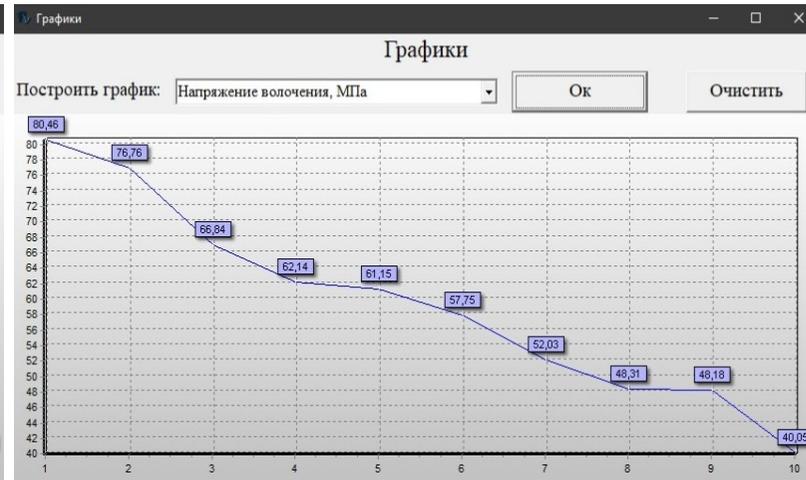


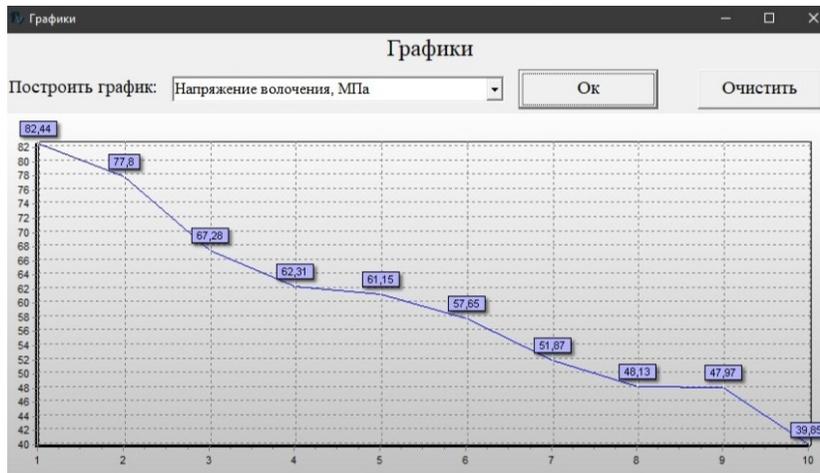
Рисунок 5.25 – График суммарной степени деформации; *a* – $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; *б* – $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$; *в* – $T = 780 \text{ }^\circ\text{C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; *г* – $T = 780 \text{ }^\circ\text{C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$



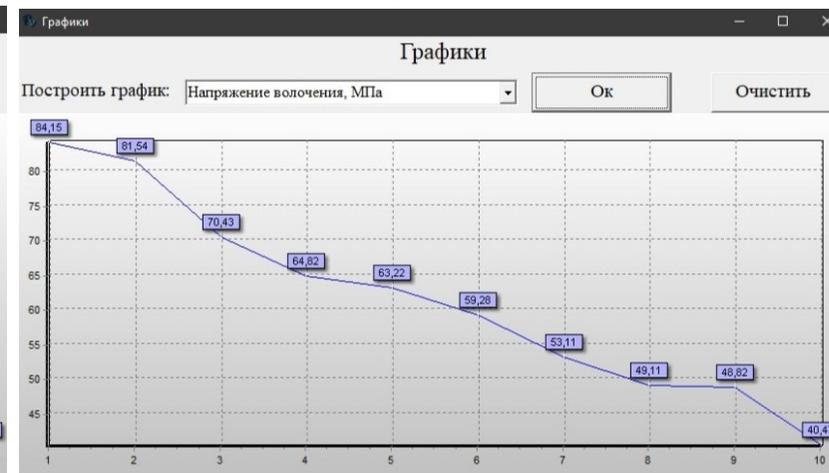
а



б



в



г

Рисунок 5.26 – Графики напряжения волочения; а – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; б – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$; в – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; г – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

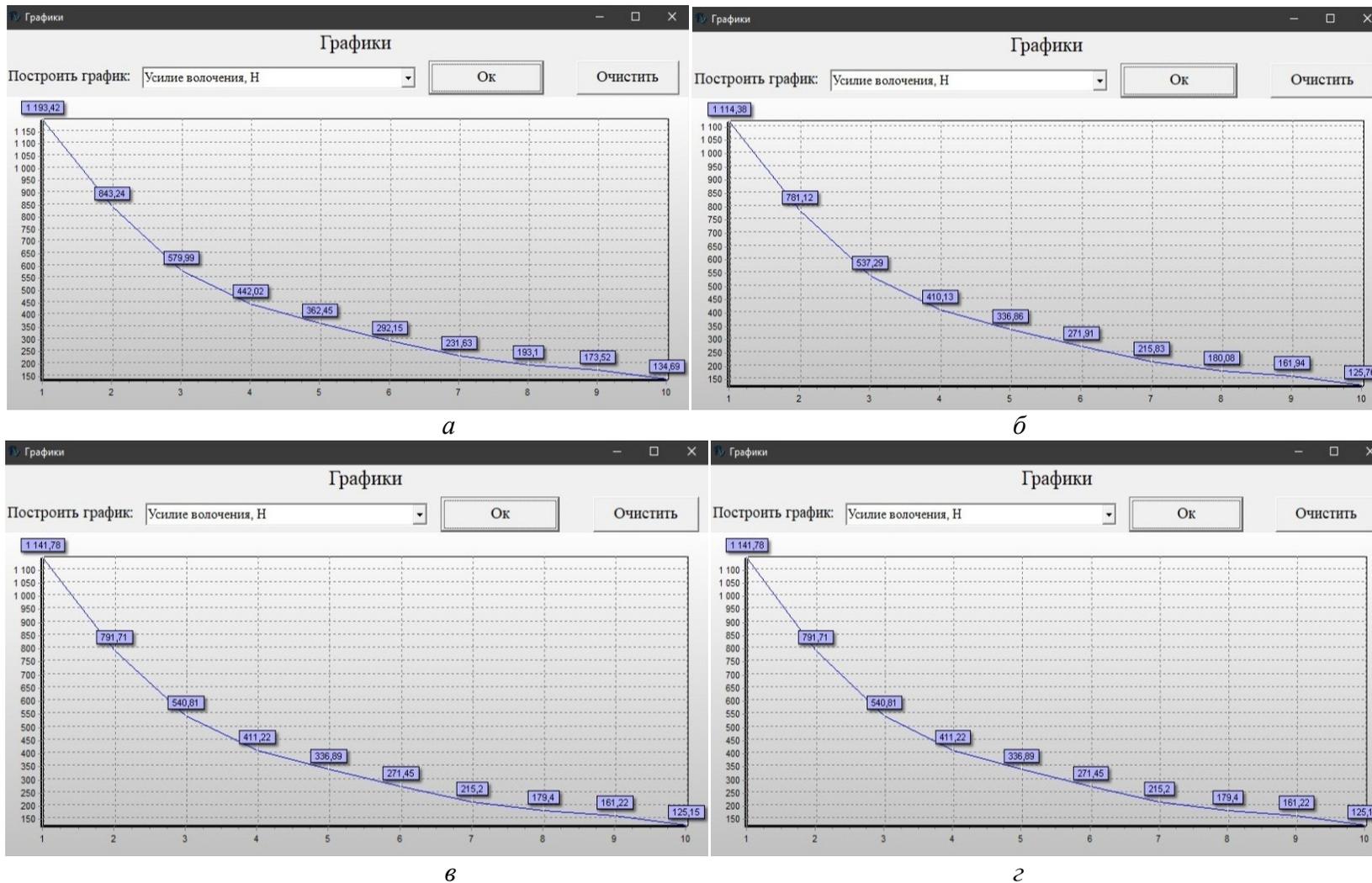


Рисунок 5.27 – График усилия волочения; *a* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *б* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$; *в* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *г* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

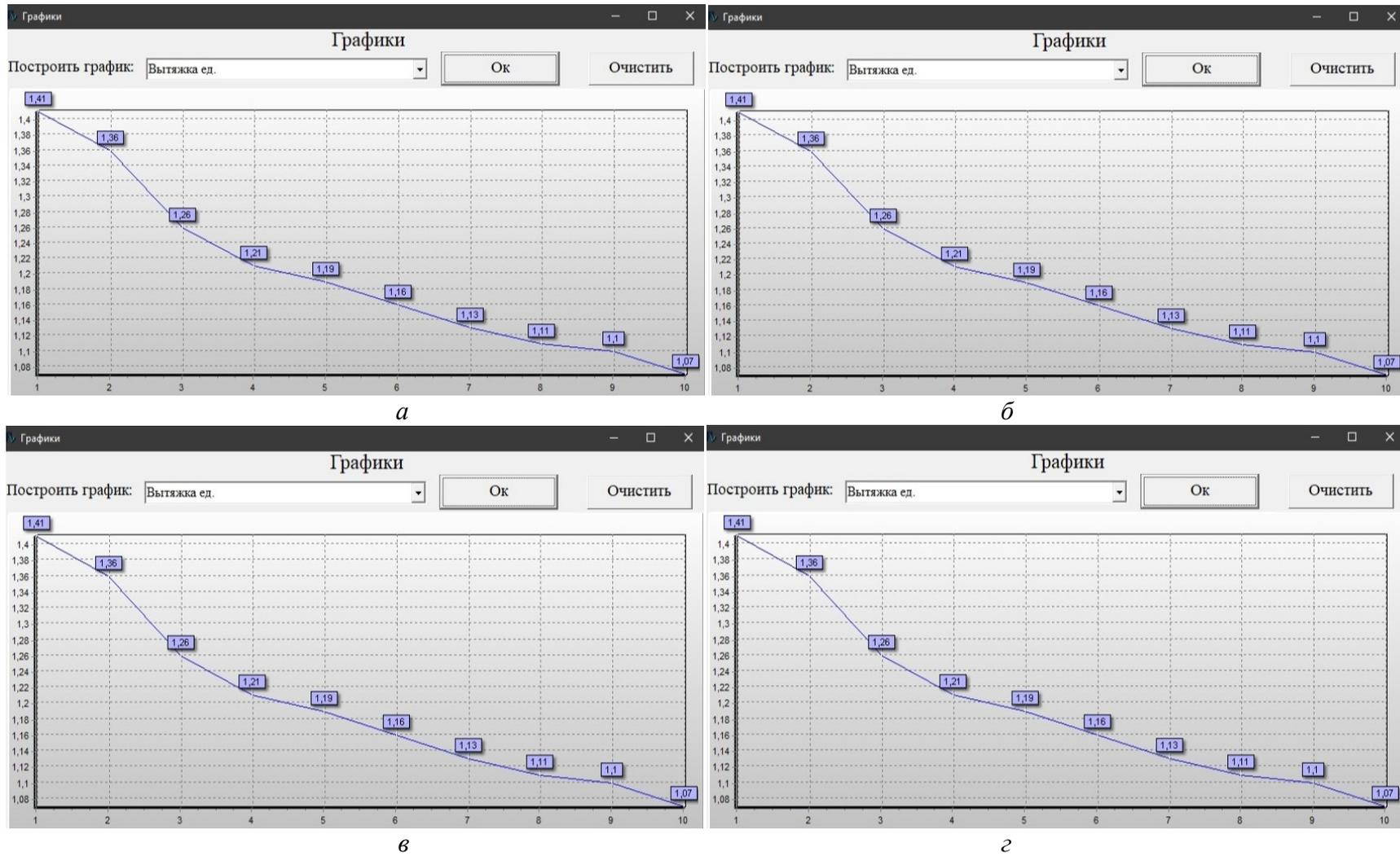


Рисунок 5.28 – График коэффициента вытяжки; *а* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *б* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$; *в* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *г* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

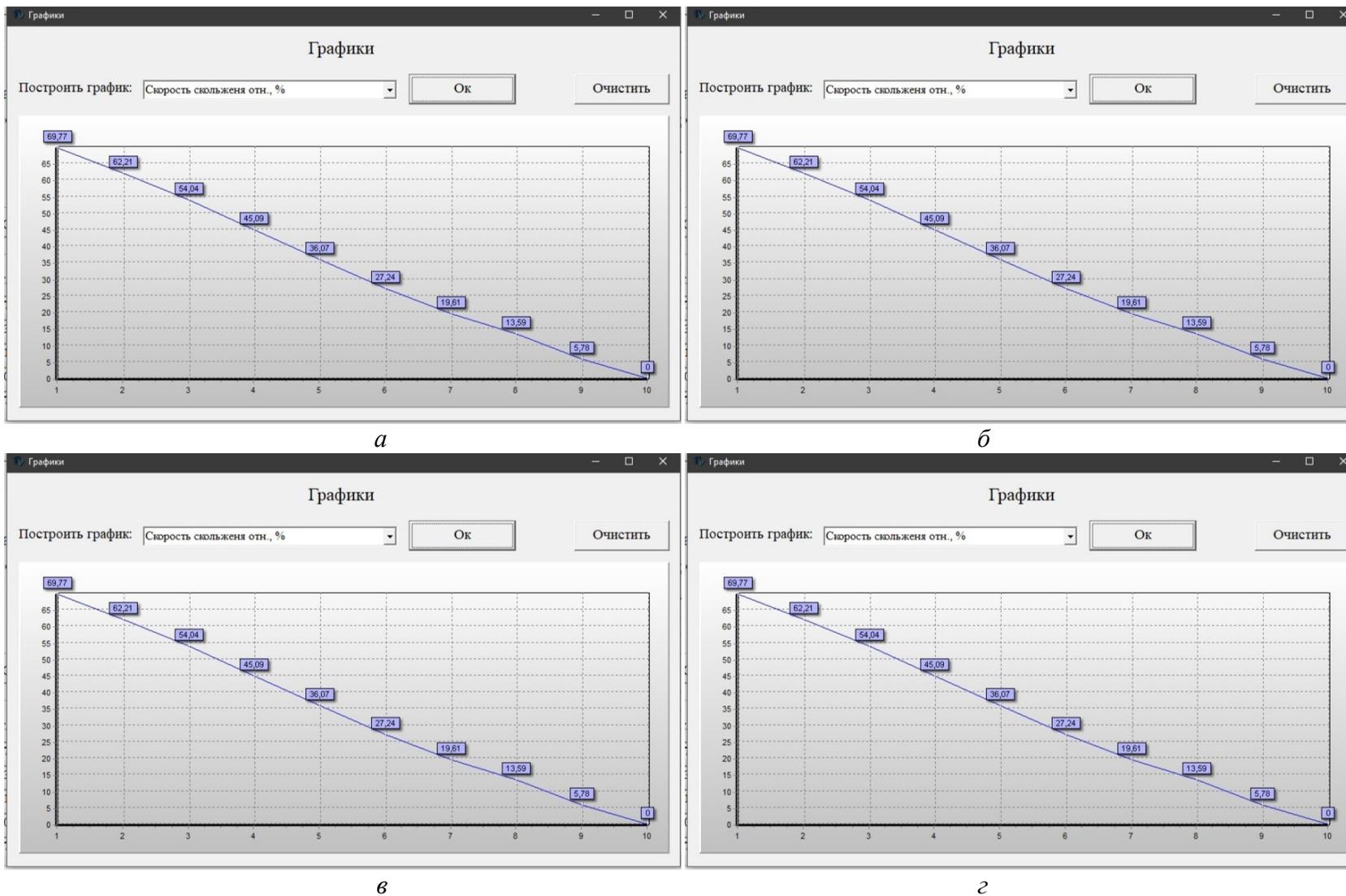


Рисунок 5.29 – График скорости скольжения; *a* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *б* – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$; *в* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; *г* – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

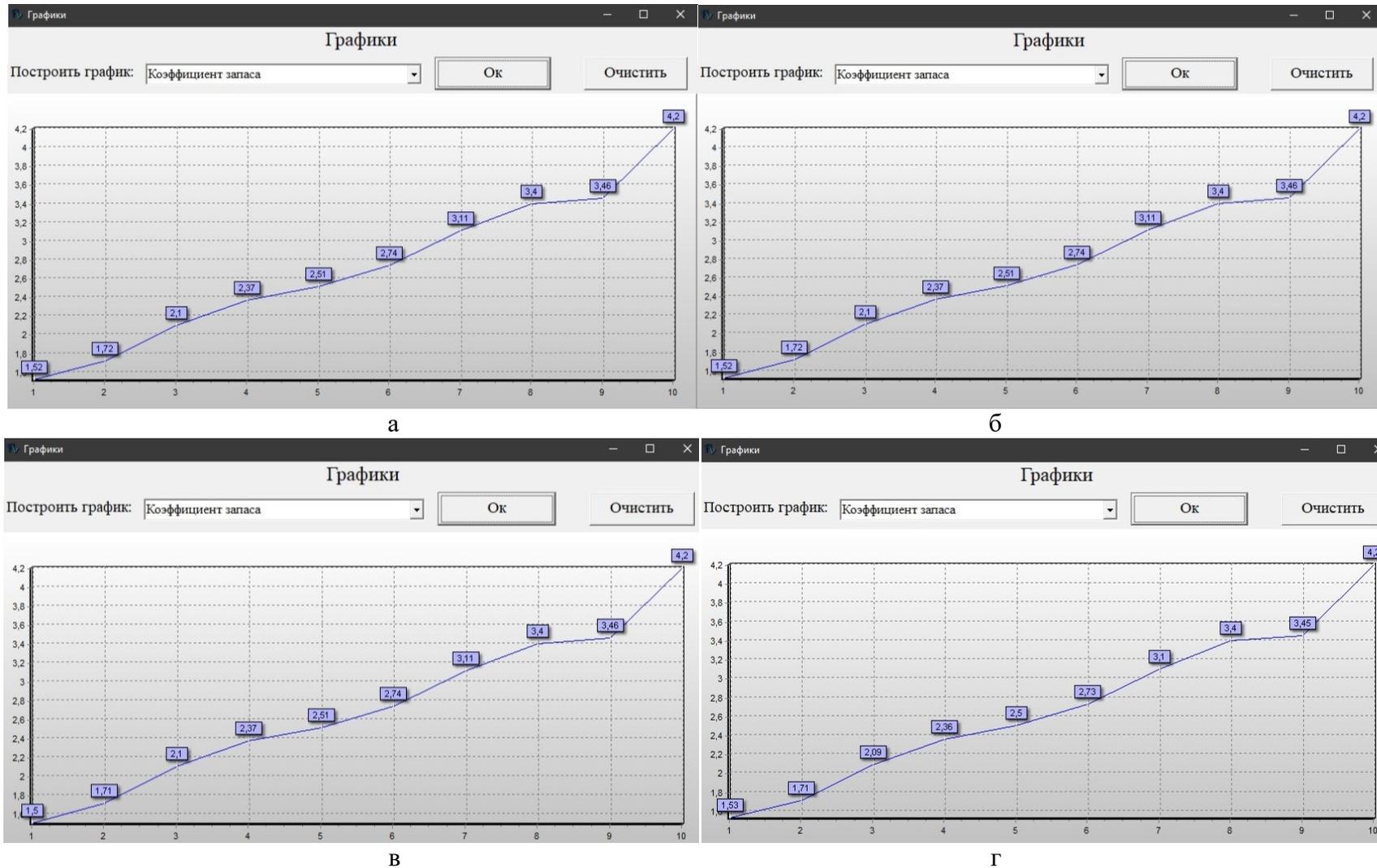


Рисунок 5.30 – График коэффициента запаса; а – $T = 750 \text{ °C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; б – $T = 750 \text{ °C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$; в – $T = 780 \text{ °C}$ $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$; г – $T = 780 \text{ °C}$ $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$

На рисунках 5.31 и 5.32 представлены таблицы со всеми значениями линейки сплавов, использовавшихся в графиках, показанных выше.

PROVOL

Справка База данных Выход

Главная Листовая прокатка Сортовая прокатка Волочение

Анализ

Проектирование

Ввод данных **Результаты расчетов**

Введите исходные данные

Начальный диаметр мм

Конечный диаметр мм

Средняя вытяжка мм

Оборудование Сплав Ок

Вытяжки по проходам

Введите значения вытяжек по проходам:

1: 6:

2: 7:

3: 8:

4: 9:

5: 10:

Очистить Расчет Графики Отчет

	Диаметр, мм	Вытяжка ед.	Степень деформации, %	Напряжение волочения, МПа	Коэффициент запаса	Усилие волочения, Н	Диаметр тигровой шайбы, мм	Скорость проволоки, м/с	Скорость шайбы, м/с	Скорость скольжения абс., м/с
1	4,2	1,41	29,42	86,17	1,52	1193,42	179,99	0,22	0,75	0,52
2	3,6	1,36	48,14	82,86	1,72	843,24	196	0,3	0,81	0,5
3	3,19	1,26	59,04	72,15	2,1	579,99	203,99	0,39	0,84	0,45
4	2,89	1,21	66,37	66,98	2,37	442,02	207,99	0,47	0,86	0,39
5	2,64	1,19	71,93	65,79	2,51	362,45	213,99	0,57	0,89	0,32
6	2,44	1,16	76	62,05	2,74	292,15	220	0,66	0,91	0,24
7	2,29	1,13	78,86	55,83	3,11	231,63	226	0,75	0,94	0,18
8	2,17	1,11	81	51,81	3,4	193,1	234	0,84	0,97	0,13
9	2,06	1,1	82,87	51,63	3,46	173,52	237,99	0,93	0,99	0,05
10	1,99	1,07	84	42,89	4,2	134,69	239,99	1	1	0

а

PROVOL

Справка База данных Выход

Главная Листовая прокатка Сортовая прокатка Волочение

Анализ

Проектирование

Ввод данных **Результаты расчетов**

Введите исходные данные

Начальный диаметр мм

Конечный диаметр мм

Средняя вытяжка мм

Оборудование Сплав Ок

Вытяжки по проходам

Введите значения вытяжек по проходам:

1: 6:

2: 7:

3: 8:

4: 9:

5: 10:

Очистить Расчет Графики Отчет

	Диаметр, мм	Вытяжка ед.	Степень деформации, %	Напряжение волочения, МПа	Коэффициент запаса	Усилие волочения, Н	Диаметр тигровой шайбы, мм	Скорость проволоки, м/с	Скорость шайбы, м/с	Скорость скольжения абс., м/с
1	4,2	1,41	29,42	80,46	1,51	1114,38	179,99	0,22	0,75	0,52
2	3,6	1,36	48,14	76,76	1,72	781,12	196	0,3	0,81	0,5
3	3,19	1,26	59,04	66,84	2,1	537,29	203,99	0,39	0,84	0,45
4	2,89	1,21	66,37	62,14	2,38	410,13	207,99	0,47	0,86	0,39
5	2,64	1,19	71,93	61,15	2,51	336,86	213,99	0,57	0,89	0,32
6	2,44	1,16	76	57,75	2,74	271,91	220	0,66	0,91	0,24
7	2,29	1,13	78,86	52,03	3,11	215,83	226	0,75	0,94	0,18
8	2,17	1,11	81	48,31	3,4	180,08	234	0,84	0,97	0,13
9	2,06	1,1	82,87	48,18	3,46	161,94	237,99	0,93	0,99	0,05
10	1,99	1,07	84	40,05	4,2	125,76	239,99	1	1	0

б

Рисунок 5.31 – Таблица результатов расчетов; а – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$; б – $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

PROVOL

Справка | База данных | Выход

Главная | Листовая прокатка | Сортовая прокатка | Волочение

Анализ

Проектирование

Ввод данных

Введите исходные данные

Начальный диаметр: 5 мм

Конечный диаметр: 2 мм

Средняя вытяжка: 1,206 мм

Оборудование: Сплав: Ок

Вытяжки по проходам

Введите значения вытяжек по проходам:

1: 1,417 6: 1,170
 2: 1,361 7: 1,135
 3: 1,266 8: 1,113
 4: 1,218 9: 1,109
 5: 1,198 10: 1,071

Очистить | Расчет | Графики | Отчет

Результаты расчетов

	Диаметр, мм	Вытяжка ед.	Степень деформации, %	Напряжение волочения, МПа	Коэффициент запаса	Усилие волочения, Н	Диаметр таловой шайбы, мм	Скорость проволоки, м/с	Скорость шайбы, м/с	Скорость скольжения абс., м/с
1	4,2	1,41	29,42	82,44	1,5	1141,78	179,99	0,22	0,75	0,52
2	3,6	1,36	48,14	77,8	1,71	791,71	196	0,3	0,81	0,5
3	3,19	1,26	59,04	67,28	2,1	540,81	203,99	0,39	0,84	0,45
4	2,89	1,21	66,37	62,31	2,37	411,22	207,99	0,47	0,86	0,39
5	2,64	1,19	71,93	61,15	2,51	336,89	213,99	0,57	0,89	0,32
6	2,44	1,16	76	57,65	2,74	271,45	220	0,66	0,91	0,24
7	2,29	1,13	78,86	51,87	3,11	215,2	226	0,75	0,94	0,18
8	2,17	1,11	81	48,13	3,4	179,4	234	0,84	0,97	0,13
9	2,06	1,1	82,87	47,97	3,46	161,22	237,99	0,93	0,99	0,05
10	1,99	1,07	84	39,85	4,2	125,15	239,99	1	1	0

а

PROVOL

Справка | База данных | Выход

Главная | Листовая прокатка | Сортовая прокатка | Волочение

Анализ

Проектирование

Ввод данных

Введите исходные данные

Начальный диаметр: 5 мм

Конечный диаметр: 2 мм

Средняя вытяжка: 1,206 мм

Оборудование: Сплав: Ок

Вытяжки по проходам

Введите значения вытяжек по проходам:

1: 1,417 6: 1,170
 2: 1,361 7: 1,135
 3: 1,266 8: 1,113
 4: 1,218 9: 1,109
 5: 1,198 10: 1,071

Очистить | Расчет | Графики | Отчет

Результаты расчетов

	Диаметр, мм	Вытяжка ед.	Степень деформации, %	Напряжение волочения, МПа	Коэффициент запаса	Усилие волочения, Н	Диаметр таловой шайбы, мм	Скорость проволоки, м/с	Скорость шайбы, м/с	Скорость скольжения абс., м/с
1	4,2	1,41	29,42	84,15	1,53	1165,51	179,99	0,22	0,75	0,52
2	3,6	1,36	48,14	81,54	1,71	829,79	196	0,3	0,81	0,5
3	3,19	1,26	59,04	70,43	2,09	566,13	203,99	0,39	0,84	0,45
4	2,89	1,21	66,37	64,82	2,36	427,79	207,99	0,47	0,86	0,39
5	2,64	1,19	71,93	63,22	2,5	348,29	213,99	0,57	0,89	0,32
6	2,44	1,16	76	59,28	2,73	279,1	220	0,66	0,91	0,24
7	2,29	1,13	78,86	53,11	3,1	220,31	226	0,75	0,94	0,18
8	2,17	1,11	81	49,11	3,4	183,07	234	0,84	0,97	0,13
9	2,06	1,1	82,87	48,82	3,45	164,07	237,99	0,93	0,99	0,05
10	1,99	1,07	84	40,47	4,2	127,09	239,99	1	1	0

б

Рисунок 5.32 – Таблица результатов расчетов; а – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 0,74\text{ c}^{-1}$;
 б – $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1,49\text{ c}^{-1}$

Представленные режимы позволяют обеспечить прирост производительности за счет уменьшения времени, затрачиваемого на производство деформированных полуфабрикатов.

5.4. Выводы по главе

Таким образом, проанализировав результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы.

1. Проведено планирование и выполнены экспериментальные исследования по реализации процесса БПП с асимметричным очагом деформации для сплавов 01417 и Al-1%РЗМ при варьировании температуры обработки, скорости и степени деформации.
2. Проведен анализ полученных экспериментальных данных по оценке энергосиловых параметров процессов БПП, а также сравнение их с данными, полученными в результате расчета по регрессионным формулам. Анализ графических зависимостей энергосиловых параметров процессов СПП и БПП от варьируемых факторов показал, что в процессе СПП сила, действующая на матрицу и валки, выше на 100-150 кН, чем в процессе БПП при прочих равных условиях.
3. Проведена оценка структуры деформированных полуфабрикатов из сплавов 01417 и Al-1%РЗМ, при этом установлено влияние на нее таких факторов, как степень и скорость деформации, температура обработки.
4. Представлены графические зависимости механических свойств прутков, полученных методом БПП, от варьируемых факторов, которые показали, что в целом пресс-изделия, полученные методом БПП более пластичны, при этом временное сопротивление ниже на 50-80 МПа, а относительное удлинение выше на 5-6 % по сравнению с данными, полученными при реализации процесса СПП для сплава Al-1%РЗМ.
5. Предложена и опробована технологическая схема для производства пресс-изделий небольшого поперечного сечения из сплава 01417, включающая в качестве основных переделов получение литой заготовки с помощью ЭМК и ее обработку с использованием метода СПП или применения метода БПП.
6. Разработана технологическая схема получения электротехнической проволоки путем использования трех переделов (метод БПП, сортовая прокатка, волочение) при этом с их помощью получены опытные партии проволоки.
7. Произведен расчет маршрута волочения проволоки из сплава 01417 на волочильной машине со скольжением типа «Т 10 N.F.S.», и установлены параметры режимов волочения для получения проволоки диаметром 0,3 мм.
8. Исследования позволили утверждать, что предложенные технологические режимы обеспечивают при заданных температурно-скоростных и деформационных параметрах процесса механические свойства проволоки в соответствии с ТУ 1-809-1038-2018, а также удовлетворительные значения электросопротивления и термостойкости.
9. Результаты исследований прошли промышленную апробацию (Приложение А, Г) и внедрены в производственный процесс на ООО «Завод современных материалов».

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg, ЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия. Материалы главы опубликованы в работах [1, 165, 237-246].

6.1. Исследование реологических свойств сплава 1580

В базу данных, применяемых в производстве и в текущих исследованиях, загружались реологические свойства для послудующего моделирования (см. рис. 6.1).

Проанализировав доступную научную литературу, для проведения исследований был выбран сплав 01570. Данный сплав широко используется в промышленности, благодаря своим выдающимся показателям прочности, устойчивости к коррозии и детально изученным реологическим свойствам. Вместе с тем, его высокая стоимость, связанная с наличием дорогостоящего скандия (0,17-0,35 масс. %), ограничивает его более широкое распространение.

В качестве альтернативного варианта был рассмотрен сплав 1580, разработанный компанией РУСАЛ [163]. Содержание скандия в данном сплаве удалось понизить до 0,12%, что существенно отличается от показателя сплава 01570. Свойства сплавов 1580 и 01570 схожи [115, 164, 165, 238-245] (см. таблицу) 1.2.

Таблица 6.1 – Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Содержание элемента, масс. %											
	Mg	Mn	Si	Sc	Zr	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Ni	Al
01570	5,0-5,2	0,60	0,20	0,25	0,10	0,02	0,16	0,2	0,01	0,10	-	Основа
1580	5,27	0,49	0,13	0,12	0,13	0,02	0,15	0,16	0,011	0,01	0,006	Основа

Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава 1580 при нагревании с целью повышения эффективности технологических процессов и достижения желаемых прочностных свойств было проведено авторами статьи в научной работе [164]. Данные о реологических характеристиках сплава, полученные посредством кручения образцов,

изготовленных из однородного литого слитка, иллюстрируются на графике 6.1. [115, 165, 238-245].

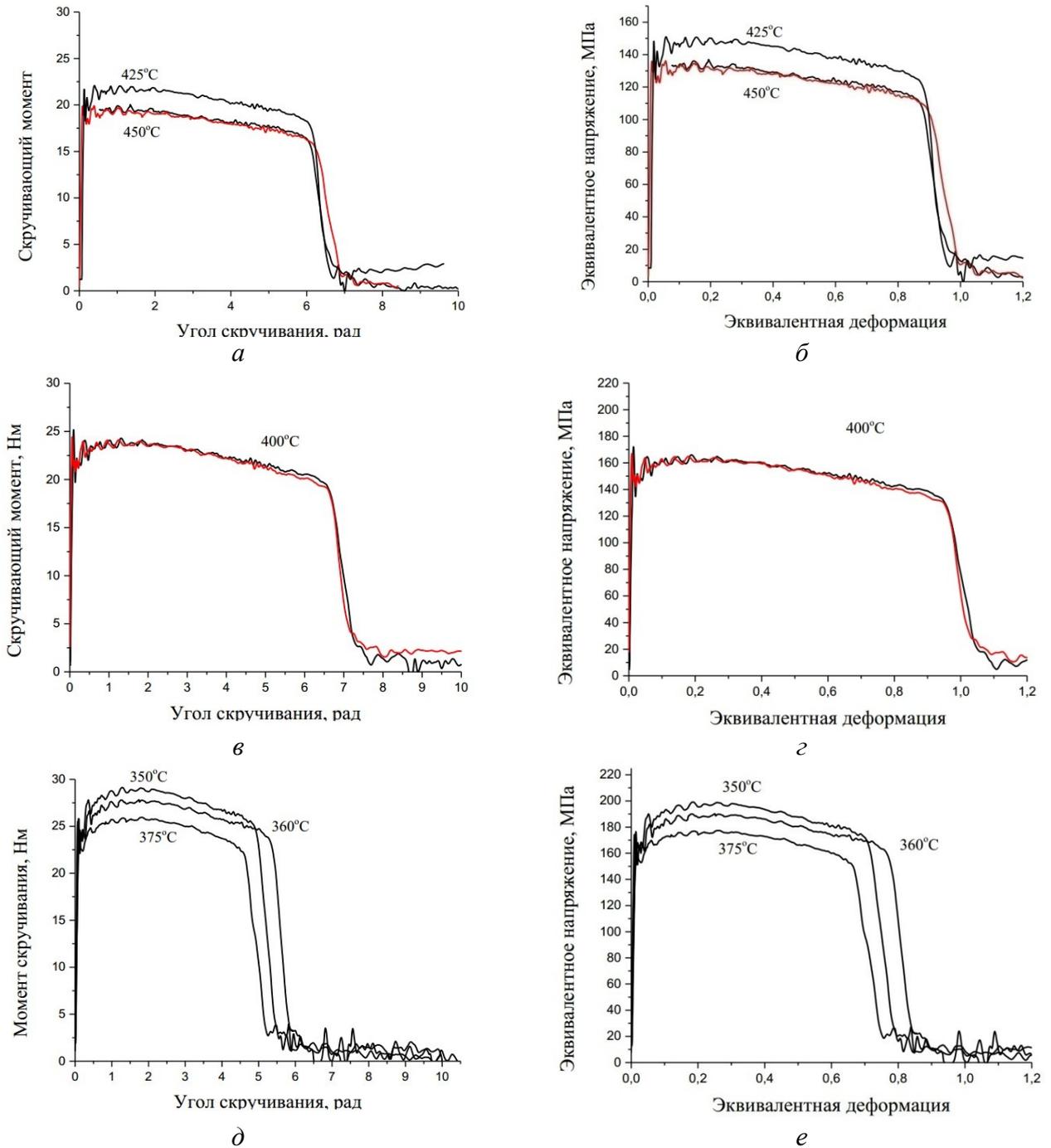


Рисунок 6.1 – Первичные кривые кручения со скоростью 10 с^{-1} (*a*, *в*, *д*) и диаграммы кручения со скоростью 10 с^{-1} в осях «эквивалентная деформация – эквивалентное напряжение» (*б*, *г*, *е*):

красные линии – повторные испытания

Образцы для исследования изготавливались из центрального объема по толщине отлитого полунепрерывным способом и гомогенизированного в промышленных условиях слитка диаметром 125 мм из сплава 1580.

Моделирование горячей деформации методом одноосного сжатия (осадки) и кручения проводилось на термомеханическом симуляторе Gleeble 3800 (рис. 6.2, а), установленном в Южно-Уральском государственном университете. Для этих целей применялись модули HydraWedge (рис. 6.2, б) и Torsion (рис. 6.2, в), соответственно [115, 165].

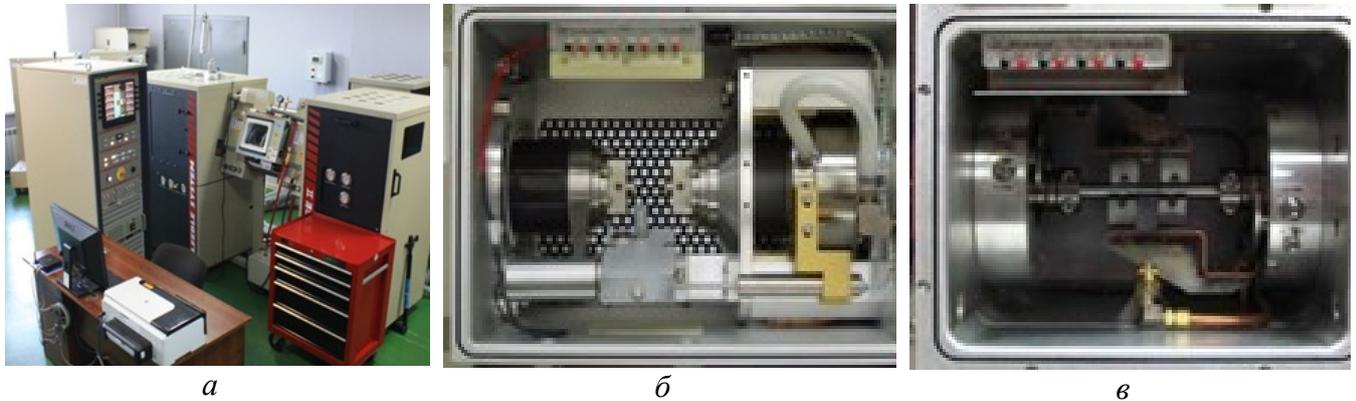


Рисунок 6.2 – Общий вид комплекса Gleeble 3800 (а) и рабочие камеры модулей HydraWedge (б) и Torsion (в)

Цилиндрические образцы $\varnothing 10$ и высотой 15 мм испытывались на сжатие. С целью снижения трения в точках контакта образца и бойков применялась графитовая фольга, толщина которой составляла 0,13 мм. Нагрев образца, размещенного внутри рабочей камеры с низким вакуумом, происходил путем непосредственного пропускания электрического тока. Контроль температуры выполнялся с помощью хромель-алюмелевой термопары, закрепленной при помощи сварки в центральной зоне образца. Перепад температуры вдоль высоты образца не превышал 3 °С.

Модуль Torsion симулятора термомеханических процессов Gleeble 3800 использовался для кручения цилиндрических образцов (165 мм длина, 7 мм радиус, рис. 6.3). Длина рабочей зоны была 20 мм, а радиус скругления 5 мм [115, 238-246].



Рисунок 6.3 – Изображение образца для испытаний

Для исследования деформационного отклика материала образцы подвергались испытаниям на кручение. Один конец образца жёстко фиксировался, в то время как к другому прикладывался крутящий момент. Температурный режим образца контролировался с помощью хромель-алюмелевой термопары (тип К), закреплённой сваркой в центральной части рабочей

области. Нагрев до температур деформации (350, 375, 400, 425 и 450 °С) осуществлялся со скоростью 3 °С/с, далее испытания проводились по методике, представленной в работе [165], затем были получены графики (рис. 6.1). Анализ показал, что пластичность материала существенно зависит от температуры деформации. При 425-450 °С разрушение происходило при угле скручивания около 6 радиан, при 400 °С – около 7 радиан, а при 350-375 °С – в диапазоне 4,5-5,3 радиан. Началом разрушения считался момент, когда крутящий момент начинал резко снижаться.

В результате проведенных исследований установлено следующее.

1. Проведено исследование характера деформации нового сплава, обозначенного как 1580, при одноосном осаживании. Испытания осуществлялись в температурном диапазоне 350-450 °С, а также в широком диапазоне скоростей деформации – от 0,01 до 30 с⁻¹ [115, 238-246]. Установившиеся напряжения текучести сплава увеличиваются с понижением температуры и ростом скорости деформации.
2. Установлено, что при низких скоростях деформации (0,01-1 с⁻¹) напряжения текучести уже после небольшой деформации выходят на установившийся (постоянный) уровень, отвечающий балансу между процессами деформационного упрочнения и динамического разупрочнения (возврата). Деформация с высокими скоростями 10 и 30 с⁻¹ сопровождается деформационным разогревом образцов и падением напряжений текучести с ростом величины деформации.
3. Получены формулы, описывающие напряжения текучести в установившемся режиме. Эти формулы выражаются через параметр Зинера-Холломона и позволяют точно предсказывать сопротивление сплава пластической деформации. При этом учитывается широкий диапазон температур и скоростей деформации, что необходимо для компьютерного моделирования и выбора температурно-скоростных режимов горячей деформации.
4. Показано, что коэффициент скоростной зависимости напряжений текучести сплава, являющийся одним из факторов, определяющих пластичность материала, резко падает с ростом скорости и понижением температуры деформации.
5. Были проведены испытания сплава на кручение, чтобы оценить его пластичность. Испытания выполнялись при температурах от 350 до 450 °С, и скорость кручения составляла 10 с⁻¹. В результате экспериментов выявлено, что максимальная эквивалентная деформация, которую материал выдерживает до начала разрушения, наблюдается при температуре 400°С и резко падает с понижением температуры до 35 °С.
6. Проведено сравнение диаграмм деформации кручением и одноосной осадкой, отвечающих одинаковым температурно-скоростным условиям деформации. Показано, что диаграммы деформации кручением и сжатием до деформаций порядка 0,6-0,8 с высокой точностью совпадают.

7. Междеформационные паузы при исследованных температурах деформации значительно увеличивают величину деформации, при которой начинается разрушение образцов. Повышение температуры деформации со скоростью 10 с^{-1} от 400-450 °С до 500 °С, также как ее понижение до 375 °С сопровождается падением пластичности сплава. При скорости деформации 1 с^{-1} пластичность сплава при температурах 400 °С и 500 °С [222] находится на одном уровне.

6.2. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований

Сварочную проволоку, предназначенную для исследования, производили с применением инновационной, разработанной технологии. Данный процесс включал в себя ряд стадий: сначала была получена заготовка, имеющая диаметр 9 мм. Это было достигнуто посредством комбинированного литья и последующей обработки методами прокатки и прессования [244]. Далее следовала холодная сортовая прокатка, а также волочение, что в конечном итоге обеспечивало достижение целевого диаметра проволоки, равного 3 мм.

В экспериментальных исследованиях методом БПП применяли уникальную установку совмещенной обработки [215] СЛиПП-2,5 (рис. 6.4, *a*), созданную на базе новых технических решений, защищенных авторскими патентами [18].

Эксперимент по методу БПП выполнялся по известной методике (см. главу 5), но при температуре 780-790 °С [115].

Для удобства заливки расплава в валки корпус рабочей клетки (см. рис. 6.4, *a*) был повернут на угол 45° и смонтирован на общем основании с гидравлическим прижимом матрицы к валкам. Валки с закрытым ящичным калибром имели разный диаметр: по выступу верхнего валка 482 мм, по дну канавки в нижнем валке 394 мм. Силовые параметры процесса деформации фиксировали с помощью кольцевых месдоз [18, 20].

Полученные прутки с диаметром в 9 мм послужили исходным материалом для изготовления сварочной проволоки, имеющей диаметр 3 мм. Производство последней осуществлялось посредством сортовой прокатки [115] на стане фирмы «Марио ди Майо» (рис. 6.4, *b*) с последующим волочением на цепном волочильном стане. Технические характеристики применяемого оборудования приведены в табл. 6.2.

Механические характеристики исследуемых образцов определялись путем статических испытаний на растяжение. В качестве инструмента для этих испытаний использовалась испытательная машина LFM 400 производства Walter Bai AG (Швейцария Конфедерация), с максимальной нагрузкой в 400 кН. Для каждого исследуемого значения проводилось тестирование трех образцов, а затем рассчитывалось среднее арифметическое значение [115, 238-246].



а



б

Рисунок 6.4 – Установка совмещенного литья, прокатки и прессования СЛиПП-2,5 (а)
и сортопрокатный стан AF200+180R (б)

При сварке экспериментальных образцов габаритами $3 \times 50 \times 100$ мм [115, 238-246] был соблюден следующий порядок действий. Первоначально листовые заготовки толщиной три миллиметра, полученные из плоского проката, промывали ацетоном. Главным назначением этой обработки было удаление жировых загрязнений. Данная очистка позволяла полностью избавиться от любых следов масел и жиров на металлической поверхности. По завершении этой стадии переходили к подготовке кромок, которые предстояло соединять между собой. Очистку концевых кромок от оксидной пленки производили ручным гравером, а в области будущего сварного шва применяли операцию шабрение. Для того чтобы обеспечить эффективный и равномерный отвод тепла от образцов во время сварки, использовали специальную подкладку, материалом которой служила медь. Эта подкладка также промывалась ацетоном, что обеспечивало нужный контакт [115, 238-246].

Проволоку для сварочных работ подготавливали вручную, используя фрезерование и шабрование.

Для соединения каждого образца длиной 50 мм использовалось 15–20 см проволоки с диаметром 3 мм. Подготовительные работы образцов и проволоки планировались таким образом, чтобы от очистки до сварки было не более 20 мин. Сборку образцов проводили на специально подготовленной медной основе (подложке), располагая концы соединяемых элементов вдоль общей оси с центром канавки (для обратного валика). Заготовки для сварки

соединяли плотным стыком, без каких либо зазоров. Для гарантии стабильного и однородного контакта заготовок с подложкой, а также точного их фиксирования, применяли прижимные устройства либо другие вспомогательные элементы.

Таблица 6.2 – Технические характеристики оборудования

Наименование параметра	Параметры оборудования		
	Установка СЛиПП-2,5	Сортопрокатный стан AF200+180R	Цепной волоочильный стан
Длина бочки валков, мм	250	200	-
Диаметр валков, мм	394/482	130	-
Размеры калибров, мм	10×22	5×5-14×14	-
Скорость, м/мин	0-30	26	10,2
Допустимое усилие, кН	300	60	50
Допустимый момент, кНм	172	80	-
Мощность электродвигателя кВт	45	7,5	25

Сварочные работы осуществлялись по принципу TIG-AC с использованием сварочного аппарата TIG200P в атмосфере защитного газа. В качестве электрода использовался вольфрамовый электрод марки WL-15 (лантанированный) диаметром 2,4 мм. Показатели режима сварки изложены в таблице 6.3 [115, 238-245].

Таблица 6.3 – Настройки сварки экспериментальных образцов плоского листового проката из сплавов 01570 и 1580

Характеристика	Значение
Время от начала подготовки образцов до сварки, мин	не более 20
Время сварки образца шириной 5 см, сек	20-30
Продувка аргона до сварки, сек	1-2
Ток сварки I _{св} , А	80-90
Расход аргона, л/мин	8-10
Продувка аргона после сварки, сек	5-6

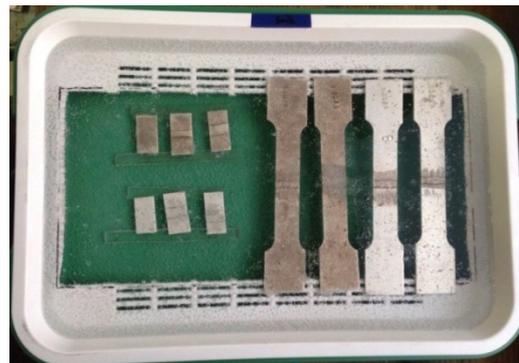
Далее проводился отбор образцов для оценки качества сварного шва методом радиографического контроля, согласно ГОСТ 7512-82. Примеры рентгеновских пленок сварных швов показаны на рисунке 6.5, а.

Для определения характера и интенсивности коррозионных повреждений исследуемых сплавов проводили ускоренные испытания на межкристаллитную коррозию (МКК). Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9.021-74 (раствор №1) и ASTM G 67 (деформированные образцы со сварным швом вдоль прокатки, и со сварным швом, поперек направления прокатки) [115, 238-246].

Образцы помещали в контейнер так, чтобы раствор имел доступ ко всем их поверхностям. Расположение образцов иллюстрирует рис. 6.5, б [115, 238-246].



а



б

Рисунок 6.5 – Рентгеновская пленка сварных швов (*а*) и схема расположения образцов для испытаний на МКК (*б*)

Металлографическое исследование проводилось с использованием оптического микроскопа Axio Observer.A1m в соответствии с ГОСТ 1778–70 [115, 238-246].

6.3. Моделирование процесса совмещенной обработки сплава 1580

Для построения модели были задействованы данные с оборудования совмещенной обработки СПП-200 и параметры, описывающие геометрические характеристики калибра, матрицы, заготовки и готового изделия (см. таблицу 2.1). Данные по реологическим свойствам (см. рис. 6.1) материала заготовки импортировались в среду DEFORM-3D вместе с созданными в пакете SolidWorks моделями инструментальной оснастки.

При моделировании процесса приняты следующие допущения и граничные условия:

- материал заготовки изотропный;
- материал валков и матрицы жесткопластический;
- к моменту прокатки сформирована заготовка с размерами поперечного сечения 14×14 мм;

- степень деформации при прокатке $\varepsilon = 50 \%$;
- показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы $\psi_M=0,3$;
- показатель трения по Зибелю на валках и калибрующем пояске матрицы $\psi_B=0,9$;
- количество конечных элементов, на которые разбита заготовка, 32 тыс. шт.

На рис. 6.6 показан характер формоизменения металла в процессе совмещенной обработки и распределение температур в очаге деформации.

Ранее выполненные изыскания деформации металла при обработке совмещенными способами на агрегате СПП-200 [18, 20] дают основание полагать, что очаг деформации включает в себя области захвата и прокатки металла, распрессовки и выдавливания (прессования). Удалось выявить, что в ходе обжатия заготовки валками происходит ее изгиб в сторону валка с большим диаметром, то есть с выступом. Как только участок прокатки завершен, наблюдается изгиб в сторону валка меньшего диаметра, имеющего канавку, что приводит к явлению, именуемому оковыванием. Далее заготовка направляется в матрицу, где стартует процесс распрессовки металла в рабочей зоне калибра, сформированной валками и самой матрицей.

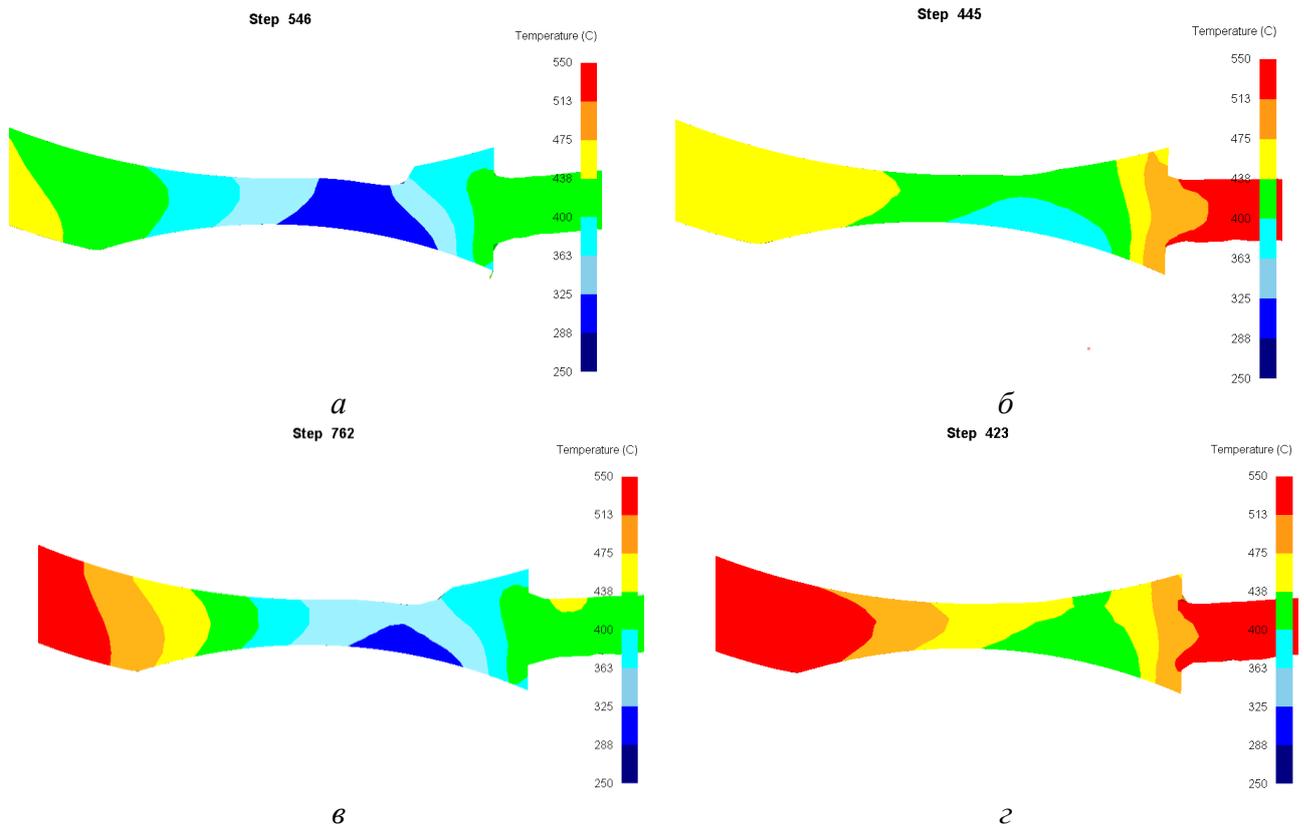


Рисунок 6.6 – Изменение температуры в очаге деформации для исследуемого сплава при вытяжке $\mu = 3,7$: *а, б* – $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; *в, г* – $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$; *а, в* – $\xi_1 = 0,78 \text{ c}^{-1}$; *б, г* – $\xi_2 = 1,57 \text{ c}^{-1}$

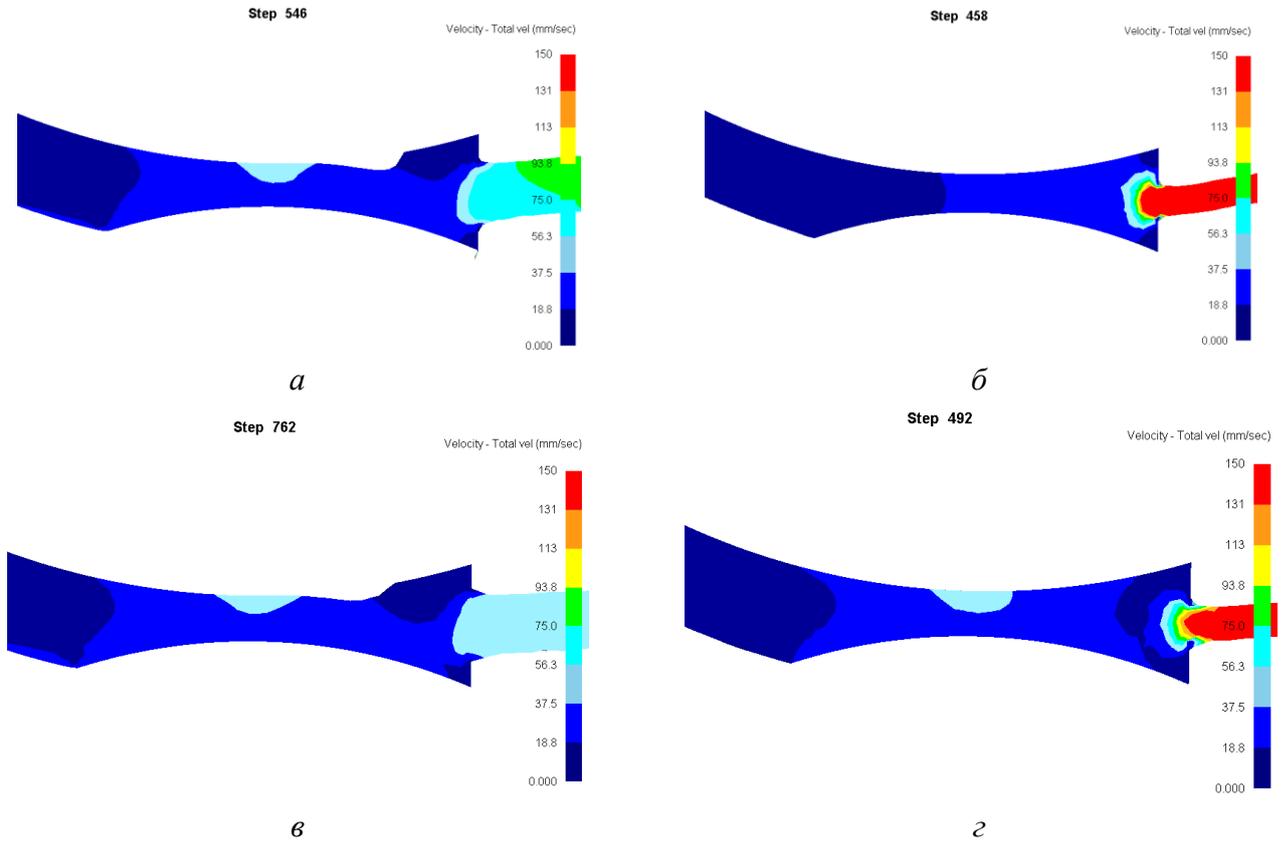


Рисунок 6.7 – Распределение скорости деформации по сечению заготовки для исследуемого сплава: *a, б* – $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в, г* – $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$; *a, в* – $\mu = 3,7$; *б, г* – $\mu = 11,8$

После полного заполнения калибра, до входа в матрицу, начинается выдавливание металла, результатом чего является получение прессованного изделия, чьи форма и размеры строго соответствуют калибрующему отверстию матрицы [247].

Данная последовательность совмещенной обработки находит подтверждение в результатах моделирования (рис. 6.6, 6.7). Характерная черта формоизменения исследованного сплава заключается в следующем: во время вытяжки, где $\mu = 3,7$, и при скорости деформации $\xi_1 = 0,78\text{ c}^{-1}$, процесс установившегося прессования происходит в условиях без полного заполнения области деформации со стороны вала с выступом (рисунок 6.6 а, в).

Вследствие этого, охлаждение материала в бесконтактной зоне отсутствует, что влечет за собой повышение температуры обрабатываемого полуфабриката со стороны вала, снабженного выступом, относительно температуры со стороны вала с канавкой (см. [247]).

Увеличение степени вытяжки (рисунок 6.7), равно как и скорости деформации, вызывает уменьшение (вплоть до полного исчезновения) бесконтактной зоны. Это характерно для сплавов, демонстрирующих высокое сопротивление деформации (см. [247]).

Остывание заготовки протекает неравномерно, с усиленным отводом тепла в нижней части, контактирующей с валком, имеющим канавку. По всей длине зоны деформации внутренняя часть заготовки характеризуется более высокой температурой [246].

Увеличение степени обжатия обуславливает более плотное облегание и взаимодействие металла с валком, что в свою очередь ведёт к существенно заметному перераспределению проявления температуры и ее поля применительно к поверхности обрабатываемого материала. Отмечается небольшое снижение температуры в зонах застоя металла перед матрицей (см. рис. 6.6, в, г), в то время как выходной пруток из калибра матрицы приобретает однородный температурный режим [247].

Анализ результатов эксперимента подтвердил, что увеличение скорости деформации влечет за собой повышение температуры полуфабриката при выходе из матрицы [247]. Увеличение коэффициента вытяжки с 3,7 до 11,8 приводит к повышению скорости деформации в зоне прессования (см. рис. 6.7). Указанные закономерности изменения параметров совмещенной обработки подтверждаются данными экспериментальных исследований [1].

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования процесса совмещенной обработки для исследуемого сплава с известными реологическими свойствами получены новые данные по температурно-скоростным и деформационным параметрам, которые необходимы при планировании и проведении экспериментальных исследований, а также установлены закономерности распределения температуры металла и скорости деформации по сечению заготовки при получении прутков круглого сечения диаметром 5-9 мм.

6.4. Результаты экспериментальных исследований

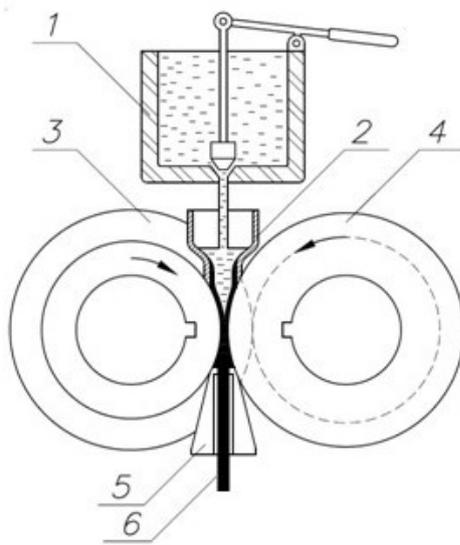
Проведенные исследования [248] охватывали создание режимов деформации, анализ структуры и характеристик деформированных, подвергнутых отжигу и сваренных полуфабрикатов, произведенных по предложенной методике изготовления сварочной проволоки.

Для и горячепрессованных прутков использовали технологию совмещенного литья и прокатки-прессования (рис. 6.8, а), реализованную на установках совмещенной обработки СПП-200 и СЛиПП-2,5 (см. рис.6.4, а). Ее основными параметрами являлись следующие [18, 20]:

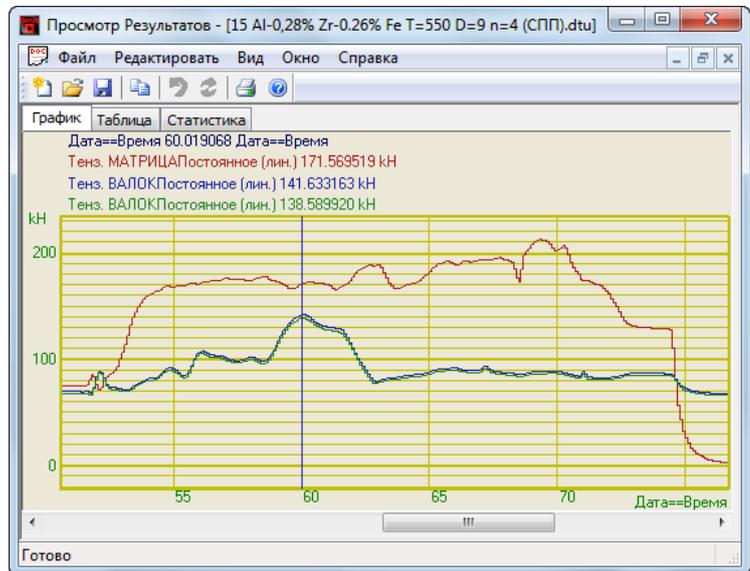
- температура расплава 780-790 °С ;
- частота вращения валков 4-8 об/мин;
- степень обжатия при прокатке не менее 50%;

– вытяжка при выдавливании прутка 8-9.

Результаты измерения силовых параметров (рис. 6.8, б) процесса БПП (суммарной силы, действующей на валки $P_{\text{в}}$, и силы, действующей на матрицу $P_{\text{м}}$) показали, что для сплава 01570 эти параметры равнялись $P_{\text{в}} = 280$ кН, $P_{\text{м}} = 172$ кН, а для сплава 1580 - $P_{\text{в}} = 257$ кН, $P_{\text{м}} = 165$ кН.



а



б

Рисунок 6.8 – Схема исследуемого процесса БПП (а) и протокол измерения силовых характеристик процесса БПП (б): 1 – печь-миксер; 2 – воронка; 3 – валок с канавкой; 4 – валок с выступом; 5 – матрица; 6 – пруток

Для последующего волочения проволоки полученные прутки диаметром 9 мм прокатывали в восьмиугольных калибрах сортового двухклетьевого прокатного стана модели AF 200+180 R (см. рис. 6.4, б).

Режим холодной прокатки сортовых изделий для изучаемых сплавов был рассчитан в программном обеспечении "PROVOL" [195]. На рис. 6.9 представлена иллюстрация окна подсистемы программы "PROVOL", демонстрирующая результаты расчетов.

В блоке графического представления отображаются графические изображения, отражающие зависимость рассчитанных величин от номера прохода. Все полученные сведения предоставляется возможность экспортировать в MS Excel для дальнейшего вывода чертежей [115, 238-243].

В таблице 6.4 отображены расчетные деформационные характеристики (единичный коэффициент вытяжки $\lambda_{\text{ед}}$, суммарный коэффициент вытяжки λ_{Σ} , обжатие ε_{Σ}) и энергетические характеристики (усилие $P_{\text{п}}$ и момент прокатки $M_{\text{п}}$) для маршрута сортовой прокатки полос из сплавов 01570 и 1580 [115, 238-243].

Рисунок 6.9 – Экран "PROVOL" для вычисления параметров

Таблица 6.4 – Вычисленный маршрут и полученные в ходе работы программы характеристики сортовой прокатки

№ калибра	Сторона калибра, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}	$\epsilon_{\Sigma}, \%$	Сопротивление деформации σ_s , МПа	R_p , кН	M_p , кНм
1	7,43	53,51	1,18	1,19	13,1	405	51	59
2	6,90	45,5	1,17	1,38	25,0	429	49	68
3	6,29	39,15	1,16	1,60	37,5	436	43	65
4	5,95	33,82	1,15	1,84	44,2	432	39	57
5	5,47	29,6	1,14	2,10	52,7	420	34	51
6	5,22	26,04	1,13	2,37	57,0	410	31	48
7	5,00	24,49	1,06	2,52	60,6	401	29	45

На рисунке 6.10 представлены графики, демонстрирующие динамику расчётных величин единичного и суммарного коэффициентов вытяжки. Полученные данные о силе и моменте прокатки для различных сплавов не выходят за границы допустимых пределов [115, 238-243]. Учитывая быстрое упрочнение сплавов после осуществления 2, 4 и 6 проходов, необходимо проведение термической обработки полуфабрикатов. Она осуществляется при температуре 400 °С с выдержкой в течение 3 часов, что направлено на повышение пластических характеристик

проката. Анализ динамики единичного коэффициента вытяжки и степени деформации при данном режиме выявляет однородное распределение деформаций на каждом переходе. Это, в свою очередь, гарантирует устойчивость всего процесса, исключая вероятность обрывов и появления брака из-за образования трещин [115, 238-243].

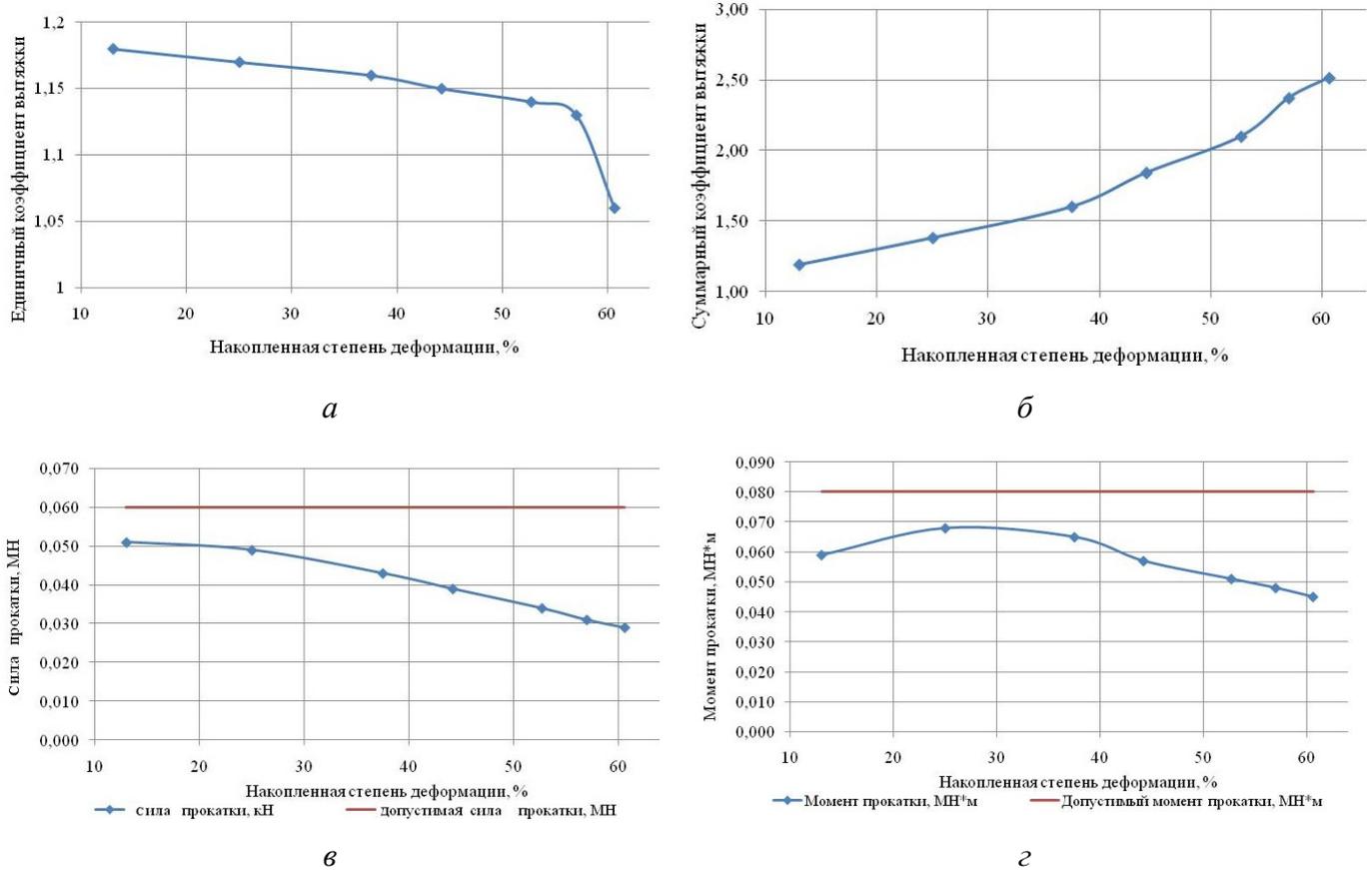


Рисунок 6.10 – Изменение единичного (а) и суммарного (б) коэффициентов вытяжки, силы (в) и момента (г) холодной сортовой прокатки от степени деформации

Применяя тензометрическое оборудование и методы измерения, определяли экспериментальное значение силы сортовой прокатки и формировали графики, отображающие ее зависимость от суммарной деформации (см. рис. 6.11).

В ходе исследования было выявлено, что сила сортовой прокатки увеличивается практически на протяжении всего процесса, демонстрируя снижение только на завершающих этапах [115, 238-243].

Далее полученный пруток, имевший квадратное сечение со стороной в 5 мм, подвергся отжигу, строго соответствующему ранее описанному режиму. Затем следовало однократное волочение на специализированном цепном волочильном стане. В результате этих операций получали проволоку с диаметром 3 мм [115, 238-243].

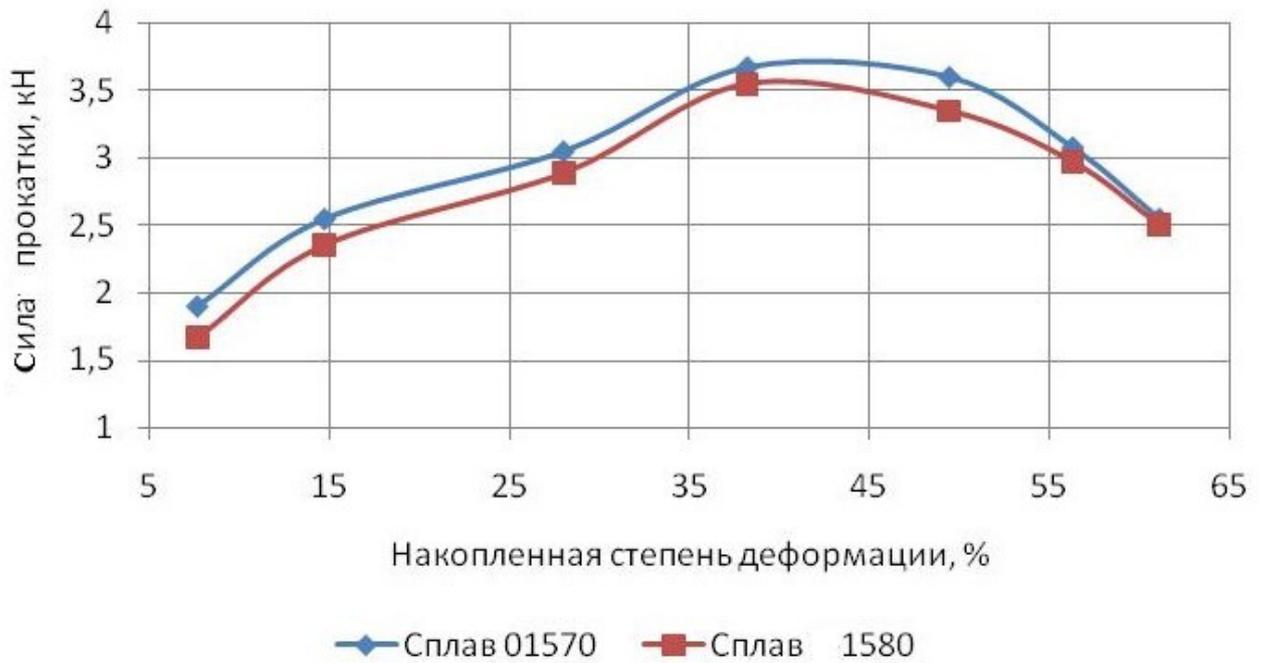


Рисунок 6.11 – Графики зависимости силы прокатки от степени деформации

Для вычисления параметров процесса волочения, обеспечивающего изготовление сварочной проволоки из сплавов 01570 и 1580, были задействованы исходные данные:

- Изначальное поперечное сечение заготовки — квадрат с фасками по углам, со стороной 5 мм;
- Необходимый конечный размер проволоки — 3 мм;
- Общий коэффициент вытяжки за все этапы волочения — 4,2;
- Средний единичный коэффициент вытяжки на один проход — 1,29;
- Общая степень деформации — 76 %;
- Средняя степень деформации за один проход — 22,5%;
- Фактический угол волокна — 8°.

В таблице 6.5 изложены вычисленные параметры процесса волочения проволоки из с учётом заданных значений и управляющих параметров [115, 238-243].

Пиковое значение силы волочения наблюдается в первом проходе. Это объясняется максимальной деформацией, подтверждаемой наибольшим коэффициентом вытяжки. В то же время, прилагаемая сила остается в пределах установленного технической документацией стана лимита в 50 кН.

Таблица 6.5 – Расчетные параметры волочения проволоки из сплавов 01570 и сплава 1580 [115, 238-243]

Параметры	Значения параметров по переходам волочения					
	1	2*	3	4*	5	6*
Единичная вытяжка по переходам	1,305	1,292	1,303	1,290	1,302	1,135
Интегральные деформации	0,266	0,256	0,265	0,255	0,264	0,127
Общая вытяжка между отжигами	1,305	2,596	1,303	2,594	1,302	2,438
Суммарная вытяжка за процесс	1,305	1,685	2,197	2,835	3,691	4,191
Диаметр проволоки по переходам, мм	5,17	4,54	3,98	3,50	3,07	2,88
Площадь поперечного сечения, мм ²	21,6	16,79	12,94	10,08	7,79	6,89
Степень деформации единичная, %	23,4	22,6	23,3	22,5	23,2	11,9
Степень деформации суммарная, %	23,1	40,2	53,9	64,1	72,2	75,5
Напряжение волочения начальное, МПа	380	420	360	380	375	390
Напряжение волочения конечное, МПа	420	440	380	410	390	420
Напряжение волочения среднее, МПа	400	430	370	395	382,5	405
Сила волочения, кН	4,25	3,40	2,44	1,85	1,50	0,60
Напряжение волочения, МПа	196,7	202,0	188,1	183,7	192,4	87,5
Коэффициент запаса	2,14	2,18	2,02	2,23	2,03	4,80

* – отжиг при температуре 400 °С и времени выдержки 3 часа

Расчеты режимов волочения и силовых характеристик стали основой для разработки и проведения практических испытаний [115, 243].

6.5. Исследование структуры и свойств деформированных, отожженных и сварных полуфабрикатов

Исследование структуры девятимиллиметровых прутков, полученных в результате обработки методом БПП из сплавов 01570 и 1580, показало, что она состоит из α -твердого раствора и включений интерметаллидных фаз. Преимущественно, эти фазы располагаются вдоль границ зерен (см. рис. 6.12, а). Интерметаллиды, наблюдаемые на границах зерен прутка, изготовленного из сплава 1580, характеризуются более высокой степенью дисперсности (рис. 6.12, б) [115, 243].

Микрорентгеноспектральный анализ микроструктуры прутка выявил частицы $Al_3(Sc, Zr)$, имеющие округлую форму (см. иллюстрацию 6.13, спектральные данные под номерами 1 и

2). При исследовании полуфабрикатов были зафиксированы кристаллы, сочетающие как пластинчатую, так и полиэдрическую морфологию. В составе данных кристаллов зарегистрированы элементы: Al, Mg, Mn, Cr, Fe (иллюстрация 6.13, спектр 5) [115, 243].

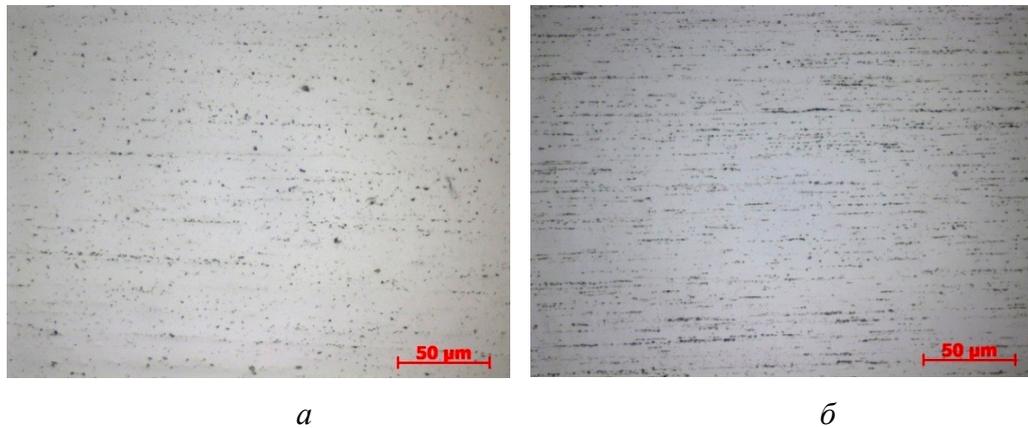
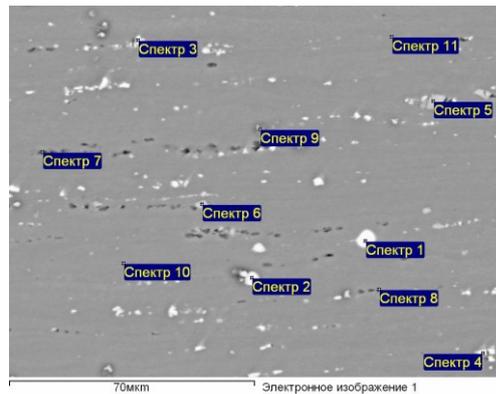


Рисунок 6.12 – Микроструктура прутков диаметром 9 мм, полученных методом БПП, $\times 500$: *a* – сплав 01570; *б* – сплав 1580



Все результаты в весовых %

Спектр	O	Mg	Al	Si	Sc	Ti	Cr	Mn	Fe	Zr
Спектр 1		0.93	59.49		7.60	0.69				31.30
Спектр 2		2.60	66.89	0.29	5.4	0.61				24.14
Спектр 3		3.58	82.17	1.15			0.41	3.86	8.83	
Спектр 4		2.94	77.42	1.77			0.69	6.0	11.12	
Спектр 5		9.96	76.31	0.35	0.21		2.97	9.37	0.84	
Спектр 6		9.74	77.18	0.60	0.25		2.71	9.15	0.37	
Спектр 7	9.71	14.28	63.31	12.26				0.44		
Спектр 8	6.06	13.69	69.93	10.32						
Спектр 9	12.27	4.99	77.73	4.72			0.29			
Спектр 10		5.32	93.60	0.32			0.28	0.48		
Спектр 11		5.29	93.49	0.27	0.24		0.31	0.41		

Рисунок 6.13 – Электронное изображение и результаты МРСА прутка диаметром 9 мм из сплава 1580

Для изучения микроскопической структуры прутков и проволоки в процессе сортовой прокатки производился отбор проб материала после последнего калибра, где высота граней составляла 5,0 мм. После процесса волочения отбор образцов производился из проволоки, имеющей диаметр 3,0 мм. Микроструктурный анализ был выполнен как в деформированном состоянии, так и после отжига, что отражено в работах [115, 243].

Выявлена полная идентичность в особенностях распределения и морфологии фаз структуры исследуемых сплавов после прокатки (см. рис. 6.14, 6.15). Холодная деформация влечёт за собой волокнистость.

Рост степени деформации приводит к наклепу и в последствии требуется отжиг. Преобладающее большинство легирующих элементов, в особенности переходные металлы, стимулируют повышение температуры начала рекристаллизации сплава и замедляют течение рекристаллизационных процессов в сплаве [115, 243].

Большинство легирующих компонентов, замедляют ход рекристаллизационных процессов в сплаве.

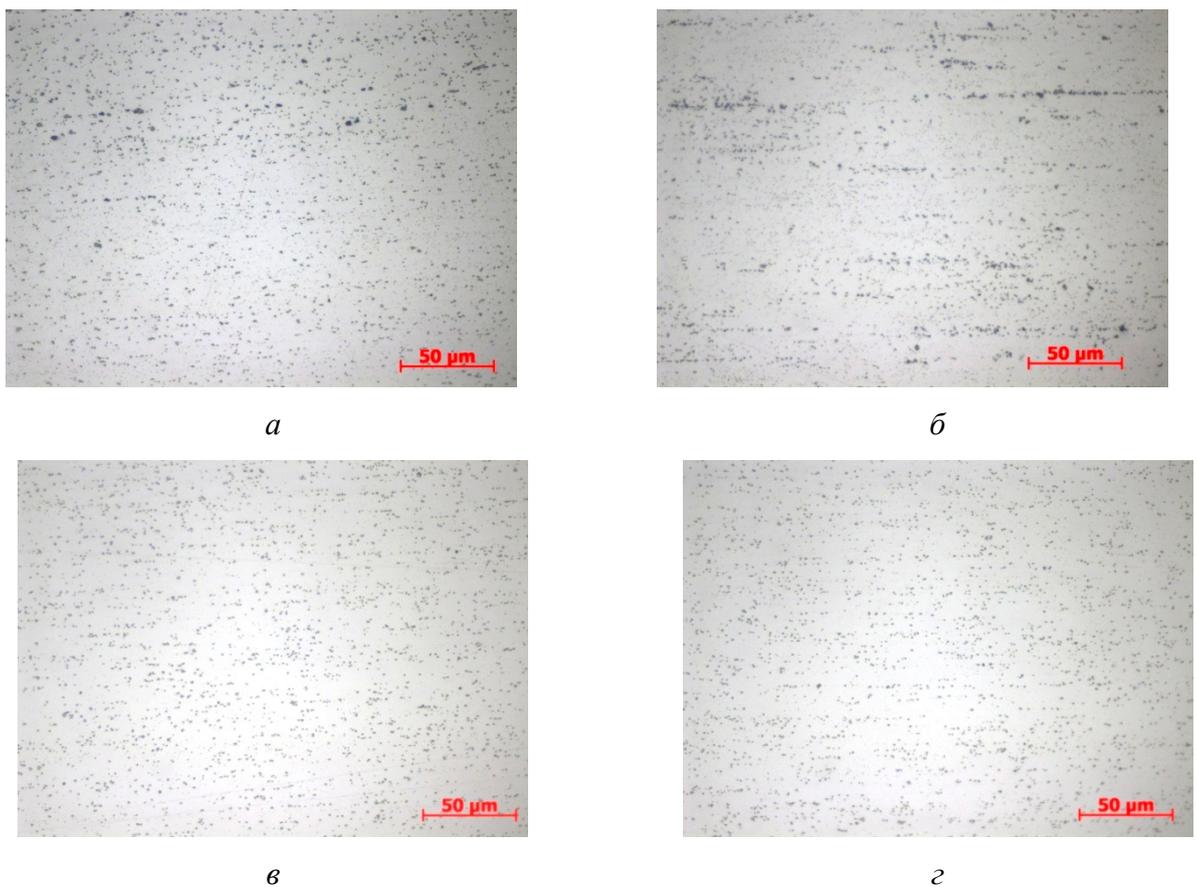


Рисунок 6.14 – Микроструктура прутка размерами 5×5 мм (*a*, *б*) и проволоки диаметром 3 мм (*в*, *г*) из сплава 01570, полученных с применением метода БПП, ×500:
a, *в* – деформированное состояние; *б*, *г* – отожженное состояние

Наибольшие значения прочности достигаются при температурах от 300 до 400 °С, в то время как при дальнейшем повышении температуры происходит коагуляция частиц Al_3Sc , что, в свою очередь, приводит к снижению прочности сплава. Введение скандия, в сочетании с цирконием, способствует сохранению деформационной структуры полуфабрикатов после проведения термообработки, обеспечивая значительный эффект структурного упрочнения [115, 243].

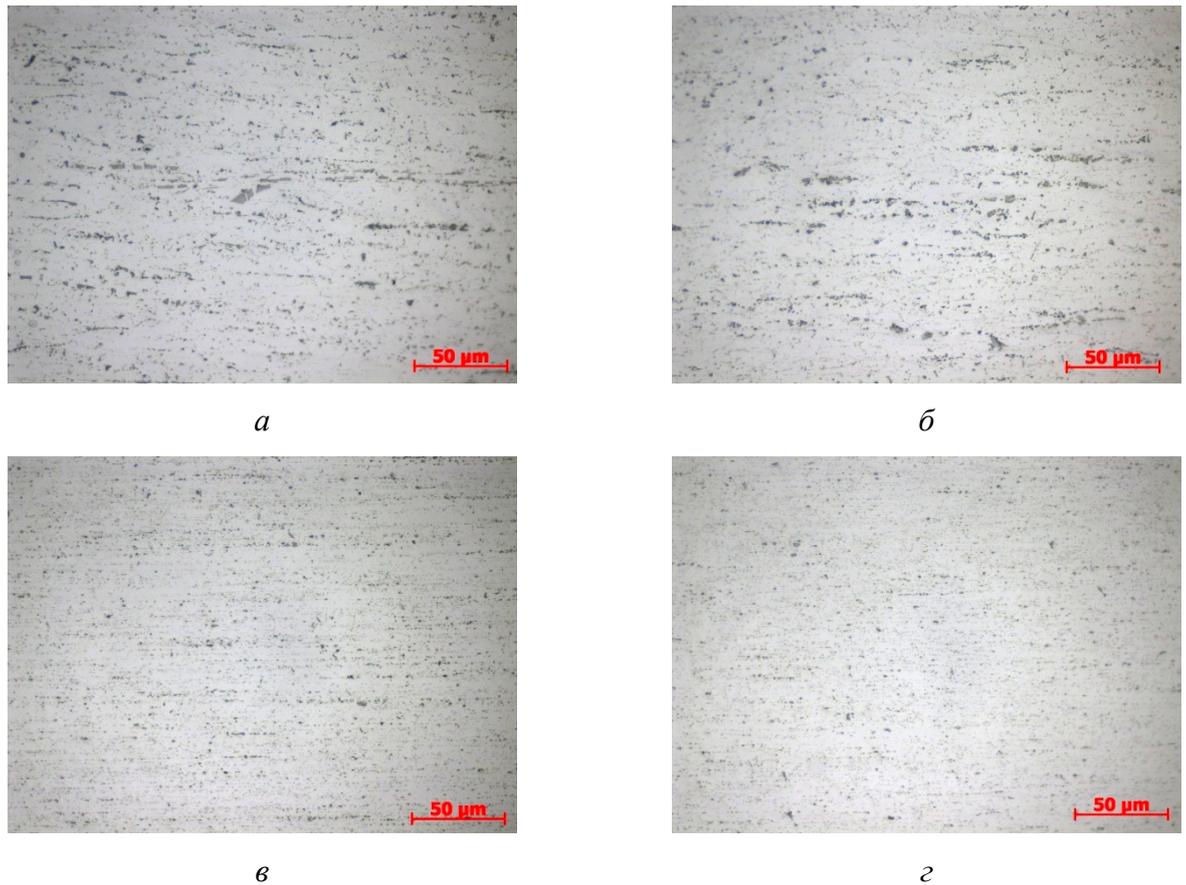


Рисунок 6.15 – Микроструктура прутка размерами 5×5 мм (*а, б*) и проволоки диаметром 3 мм (*в, г*) из сплава 1580, полученных с применением метода БПП, ×500:

а, в – деформированное состояние; *б, г* – отожженное состояние

Изучение микроструктуры образцов, подвергнутых отжигу, продемонстрировало сходство фазового состава и распределения выделений с структурой деформированных полуфабрикатов, что согласуется с данными работ [115, 243].

В таблице 6.6 представлены данные о механических характеристиках полуфабрикатов, изготовленных из сплавов 01570 и 1580, в различных состояниях обработки. Проведя анализ этих сведений, можно заключить, что длинномерные полуфабрикаты, произведенные с использованием новой технологии комбинированной обработки, демонстрируют высокие

показатели механических свойств. Важно отметить, что полуфабрикаты из сплава 1580 демонстрируют характеристики пластичности и прочности, сопоставимые с показателями полуфабрикатов из сплава 01570 [115, 243].

Таблица 6.6 – Механические свойства полуфабрикатов из сплавов 01570 и 1580

Операция	Размеры, мм и состояние	Сплав 01570			Сплав 1580		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
БПП	пруток диаметр 9,0 горячедеформированное	306	217	13	291	210	18
Сортовая прокатка	квадрат 7,43×7,43 отожженное	360	288	19	348	222	19
	квадрат 6,90×6,90 отожженное	380	295	15	360	255	14
	квадрат 5,47×5,47 отожженное	370	275	15	390	285	16
	квадрат 5,0×5,0 отожженное	390	300	11	410	285	14
Волочение	диаметр 4,0 отожженное	370	125	12	395	180	14
	диаметр 3,0 холоднодеформированное	410	280	2	410	190	2
	диаметр 3,0 отожженное	335	240	17	370	260	18

В рамках эксперимента были определены следующие температурные режимы отжига: 350, 450 и 500 °С, а также выдержки продолжительностью 3 и 6 часов [115, 243].

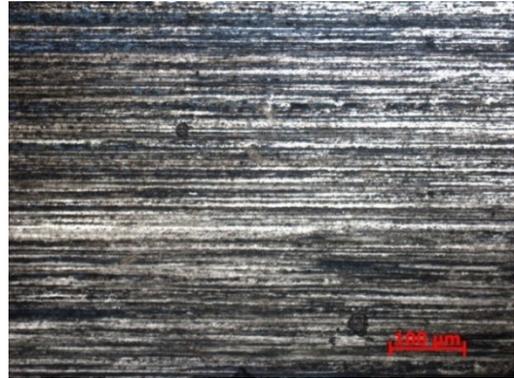
Микроструктура деформированных, а затем подвергнутых отжигу, покрытых оксидной пленкой образцов, визуализирована на рисунках 6.16–6.19, наблюдаемых в поляризованном свете. Изображения были получены при увеличениях в 50 и 200 раз.

Центральные области проволоки, сохраняя деформированное состояние, содержат зерна (волокна), ориентация которых соответствует направлению деформации (см. рис. 6.16). Отжиги образовали новые центры рекристаллизации в областях с максимальной деформации.

Периферийные области проволоки характеризуются рекристаллизованной структурой [115, 242].



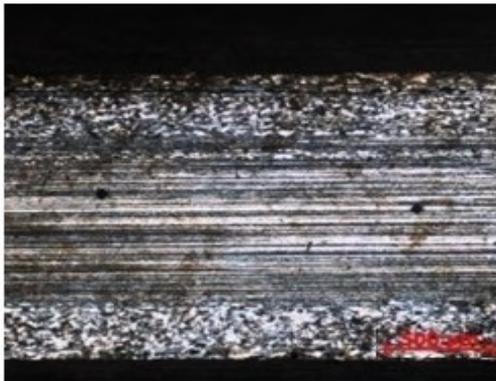
a, ×50



б, ×200

Рисунок 6.16 – Микроструктурные изображения проволоки при деформирующем воздействии

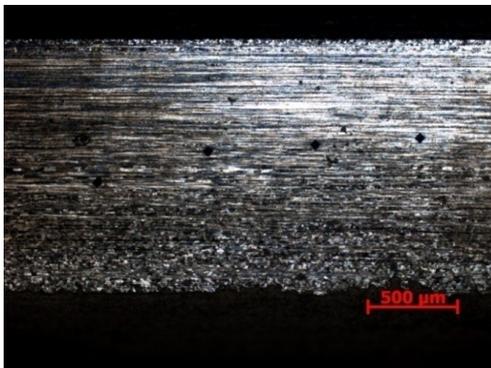
Структура проволоки, подвергнутой отжигу при 350°C с продолжительностью выдержки в 3 и 6 часов, демонстрирует признаки неполной рекристаллизации (смотрите рисунок 6.17). Зерна, которые прошли рекристаллизацию в ходе отжига, отличаются большим размером, по сравнению с исходным деформированным материалом.



a, ×50



б, ×200



в, ×50

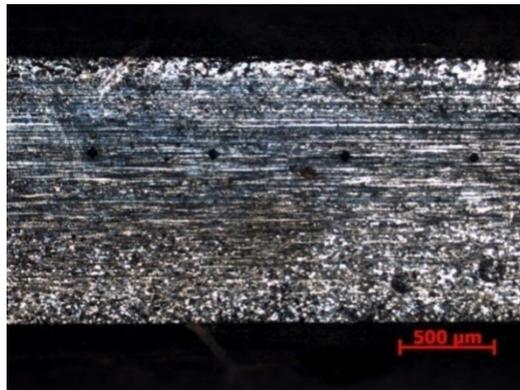


г, ×200

Рисунок 6.17 – Микроструктура проволоки после отжига при температуре 350 °С, выдержке: *a*, *б* – 3 часа; *в*, *г* – 6 часов

При отжиге проволоки при 450 °С с выдержкой 3 часа наблюдается частичная рекристаллизация (см. рис. 6.18 а, б). Увеличение времени выдержки до 6 часов при той же температуре приводит к более интенсивной рекристаллизации (рис. 6.18 в, г), что сопровождается заметным уменьшением прочности полуфабриката [115, 243]. Повышение температуры отжига выступает катализатором для запуска процессов рекристаллизации. Полное воссоздание кристаллической структуры проволоки, затронувшее всю плоскость сечения, было зафиксировано после обработки при 500 °С с продолжительностью 6 часов (рис. 6.18 в, г) [115, 243].

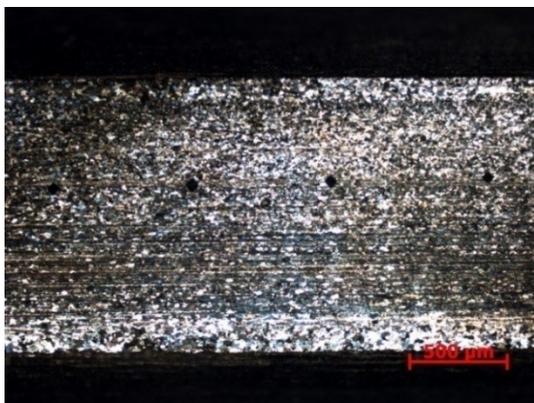
Исследовалось влияние обработки на механические характеристики проволоки, определяемые в деформированном и отожженном состояниях (см. таблицу 6.7). В деформированном состоянии проволока демонстрирует максимальную прочность, вплоть до 414 МПа, и даже более, а пластичность была минимальная из-за значительной деформации. Во время отжига происходит одновременное протекание двух взаимосвязанных процессов: разупрочнение, инициируемое рекристаллизацией, и упрочнение, вызванное распадом пересыщенных твердых растворов [115, 243].



а, ×50



б, ×200



в, ×50



г, ×200

Рисунок 6.18 – Микроструктура проволоки после отжига при температуре 450 °С, при выдержке: а, б – 3 часа; в, г – 6 часов

Отжиг при 350°C (смотри рисунок 6.19) приводит к уменьшению прочности проволоки. Это обусловлено протеканием обратимых процессов в структуре, однако показатели прочности остаются на приемлемом уровне. Повышение температуры отжига до 450°C вызывает заметное ослабление прочности, в то время как пластичность материала ощутимо возрастает. Данная перемена физических свойств материала обусловлена процессами возврата и рекристаллизации, которые происходят внутри проволоки [115, 243]. Отжиг при 500°C на протяжении 6 часов тоже способствует повышению пластичности, подтверждением чему служит относительное удлинение, которое достигает 13%. Однако для достижения наилучшего баланса между прочностью и пластичностью рекомендуется отжиг при 350°C с продолжительностью 6 часов [115, 243].

Итак, после термической обработки проволока из сплава 1580 демонстрирует выдающиеся параметры прочности, сочетающиеся с удовлетворительным уровнем пластичности.



a, ×50



b, ×200



v, ×50



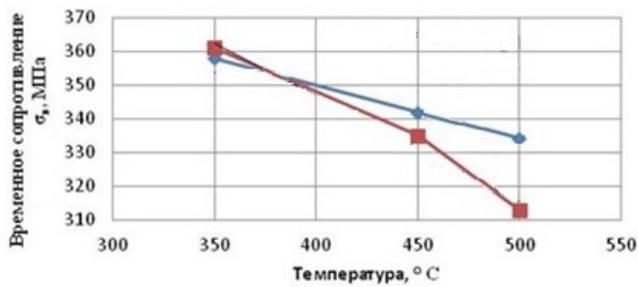
z, ×200

Рисунок 6.19 – Микроструктура проволоки после отжига при температуре 500 °С, при выдержке: *a*, *b* – 3 часа; *v*, *z* – 6 часов

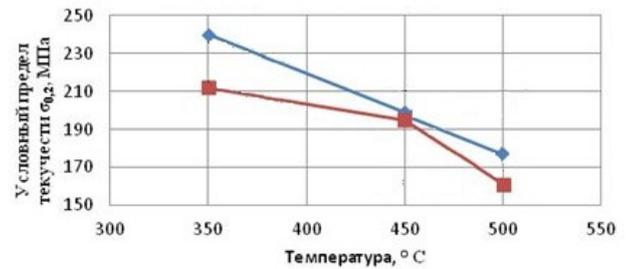
Таблица 6.7 – Механические свойства проволоки диаметром 3 мм из сплава 1580

Температура отжига, °С	Время выдержки, ч	Механические свойства		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
350	3	360	239	9
	6	358	209	12
450	3	339	201	11
	6	329	197	13
500	3	337	180	12
	6	309	159	13

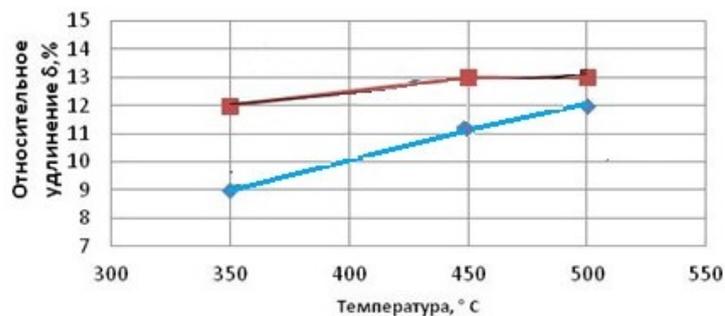
Влияние температуры и продолжительности выдержки при отжиге проволоки на механические характеристики демонстрируется на рис. 6.17 [115, 243].



а



б



в

Рисунок 6.20 – Зависимости механических свойств от температуры и времени выдержки при отжиге проволоки из сплава 1580: а – временное сопротивление; б – условный предел текучести; в – относительное удлинение; —♦— Выдержка 3 ч. —■— Выдержка 6 ч.

Испытания на свариваемость и устойчивость к коррозии были основным показателем рабочих характеристик проволоки.

Изучение структуры сварных соединений листовых материалов выполнялось на образцах, прошедших обработку анизотропной оксидной пленкой, с применением поляризованного освещения (см. рис. 6.21). Центральная зона столбчатых кристаллов не была зафиксирована [115, 244].



Рисунок 6.21 – Характерные зоны сварных соединений на микроструктуре образцов, $\times 50$

Центральная область шва отличается мелкозернистой структурой. В этой зоне термического влияния (ЗТВ) протекали процессы рекристаллизации, при этом ширина зоны составляла около 1-2 микрон [115, 244].

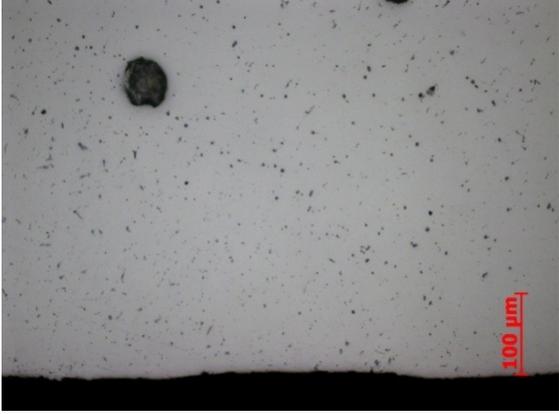
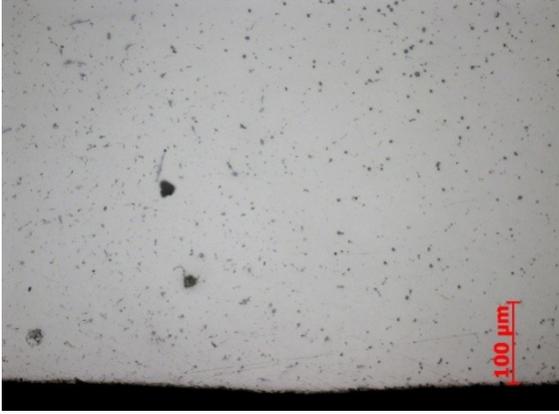
Определение размера зерен на окисленных цифровых изображениях образцов производилось с использованием метода случайных секущих, применяя увеличение в 20 раз. Установлено, что зернистость в областях термического воздействия анализируемых сплавов примерно одинакова, колеблясь в пределах от 13 до 15 мкм.

Для определения механических свойств сварных деталей были организованы испытания на растяжение. После завершения сварочных работ, образцы вырезались с учетом направления шва: по направлению прокатки и перпендикулярно ему. Далее, образцы проходили механическую обработку на фрезерном станке [115, 244].

Исследования прочности сварного шва после отжига (временное сопротивление) продемонстрировали показатель в диапазоне 260-380 МПа, что соответствует 0,75-0,85 от прочности базового металла.

С целью определения природы и степени коррозионных поражений исследуемых сплавов были проведены ускоренные испытания на межкристаллитную коррозию, базируясь на ГОСТ 9.021-74 (раствор №1) [249] и ASTM G 67 [250]. Данные о микроструктуре образцов из сплава 1580 после проведения испытаний на МКК отражены в таблице 6.8 [115, 243].

Таблица 6.8 – Микроструктура сварных образцов из сплава 1580 после МКК, $\times 200$

Зона	Ориентация образцов к направлению деформации	
	Вдоль	Поперек
Основной металл		
Зона термического влияния		
Сварной шов		

Анализ данных сравнительных испытаний эксплуатационных характеристик выявил: сплав 1580 с содержанием скандия до 0,12 масс. % демонстрирует равнозначные показатели коррозионной стойкости и качества сварного шва [115, 243] по сравнению с промышленно распространенным сплавом 01570, содержащим до 0,25 масс. % скандия.

Макроструктура изломов образцов, подвергнутых исследованию, характеризовалась матовым оттенком, волокнистым строением и неровностями краев разделения. Установлено, что значение прочности сварного шва отожженных образцов практически не претерпевает

изменений после МКК, сохраняясь в пределах от 0,75 до 0,85 от показателя прочности основного металла (смотри таблицу 6.10) [115, 243].

Таблица 6.9 – Результаты коррозионных испытаний образцов

Сплав	Состояние, режим ТО	Время испытания, час	Деформированные образцы		Сварные образцы
			ГОСТ 9.021-74, раствор №1 (глубина, мкм)	ASTM G67, мг/см ²	ГОСТ 9.021-74, раствор №1 (глубина, мкм)
1580	холоднокатаное	24	0,0	2,75	0,0
	300 °С, 1 ч		0,0	1,90	0,0
	300 °С, 3 ч		0,0	1,82	0,0
	350 °С, 1 ч		0,0	1,92	0,0
	350 °С, 3 ч		0,2	1,95	0,1
	380 °С, 1 ч		0,0	1,97	0,0
01570	холоднокатаное	24	0,0	3,51	0,0
	300 °С, 1 ч		0,0	2,26	0,1
	300 °С, 3 ч		0,3	2,07	0,0
	350 °С, 1 ч		0,0	2,15	0,0
	350 °С, 3 ч		0,0	1,90	0,0
	380 °С, 1 ч		0,0	1,64	0,0

С использованием инновационной технологии изготовлены опытные партии сварочной проволоки диаметром 3 мм, из сплавов 01570 и 1580. Данная проволока прошла необходимые испытания, продемонстрировав следующие результаты: падение прочности сварного шва не превышает 10% от нормативного показателя для алюминиевых сплавов в состоянии отжига, установленного ОСТ 92-1114-80 для сварных швов первой категории (результаты апробации на предприятии представлены в Приложении Д).

С применением новой технологии произведены экспериментальные партии сварочной проволоки, имеющей диаметр 3 мм. В качестве материала были взяты сплавы 01570 и 1580, исходной заготовкой служили прутки, диаметр которых составлял 9 мм. Получение прутков осуществлялось методом непрерывного литья и последующей деформации прессованием и прокаткой на оборудовании СПП-400. Производство опытных образцов было организовано в условиях ООО «Завод современных материалов» (см. Приложение Е).

Таблица 6.10 – Данные испытаний образцов, выполненные после их сварки и отжига

Сплав	Направление	Механические свойства		
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
01570	продольное	380	252	6
	поперечное	357	254	5
	под 45°	-	-	-
1580	продольное	381	255	6
	поперечное	359	293	6
	под 45°	-	-	-

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать применение сварочной проволоки из сплава 1580, изготовленной с применением новой технологии с использованием метода БПП, а также режимы термомеханической обработки при получении деформированных и сварных полуфабрикатов при суммарной степени холодной деформации до 80 %, температуре 350 °С и времени выдержки 1-3 часа при отжиге. Данные режимы обеспечивают оптимальное сочетание механических и эксплуатационных свойств, а также необходимую структуру металла в отожженном состоянии.

6.6. Выводы по главе

1. Проведены экспериментальные исследования и моделирование процесса совмещенной обработки прутков из сплавов 01570 и 1580, которые позволили определить параметры и реализовать технологию получения сварочной проволоки диаметром 3 мм из этих сплавов, уровень свойств которой удовлетворяет эксплуатационным требованиям, предъявляемыми действующими стандартами.

2. С применением современного комплекса Gleeble 3800 определены реологические свойства для нового сплава 1580 в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров.

3. Деформированные полуфабрикаты, произведенные из сплавов системы Al-Mg, в состав которых введен скандий, предназначенные для изготовления сварочной проволоки в форме прутков круглого сечения, оптимально получать путем совмещения литья и процесса прокатки-прессования. Это обосновано тем, что они обладают необходимыми характеристиками пластичности и прочности. При этом наблюдается сокращение энергозатрат

и снижение трудоемкости производства в сравнении с привычными технологическими подходами.

4. Изучение структуры и характеристик, сформированных из сплавов 01570 и 1580 полуфабрикатов, даёт возможность использования значительных степеней деформации металла в процессах как горячей, так и холодной обработки, исключая появление дефектов. Применение же разработанных режимов отжига способствует получению сварочной проволоки, обладающей требуемыми эксплуатационными и механическими свойствами.

5. Предлагаемая технологическая схема, обеспечивающая производство сварочной проволоки, включает в себя три основных этапа: подготовку прутка (БПП), сортовую прокатку и волочение, а также процессы термообработки, в частности, отжига. Такой подход позволяет изготавливать длинномерные деформированные полуфабрикаты высокого качества, соответствующие установленным стандартам, таким как ГОСТ 7871-2019.

6. Образцы, подвергнутые деформации и сварке методом аргонодуговой сварки, продемонстрировали положительные результаты при проверке на межкристаллитную коррозию. В ходе испытаний было выяснено, что применение сварочной проволоки из сплава 1580 обеспечивает формирование качественного сварного шва. Прочность этого шва, определяемая временным сопротивлением, варьируется в пределах 75-85% от прочности материала основы.

7. Установлено, что снижение прочности сварного шва на образцах, сваренных с использованием разработанной сварочной проволоки, не превышает 10% от значения, регламентированного стандартом для алюминиевого сплава в мягком состоянии, согласно актуальным отраслевым нормам к сварным соединениям первой категории.

7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей главе излагаются новые технические решения, относящиеся к составу нового сплава и конструкции устройств, предназначенных для комбинированной обработки алюминиевых сплавов, а также результаты практической апробации разработанных технологий получения проволоки из исследуемых сплавов. Для экспериментов применялось промышленное оборудование. В состав оборудования входила установка непрерывного прессования СПП-400 (иллюстрация на рис. 6.9). Данная установка базировалась на территории ООО «Завод современных материалов», что в г. Красноярске. Также использовался волочильный агрегат, дислоцировавшийся на предприятии ООО «Альянс 2008» (Красноярск) [215].

Материалы главы опубликованы в работах [231, 251-259].

7.1. Новые технические решения для совмещенной обработки алюминиевых сплавов

Для решения ряда поставленных задач, возникающих при обработке сплавов системы Al-PЗМ, требуется учесть факторы, связанные с созданием новых сплавов, автоматизацией, улучшением качества пресс-изделий и охлаждением рабочего инструмента процессов совмещенной обработки. Для успешного внедрения указанных методов потребовалось создать новые технологические подходы к комбинированной обработке сплавов, относящихся к системе Al-PЗМ. Ниже представлен подробный обзор этих решений.

Новые технические решения можно разделить на три группы:

- химический состав нового алюминиевого сплава системы Al-PЗМ (патент РФ №2570684);
- устройства для непрерывной прокатки и прессования (патенты РФ №101390, №102313, №102542);
- устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования (патенты РФ №2457914, №2689460, №2792327, №2724758, №2847204).

Алюминиевый сплав, защищенный патентом РФ под номером 2570684 [251], причисляется к первой группе и находит применение в металлургической отрасли, производящей алюминиевые сплавы. Данные сплавы ориентированы на изготовление электропроводников, функционирующих при высоких температурах. Кроме того, они применимы в качестве заготовок для различных изделий, используемых в машиностроении,

авиастроении, ракетостроении, судостроении, автомобилестроении, медицинской технике, строительстве, а также в бытовом оборудовании [251].

Известен сплав на базе алюминия [260], компоненты которого, в мас. %: гафний, рутений, сурьма, бериллий, стронций, углерод - суммарно 0,001-0,4; никель и железо - суммарно 0,2-0,7, с коэффициентом никеля к железу в рамках 1,0-4,0; кремний, бор, титан, цинк, марганец, медь - суммарно 0,001-0,4 при условии соотношения бора к титану 0,01-3,0; не менее одного редкоземельного металла 0,5-5,0; алюминий – оставшаяся часть.

Этот сплав характеризуется сохранением механической прочности в диапазоне температур от комнатных (20°C) до высоких (200°C) и демонстрирует неплохую электропроводность. Вместе с тем, при попытках его создания с применением мишметалла, включающего церий, лантан, празеодим и прочие элементы, или же при использовании лигатуры Al-La, содержащей лантан, наблюдается формирование дефектной, веерообразной структуры, что приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик сплава. При этом происходит уменьшение пластичности металла, что также влияет на его обрабатываемость. Получение из них деформированных полуфабрикатов, например, проволоки, становится почти невозможным из-за разрывов, что, в свою очередь, ведет к повышению трудозатрат на производство и сокращению доли пригодной продукции [261].

Техническое задание по разработке нового жаростойкого алюминиевого сплава ставит целью достижение не только стабильных прочностных, пластических и электрофизических характеристик, но и повышение технологической гибкости его обработки. Добиваются этого благодаря применению алюминиевого сплава. В его составе, помимо редкоземельных металлов, присутствует никель и стронций. Важным отличием является добавление лантана и церия, также относящихся к редкоземельным элементам. Соотношение компонентов по массе выглядит следующим образом: лантан и церий (в сумме) - не более 9%; никель - не более 0,7%; стронций - не более 0,001%; алюминий - остальное. При этом соблюдаются условия: соотношение церия к лантану находится в диапазоне от 1,0 до 1,5; соотношение никеля к общей сумме лантана и церия составляет от 0,1 до 0,3.

Введение никеля в состав сплава способствует улучшению его пластичности и прочности. С другой стороны, чрезмерное увеличение содержания никеля, относительно концентрации редкоземельных металлов, приводит к повышению электрического сопротивления сплава.

Наличие церия и лантана в сплаве, в пределах указанных значений, обеспечивает наилучшее сочетание механической прочности, термостойкости и электропроводности. Например, при содержании до 9% по массе, возможно применение данного сплава (01417) для бортовых проводов, функционирующих в условиях высоких температур. При присутствии в

составе никеля, железа, кремния и других элементов, увеличение суммарного содержания церия и лантана свыше 9% ведет к значительному падению электропроводности и пластичности металла. Оптимальным считается соотношение церия к лантану в диапазоне 1,0-1,5 мас.%. Меньшее значение соотношения, то есть преобладание лантана, ухудшает пластичность сплава, затрудняет его обработку из-за высокой вероятности образования веерной структуры (см. рис. 7.1). Макроскопическое исследование выявило, что слитки изучаемых сплавов, главным образом, сформированы из зоны столбчатых кристаллов.

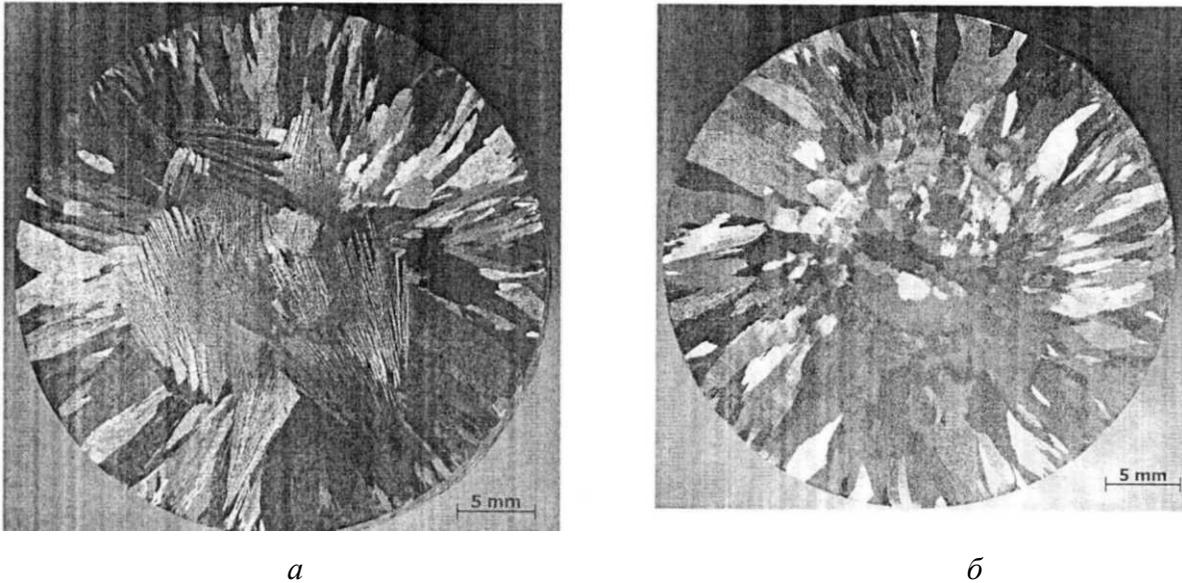


Рисунок 7.1 – Макроструктура сплавов системы Al-PЗМ: *а* – с содержанием 0,5% Ce и 2,5 % La; *б* – с содержанием 1,8% Ce и 1,2 % La

Участки, обладающие подобной структурой, потенциально приводят к трудностям в процессе производства деформированных заготовок, поскольку существенно уменьшают пластичность. Если соотношение церия к лантану превышает 1,5, происходит снижение электропроводности сплава. Легирование никелем в указанных пределах способствует повышению пластичности и улучшает технологичность обработки. В процессе производства деформированных полуфабрикатов из сплавов систем Al-PЗМ и Al-PЗМ-Ni наблюдается характерное распределение структурных компонентов по сечению образцов, вызывающее макро- и микронеоднородность. При этом, увеличение содержания никеля относительно PЗМ усиливает неоднородность структуры металла. Следовательно, значимо не только количество вводимого никеля, но и отношение содержания никеля к сумме редкоземельных металлов. При значениях этого отношения ниже 0,1 повышения механических свойств не достигается, а создание сплавов с отношением никеля к PЗМ более 0,3 ведет к снижению электропроводности и пластичности [231]. Подготовку сплава осуществляли в индукционной печи на основе

первичного алюминия с добавлением лигатур Al-Мишметалл и Al-La, обогащенных никелем, железом, титаном, бором и другими заявленными элементами. В качестве модификатора использовали один или несколько элементов из группы: гафний, рутений, сурьма, бериллий, стронций, углерод в заявленных концентрациях. После этого с помощью кристаллизатора формировали литую заготовку, подвергаемую обработке давлением для получения прутков (диаметром 9 мм) и последующей волоки проволоки (диаметром 0,5 мм). Измерение механических свойств и электропроводности осуществляли на полученных деформированных полуфабрикатах. Для экспериментальной проверки предложенного сплава были созданы композиции с варьирующимся соотношением церия и лантана, а также с различным содержанием никеля относительно суммарного количества церия и лантана. Состав и свойства этих композиций, в сравнении с характеристиками известного сплава, представлены в таблицах 7.1 и 7.2. Как следует из анализа полученных данных, предложенный сплав демонстрирует по сравнению с прототипом повышенную пластичность и улучшенную электропроводность.

Таблица 7.1 – Химический состав известного и заявляемого сплавов

Сплав	Содержание компонентов, мас.%								
	Al	PЗМ			Ni	Fe	Ti	B	Sr
		Ce	La	Ce+La					
Патент № 2458170	основа	0,5	2,5	-	0,2	0,15	0,001	0,001	0,001
Патент РФ №2570684	основа	1,8	1,2	3,0	0,05	0,15	0,001	0,001	0,001
Патент РФ №2570684	основа	1,8	1,2	3,0	0,3	0,15	0,001	0,001	0,001

Таблица 7.2 – Механические характеристики полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ

Сплав	Относительное удлинение, %	Временное сопротивление, МПа	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м
Патент №2458170	17,1	200	0,0341
Патент №2570684	30,7	140	0,0293
Патент №2570684	23,8	145	0,0297

Повышенная пластичность расширяет возможности производства холоднодеформированных полуфабрикатов (в частности, проволоки) и улучшает технологичность обработки. Таким образом, заявленный сплав может успешно применяться в производстве электропроводников, функционирующих в условиях высоких механических нагрузок и температур.

Для технических решений второй группы характерным является применение в качестве заготовки прутков небольшого поперечного сечения, полученных в роторном или электромагнитном кристаллизаторах.

Примером подобного технического решения служит запатентованное в РФ устройство непрерывной прокатки и прессования, описанное в патенте № 101390 (см. рис. 7.2) [252].

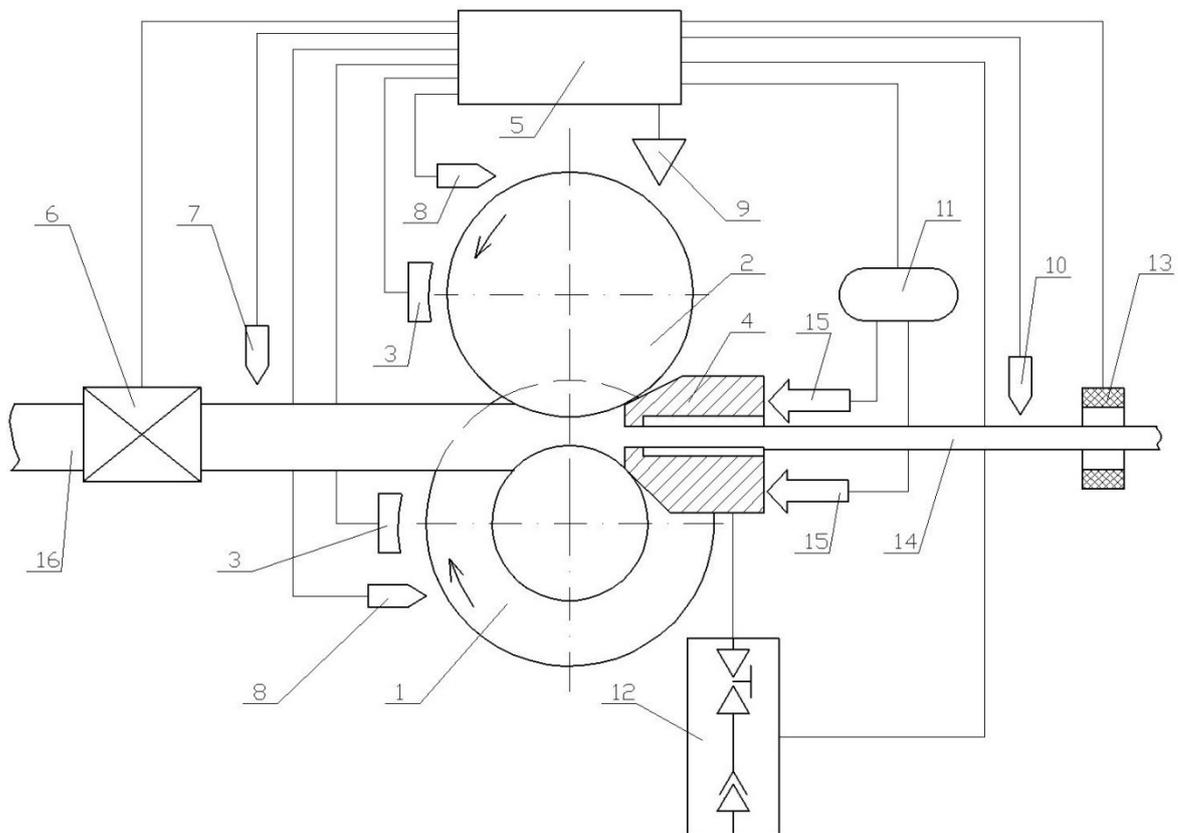


Рисунок 7.2 – Общий вид установки для непрерывной прокатки и прессования: 1 – валок с ручьем; 2 – валок с выступом; 3 – индукторы; 4 – матрица; 5 – управляющая ЭВМ; 6 – устройство для нагрева заготовки; 7 – датчики контроля нагрева заготовки; 8 – датчики контроля температуры валков; 9 – датчик скорости вращения валков; 10 – датчик контроля температуры профиля; 11 – прижимное устройство матрицы; 12 – устройство для охлаждения матрицы; 13 – дефектоскоп; 14 – прессуемый профиль; 15 – датчики давления; 16 – заготовка

Устройство включает валок с ручьем 1 и валок с выступом 2, снабженные индукторами 3 для их нагрева и образующие рабочий калибр, на выходе из которого установлена охлаждаемая

матрица 4, при этом оно дополнительно снабжено управляющей ЭВМ 5, выходы которой соединены с устройством для нагрева 6 заготовки 16, датчиками контроля нагрева 7 температуры заготовки 16, датчиками контроля температуры 8 валков 1 и 2, датчиком скорости вращения 9 валков 1 и 2, датчиком контроля температуры 10 пресс-изделия 14, выходящего из канала матрицы 4, прижимным устройством 11 матрицы 4, устройством для охлаждения 12 матрицы, дефектоскопом 13, расположенным за охлаждаемой матрицей 4 таким образом, что пресс-изделие 14 проходит через его детекторы. Кроме того, прижимное устройство матрицы имеет два рабочих цилиндра с регуляторами и датчиками давления 15.

После начала вращения валков 1 и 2 со скоростью ω_v включают индукторы 3 для их нагрева, температура нагрева которых отслеживается датчиками контроля 8 нагрева температуры валков 1 и 2. Далее передняя часть длинномерной заготовки 16 задается в печь 6, температура нагрева которой фиксируется датчиком контроля 7 температуры заготовки. При достижении заданных температур нагрева валков 1 и 2, индукторы 3 отключаются, а нагретая передняя часть длинномерной заготовки 16 подается в валки 1 и 2. В этот момент времени к валкам 1 и 2 подводится охлаждаемая матрица 4, которая прижимается к валкам 1 и 2 с помощью прижимного устройства 11 матрицы 4 к валкам 1 и 2 с давлением, одинаковым в каждом рабочем цилиндре и равным $P_m = P_{m1} = P_{m2}$, и включается устройство для охлаждения матрицы 12, обеспечивая подачу хладагента в охлаждаемые каналы матрицы 4 со скоростью q_0 . Длинномерная заготовка 16 захватывается валками 1 и 2, и начинается ее выдавливание с помощью активных сил трения со стороны валков 1 и 2 через каналы охлаждаемой матрицы 4.

В ходе прессования профиля 14 показания датчиков температуры нагрева заготовки 16, валков 1 и 2, выходной температуры профиля 14, скоростей валков 1 и 2, давления в каждом рабочем цилиндре 15 непрерывно в режиме реального времени передаются в управляющую ЭВМ 5. Дефектоскоп 13 непрерывно сканирует выходящий профиль 14 и при возникновении дефектов посылает сигнал в управляющую ЭВМ 5.

Управляющая ЭВМ с помощью блоков коммуникаций, корреляции, математической модели объекта и модели принятия решений, исполнительных органов и датчиков контроля текущих технологических параметров процесса непрерывной прокатки и прессования (температуры нагрева заготовки и валков, изменения выходной температуры профиля, скорости вращения валков, давления прижима матрицы) обеспечивает достижение стабильных тепловых условий непрерывного процесса деформирования, особенно выходной температуры профиля, и этим самым получение качественных изделий за счет корректирования при отклонении текущих технологических параметров от заданных с помощью устройств нагрева заготовки, охлаждения матрицы и скоростью вращения валков.

Дефектоскоп сканирует профиль, выходящий из канала матрицы, и в случае возникновения микротрещин или других дефектов в профиле подает сигнал об их возникновении в управляющую ЭВМ, тем самым позволяя точно зафиксировать момент возникновения дефектов в профиле.

В случае возникновения заусенцев на поверхности валков оператор установки увеличивает давление в том рабочем цилиндре, который прижимает часть матрицы к тому валку, на поверхности которого толщина заусенца больше. Создавая различное давление на рабочую поверхность матрицы, можно таким образом изменять ее угол наклона в горизонтальной плоскости и управлять не только процессом образования заусенца на валках, но и картиной истечения прессуемого профиля на выходе из канала матрицы, сводя до минимума появляющиеся дефекты геометрии профиля во время непрерывного выдавливания.

Таким образом, применение этой установки позволяет повысить производительность прессования и качество получаемых профилей.

К этой же группе относятся устройства, расширяющие технологические возможности процесса совмещенной обработки. Например, устройство для непрерывной прокатки-прессования профилей (патент РФ № 102313) [253]. Оно включает (рис. 7.3) валок с ручьем 1 и валок с выступом 2, образующие рабочий калибр, на выходе из которого установлена матрица 3, имеющая каналы 4 для подвода хладагента в месте выхода профиля 5 из рабочего отверстия матрицы 3, снабжено матрицедержателем 6, в пазу которого установлена матрица 3, а на заходной части матрицедержателя 6 выполнены вогнутые поверхности 7 с радиусами закруглений соответствующими радиусам валков 1 и 2, с которыми он находится в контакте. Матрицедержатель снабжен каналами для подвода хладагента 8 на рабочую поверхность валков 1 и 2 со стороны примыкания матрицы 3.

Устройство работает следующим образом. Вначале матрица 3 помещается в паз матрицедержателя 6, образуя матричный блок, который устанавливается в рабочее положение, перекрывая рабочий калибр, образованный валком 1 с ручьем и валком 2 с выступом. Затем заготовка 9, нагретая до необходимой температуры, задается в валки 1 и 2, деформируется в рабочем калибре между валками 1 и 2 и выдавливается через рабочее отверстие матрицы 3 в профиль 5. В момент подхода заготовки к рабочей поверхности матрицы 3 и появления профиля 5 из рабочего отверстия матрицы 3 включается система охлаждения и подается хладагент в каналы 8 матрицедержателя и далее в каналы 4 матрицы 3.

Выполнение каналов в матрицедержателе обеспечивает беспрепятственный доступ хладагента в зону охлаждения, которая образована наружными поверхностями валков, матрицей и самим матрицедержателем. При этом образование заусенца не препятствует циркуляции хладагента, что обеспечивает стабильное охлаждение инструмента во время работы

устройства. Кроме того сохраняется подвод хладагента через каналы к профилю на выходе из канала матрицы, что позволяет отводить избыточное тепло непосредственно от деформируемого металла и оперативно регулировать его выходной температурой. Герметичность системы охлаждения обеспечивается примыканием заходных поверхностей матрицы и матрицедержателя к валкам во время работы устройства, что обеспечивается выполнением на заходной части матрицедержателя вогнутых поверхностей с радиусами закруглений соответствующими радиусам валков и расположением матрицы в пазу матрицедержателя.

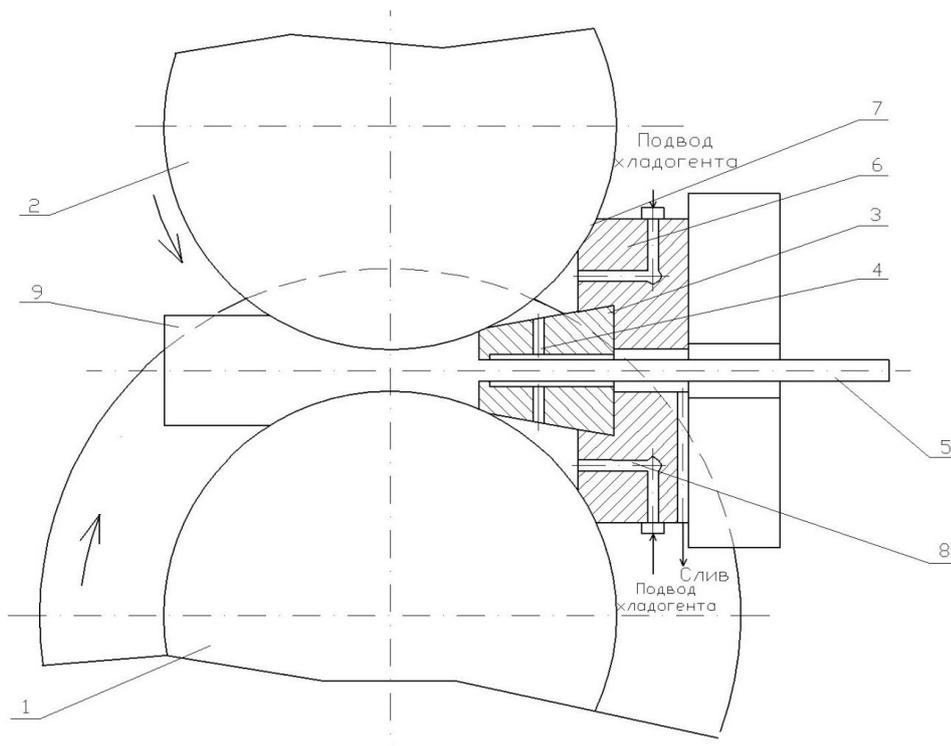


Рисунок 7.3 – Общий вид устройства для непрерывной прокатки и прессования:

1 – валок с ручьем; 2 – валок с выступом; 3 – матрица; 4 – каналы для подвода хладагента; 5 – профиль; 6 – матрицедержатель; 7 – вогнутые поверхности матрицедержателя; 8 – каналы для подвода хладагента; 9 – заготовка

Устройство по патенту РФ № 102542 [254] также предназначено для повышения качества пресс-изделий (рис. 7.4). Матрица здесь выполнена в виде прямой трапециевидальной призмы, наклонные грани которой на заходной части имеют вогнутые поверхности с радиусами закруглений, соответствующими радиусам валков, а в конце вогнутого участка наклонные грани расположены по касательной к поверхности валков с заданным углом наклона боковых граней. Выполнение на заходной части матрицы вогнутых поверхностей с радиусами закруглений соответствующими радиусам валков обеспечивает равномерный минимально-возможный зазор на контактной поверхности валков и матрицы, имеющий равную

протяженность для противоположных боковых граней, что сводит до минимума образование заусенца и разной его толщины на валках.

Следует отметить, что полное отсутствие зазора между вращающимися валками и неподвижной матрицей невозможно, т. к. данные детали образуют подвижные пары. Кроме того, во время работы инструмент нагревается, поэтому обычно зазор равен $\Delta_3 = 0,3 \div 0,4$ мм. Образование заусенца в этом случае возможно, когда давление при выдавливании профиля через рабочий канал матрицы превысит давление для выдавливания заусенца в зазор между валками и матрицей.

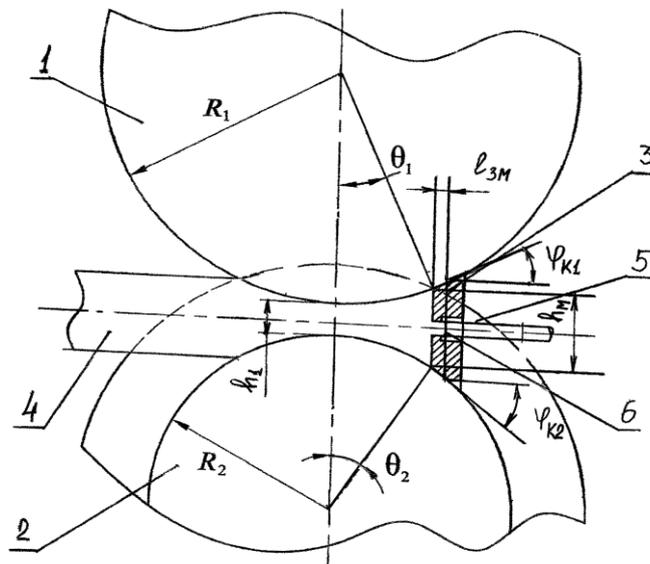


Рисунок 7.4 – Общий вид устройства для непрерывной прокатки и прессования профилей:
1 – валок с выступом; 2 – валок с ручьем; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – профиль; 6 – рабочий канал матрицы

В данном устройстве отмечено равномерное покрытие рабочей поверхности на обоих валках пленкой алюминия толщиной не более 0,2 мм, что является неизбежным при горячей деформации алюминия без смазки. При этом на поверхности прутка отсутствовали пережимы и отклонения от формы, а предельное отклонение размеров диаметра прутка по его длине составило $\pm 0,05$ мм.

К третьей группе устройств совмещенной обработки отнесены установки, для непрерывного литья и прокатки-прессования. Их отличительным признаком является отсутствие литейного агрегата с помощью которого получают литую длинномерную заготовку. Расплав в таких устройствах поступает в водоохлаждаемые валки, кристаллизуется в них и выдавливается в виде пресс-изделия через калибрующее отверстие в матрице.

В качестве примера приведем устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов (рис. 7.5) по патенту РФ № 2457914 [255], которое

также относится к области металлургии, а конкретнее к обработке металлов совмещенными методами непрерывного литья, прокатки и прессования, и может быть использовано для получения пресс-изделий из цветных металлов и сплавов, преимущественно из алюминиевых сплавов.

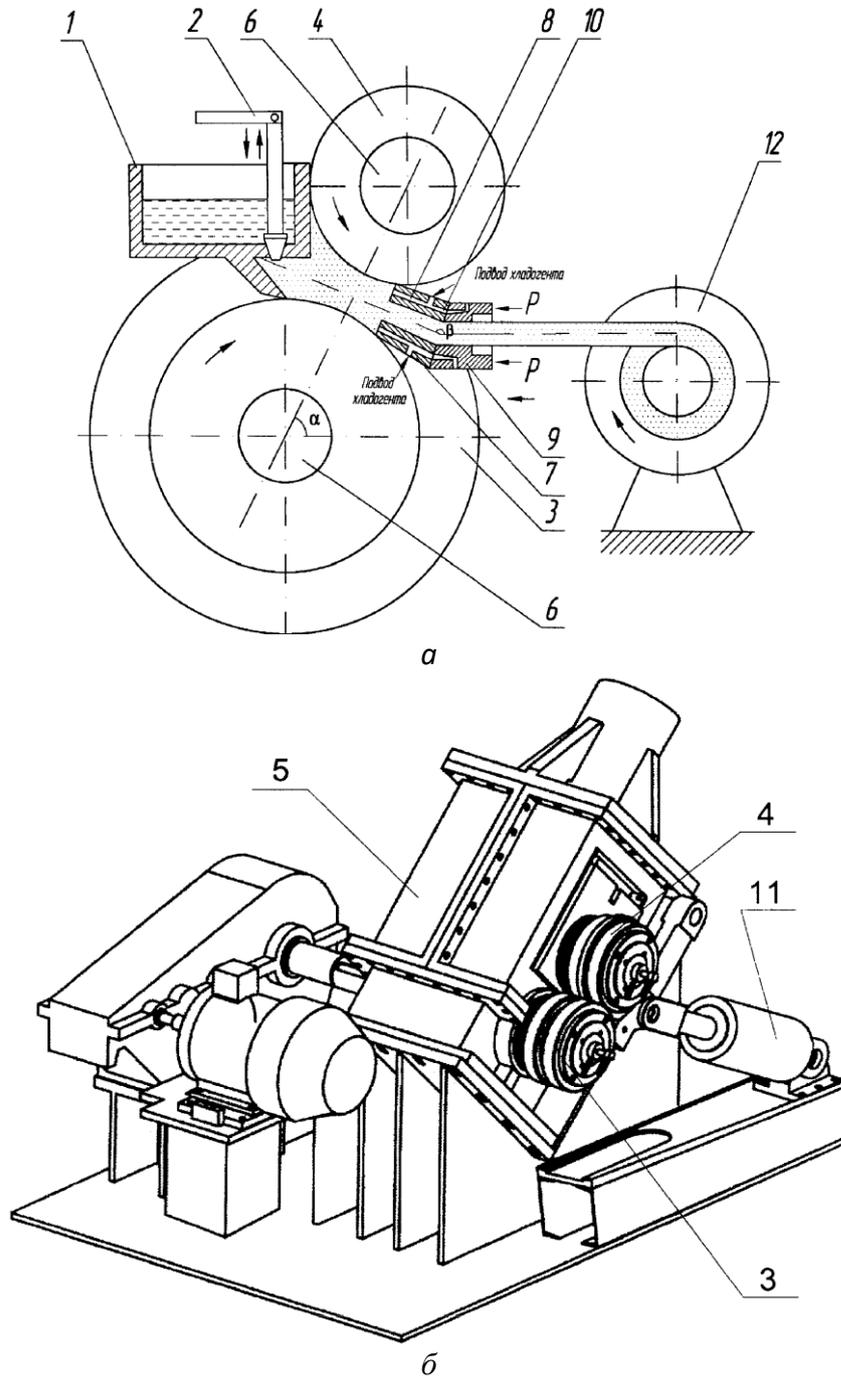


Рисунок 7.5 – Принципиальная схема (а) и общий вид устройства (б) для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов: 1 – печь-миксер; 2 – регулятор подачи расплава; 3 – валок с канавкой; 4 – валок с выступом; 5 – станина; 6 – водоохлаждаемые полости в валках; 7 – форкамера; 8 – водоохлаждаемые каналы в матрице, 9 – матрица; 10 – рабочий поясok матрицы; 11 – гидроцилиндр; 12 – моталка

Основной задачей нового технического решения являлось расширение технологических возможностей устройства за счет возможности обработки сплавов, имеющих повышенные прочностные свойства, а также повышение качества пресс-изделий за счет улучшения механических свойств.

Устройство работает следующим образом. Металл, расплавленный с помощью печи-миксера 1, захватывается валками 3 и 4. В процессе работы регулятор 2 дозирует количество металла, подаваемого в калибр валков, уменьшая или увеличивая поток расплава. При этом на поверхностях водоохлаждаемых валков 3, 4 начинается кристаллизация металла. Далее закристаллизовавшийся в виде заготовки металл обжимается в закрытом калибре, распрессовывается и через цилиндрическую полость форкамеры 7 поступает в матрицу 9, а затем выдавливается через калибрующее отверстие матрицы с образованием пресс-изделия заданной формы и размеров. Выходной конец движущегося пресс-изделия направляется на моталку 12, где производится его смотка в бухту.

Установка (рис. 7.6) для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения сварочной проволоки и лигатурных прутков из цветных металлов и сплавов [256] (патент РФ № 2689460) относится к области совмещенных процессов литья и обработки металлов давлением и может быть использовано для получения проволоки из сплавов цветных металлов, в том числе сварочной проволоки и лигатурных прутков из алюминиевых сплавов.

Установка, предназначенная для непрерывного литья, проката, прессования и волочения сварочной проволоки и прутков лигатур, включает в себя печь-миксер 1, в которой находится расплав 2. Далее следует раздаточная коробка 3, за которой расположен водоохлаждаемый роторный кристаллизатор 4. После него смонтирован валковый узел прокатки-прессования, снабженный валками 5 и матрицей 6. Также предусмотрен непрерывный сортопрокатный стан 7, включающий клетки. Завершает конструкцию деформирующий узел волочения 8, оснащенный волокой 9, и моталка 10 [256].

В процессе производства расплавленный металл (2) из печи-миксера (1) переходит в распределительный короб (3), где автоматически контролируется и поддерживается установленный уровень. Затем металл подается в желоб роторного кристаллизатора (4), закрытый стальной непрерывной лентой. Эта лента перемещается по системе направляющих роликов, подвергаясь охлаждению распылением. Застывший слиток далее поступает в калибр замкнутых валков (5), откуда выдавливается через матрицу (6), формируя пруток нужного профиля.

Следующим шагом является подача полученного прутка в клетку валков непрерывного сортопрокатного стана (7). В калибрах этой клетки происходит уменьшение поперечного сечения заготовки. После этого заготовка направляется в деформирующий узел волочения (8),

проходя через волоку (9). Деформированный полуфабрикат, получивший определенный диаметр, наматывается в бухту на моталке (10) [256].

Для проверки работоспособности предложенной установки из сплава 01570 системы Al-Mg-Sc спроектировали инструмент и провели исследования на установке СПП-200 (см. главу 6). Для начала была изготовлена сварочная проволока, диаметром 3 мм. Пруток, с сечением 9 мм, изготавливался методом совмещенного проката-прессования, а проволока 3 мм формировалась последующей сортовой прокаткой и волочением. Заготовку, с сечением 14×14 мм, сформированную в роторном кристаллизаторе при температуре расплава 780-790 °С, направляли в закрытый калибр валков установки СПП-200. Пруток, диаметром 9 мм, подвергался холодной прокатке в восьмиугольных калибрах на непрерывном сортовом прокатном стане за 12 проходов и волочению за один проход, что в итоге позволило получить проволоку круглого сечения, с диаметром 3 мм (таблица 7.3) [256].

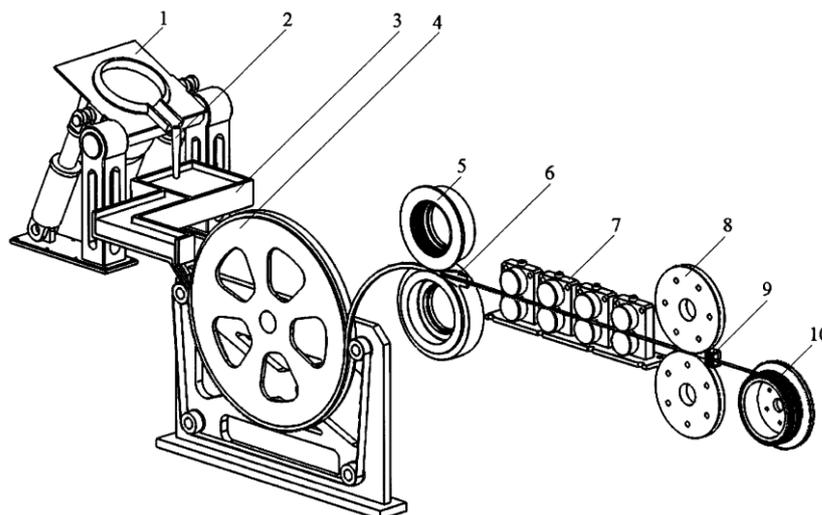


Рисунок 7.6 – Общий вид установки для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения сварочной проволоки и лигатурных прутков из цветных металлов и сплавов: 1 – печь-миксер; 2 – расплав; 3 – раздаточная коробка; 4 – роторный кристаллизатор; 5 – валковый узел; 6 – водоохлаждаемая матрица; 7 – непрерывный сортопрокатный стан; 8 – узел волочения, 9 – волока; 10 – моталка

По ходу процесса отбирали образцы для механических испытаний, результаты которых представлены в табл. 7.3 (где для сортовой прокатки указан размер стороны полуфабриката, для совмещенной прокатки-прессования диаметр прутка, а для волочения диаметр проволоки). Полученные результаты механических испытаний позволили установить, что после обработки на заявляемой установке экспериментальные образцы изделий из сплава системы Al-Mg-Sc демонстрируют высокий уровень прочностных и пластических свойств, позволяющий

осуществить суммарную деформацию без применения промежуточных отжигов в непрерывном режиме обработки [256].

Анализ информации, представленной в таблице 7.3, дополнительно выявил, что внедрение данной установки способствует расширению технологических перспектив. В частности, это выражается в снижении трудозатрат и энергопотребления в процессе изготовления проволоки из сплавов цветных металлов. Кроме того, обеспечивается возможность выпуска сварочной проволоки небольших диаметров, причем весь технологический цикл - непрерывное литье, прокатка, прессование и волочение - реализуется в рамках одной производственной линии, обеспечивая высокие показатели механических свойств получаемого металла [256].

Таблица 7.3 – Виды обработки, режимы и механические свойства длинномерных полуфабрикатов из сплава 01570 по переходам

Номер перехода	Размер, мм	Площадь поперечного сечения калибра, мм ²	Коэффициент вытяжки $\lambda_{ед}$	Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
совмещенная прокатка-прессование						
1	9,0	500	7,9	316	217	18
сортовая прокатка						
1	8,4	70,7	1,14	-	-	-
2	7,7	58,9	1,20	326	297	8,6
3	7,4	54,3	1,08	-	-	-
4	6,8	45,3	1,20	424	391	7,1
5	6,3	39,4	1,15	-	-	-
6	5,7	31,9	1,24	413	361	7,2
7	5,3	27,9	1,14	-	-	-
8	5,0	24,3	1,15	421	401	5,8
9	4,5	15,9	1,14	-	-	-
10	4,0	12,6	1,26	422	415	1,8
11	3,75	11,0	1,15	-	-	-
12	3,4	9,1	1,20	458	429	3,5
волочение						
1	3,0	7,1	1,28	432	413	2,2

Устройство для беслитковой прокатки и прессования металла (рис. 7.7) [257] (патент РФ № 2724758) относится к металлургии, в частности к непрерывному литью, прокатке и прессованию цветных металлов и сплавов, и может быть использовано для получения длинномерных пресс-изделий из них. Одной из основных областей применения является производство прутков для модифицирования алюминиевых сплавов и сварочной проволоки [257].

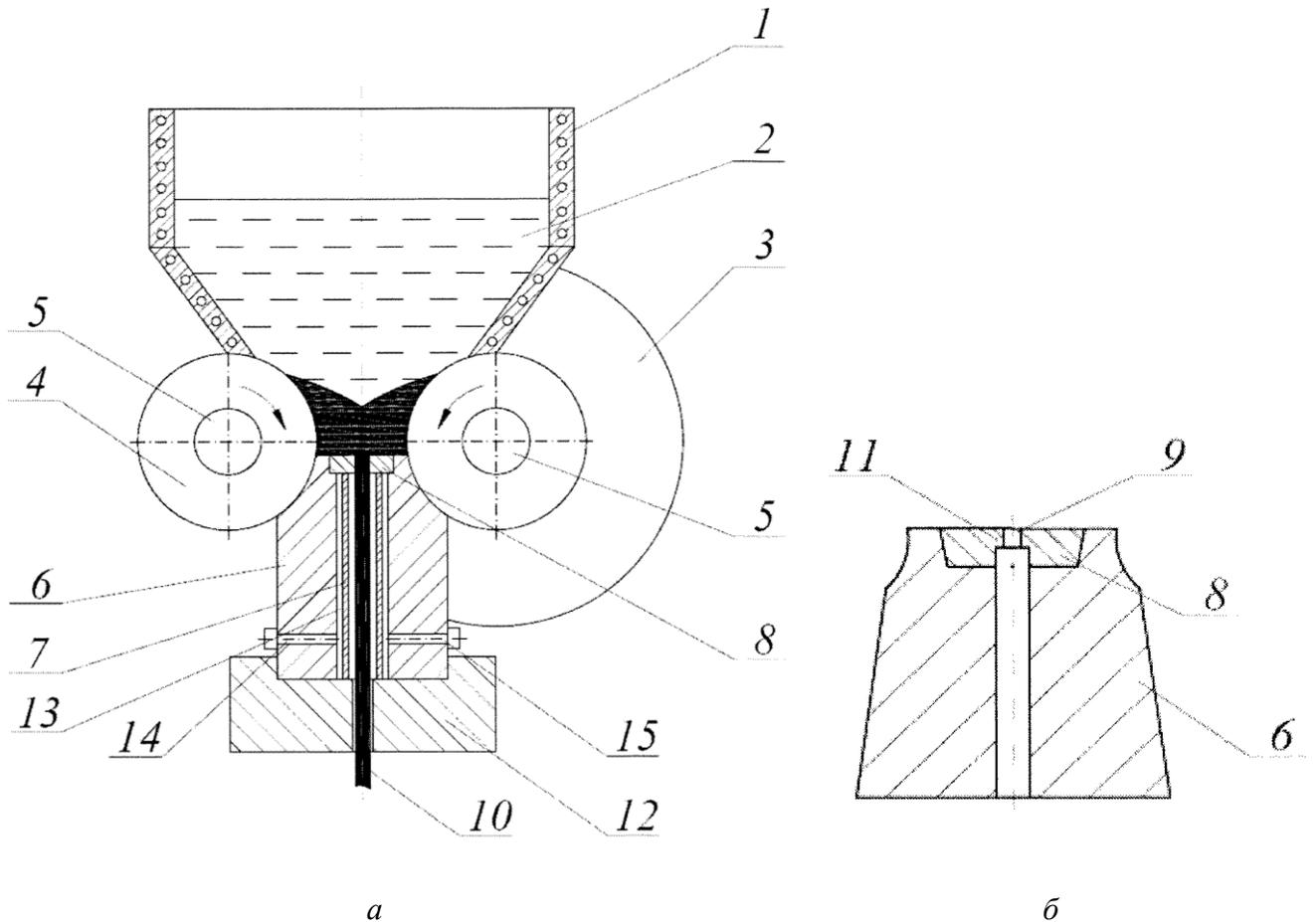


Рисунок 7.7 – Общий вид устройства для беслитковой прокатки и прессования металла (а) и вид матрицы (б): 1 – печь-миксер; 2 – расплав; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – охлаждаемые полости в валках; 6 – водоохлаждаемая матрица; 7 – трубка; 8 – железграфитовая вставка, 9 – рабочий канал вставки; 10 – пресс-изделие; 11 – калибрующий пояс; 12 – матрицедержатель; 13 – водоохлаждаемые каналы матрицы; 14, 15 – каналы для подвода и отвода хладагента

Известно устройство для непрерывной обработки – литья, прокатки и прессования проволоки [189]. Оно включает печь-миксер, валок с канавкой и валок с выступом, снабжённые охлаждаемыми полостями, формирующие рабочий калибр. На выходе из калибровочного узла устанавливается матрица, включающая калибрующий пояс и продольные канавки. Эти канавки,

расположенные симметрично на наружной поверхности матрицы, образуют небольшой зазор по отношению к калибрующему поясу. В выходном отверстии матрицы размещается трубка, снабженная наружными ребрами. Ребра входят в продольные пазы матрицы. Один конец трубки соприкасается с калибрующим поясом матрицы, а другой – с матрицедержателем. Недостатком данного изобретения являются высокие энергосиловые затраты, возникающие при выдавливании металла через матрицу, из-за высоких значений коэффициента трения в процессе прессования. Применение смазки в этом случае нежелательно, так как она, попадая в калибр валков, значительно снижает реализуемость процесса совмещенной прокатки-прессования, вызывая проскальзывание валков относительно деформируемого металла.

Задачей применения этого устройства является снижение энергосиловых затрат в процессе прессования металла через матрицу за счет снижения коэффициента контактного трения на границе металл - рабочий пояс матрицы. Это приводит к расширению технологических возможностей устройства за счет повышения эффективности процесса и снижению энергосиловых затрат на деформацию металла.

Поставленная задача достигается тем, что устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла, содержащее печь-миксер, валок с ручьем и валок с выступом, имеющие охлаждаемые полости и образующие рабочий калибр ящичного типа, на выходе из которого в матрицедержателе установлена водоохлаждаемая матрица, имеющая прямоугольное поперечное сечение в выходном отверстии которой имеется трубка с наружными ребрами, расположенными в продольных пазах матрицы, при этом, на матрице на выходе из калибра закреплена быстросменная вставка из железграфитового композита с калибрующим пояском, необходимая для перекрытия калибра до момента его раскрытия, выполненная с рабочим каналом заданной формы и размерами. Применение такой матрицы со вставкой из железграфитового композита позволяет существенно снизить силы трения на контакте металла с прессовым инструментом и, тем самым, снизить усилие деформации при его выдавливании. Это увеличивает срок службы рабочего инструмента и энергосиловые затраты на деформацию металла. При этом рабочий канал вставки обеспечивает получение пресс-изделия заданной формы, а калибрующий пояс - заданные размеры. Прямоугольная форма поперечного сечения вставки определенных размеров необходима для гарантированного перекрытия ящичного калибра до момента его раскрытия, когда формоизменение металла становится неконтролируемым. Дополнительным преимуществом такой конструкции устройства является возможность гарантированного прижатия матрицы с вставкой из железграфитового композита к валкам, так как усилие поджима становится меньше и вероятность проникновения металла в зазор между валками и матрицей значительно снижается.

Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла включает печь-миксер 1 с расплавом 2, валок 3 с ручьем и валок 4 с выступом, имеющие охлаждаемые полости 5, при этом валки образуют закрытый калибр, перекрытый на выходе водоохлаждаемой матрицей 6, на выходной поверхности которой выполнены продольные пазы, расположенные в диаметральной плоскости и отстоящие от матрицы 6. В продольные пазы вставлены наружные ребра трубки 7, имеющей наружный диаметр меньше, чем внутренний диаметр выходной части матрицы 6. На матрице 6 расположена железографитовая вставка 8, имеющая рабочий канал 9 по форме и размерам пресс-изделия 10 и калибрующий поясок 11. С одной стороны трубка 7 упирается в железографитовую вставку 8 матрицы 6, а с другой стороны - в матрицедержатель 12. Водоохлаждаемые каналы 13, расположенные в зазоре между выходной поверхностью матрицы и трубкой 7, сообщаются с каналами для подвода 14 и отвода 15 хладагента.

Устройство функционирует следующим образом.

Первоначально расплавленный металл, обозначенный цифрой 2, поступает в миксерную печь 1. Одновременно с этим стартует процесс его кристаллизации на поверхностях вращающихся валков, указанных номерами 3 и 4. Охлаждение этих валков производится посредством полостей, помеченных цифрой 5. После этого, затвердевший металл подхватывается валками 3 и 4, подвергается деформации в замкнутом калибре, образованном этими же валками, и выдавливается наружу через калибрующий поясок 11, расположенный в железографитовой вставке 8. Эта вставка находится внутри матрицы 6, формируя прессованное изделие 10. В момент, когда расплав 2 заполняет миксерную печь 1, происходит одновременная подача хладагента в канал 14. Отвод хладагента реализован через канал 15.

Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла (рис. 7.8) [258] (патент РФ № 2792327) относится к области металлургии, конкретнее к обработке металлов совмещенными методами непрерывного литья, прокатки и прессования, и может быть использовано для получения деформированных полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов, в том числе электротехнического назначения.

Установка включает в себя миксерную печь 1, электромагнитный кристаллизатор 2, снабженный питателем 3, блок управления 4, отвечающий за задание параметров процесса, деформирующий узел, основу которого составляют валок 5 с выступом, диаметр которого D_1 , и валок 6 с ручьем, имеющим диаметр D_2 по дну и D_3 по реборде. Оба валка имеют внутренние каналы для циркуляции охлаждающей жидкости (на рис. 7.8 не отражены) и формируют замкнутый ящичный калибр, выходом которого является матрица 7 с калиброванным отверстием диаметром d_m и клиновидными полостями 8, предназначенными для охлаждения матрицы. Матрица прижимается к валкам с использованием гидроцилиндра, обозначаемого как 9. После узла деформации технологическая последовательность включает в себя охлаждающее

устройство 10, предназначенное для обработки полученных прессованных изделий. Далее следует универсальная прокатная клеть 11, а завершает процесс устройство для намотки готовой продукции 12 [258].

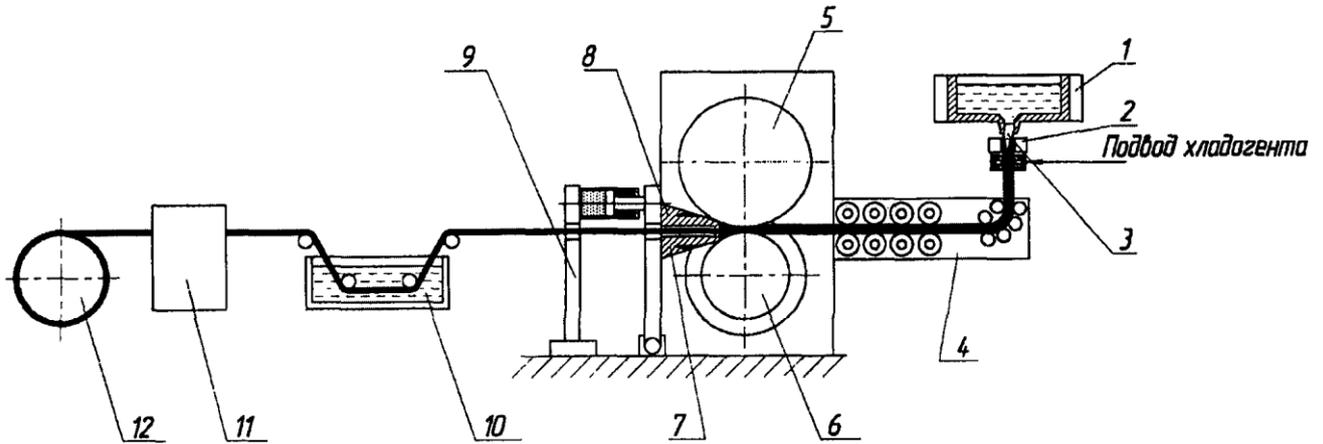


Рисунок 7.8 – Общий вид установки для непрерывного литья, прокатки и прессования металла:

- 1 – печь-миксер; 2 – электромагнитный кристаллизатор; 3 – питатель; 4 – деформирующий узел; 5 – валок с выступом; 6 – валок с канавкой; 7 – матрица; 8 – клиновидные полости для охлаждения матрицы; 9 – гидроцилиндр; 10 – охлаждающее устройство; 11 – прокатная клеть; 12 – пресс-изделие

В процессе производства расплавленный металл из смесительной печи 1 поступает в электромагнитный кристаллизатор 2. Оттуда, по питателям 3, формируется слиток круглого сечения, прошедший кристаллизацию. Этот слиток подвергается изгибу, а затем, благодаря механизму правильной подачи 4, направляется в калибр. Калибр образован валком 5, имеющим выступ, и валком 6, имеющим ручей. Далее заготовка проходит через процесс прокатки, где происходит обжатие по высоте, осуществляемое гребнем вала 5. Металл полностью заполняет калибр, после чего происходит его выдавливание, формирующее прессовое изделие, через матрицу 7. Фиксация матрицы 7 осуществляется посредством гидроцилиндра 9. Охлаждение матрицы обеспечивается циркуляцией хладагента в клиновидных полостях 8. Заключительный этап – намотка полученного прессованного прутка в бухту на устройстве намотки 12. Перед намоткой изделие проходит через емкость охлаждения 10 для охлаждения, а затем подвергается калибровочной прокатке в универсальной клети 11.

С применением специальной установки был изготовлен методом горячего прессования прутки, имеющие диаметр 9 мм. Этот пруток был произведен из сплава алюминия и магния (Al-Mg), в состав которого добавлено 0,25% скандия. Целью создания данного прутка являлось

дальнейшее его использование для изготовления сварочной проволоки. Процесс начинался с заливки расплава, разогретого до $780-790^{\circ}\text{C}$, в закрытый калибр, который находился в валковой установке СПП-200. Диаметр валков в этой установке составлял 200 мм. Внутри калибра происходило обжатие материала путем прокатки, совмещенное с выдавливанием прутка требуемого диаметра (9 мм) через матрицу. Матрица плотно прижималась к валкам благодаря усилию, создаваемому гидроцилиндром. Матрица была выполнена из стали марки 5ХНМ, и в нее помещалась вставка из железграфитового композита. Замеры силы, действующей на матрицу, показали, что она снизилась в 1,2 раза по сравнению с прессованием через матрицу без вставки из железграфитового композита. Качество поверхности прутка характеризовалось блестящей поверхностью и отсутствием наружных дефектов, что было обусловлено снижением сил трения на контактной поверхности рабочего пояса железграфитовой вставки и прессуемого металла.

Способ беслитковой прокатки-прессования прутков и устройство для его реализации (рис. 7.9) [259] (патент РФ № 2847204) относится к металлургии, в частности к способам и устройствам для совмещенных процессов с использованием операций непрерывного литья, прокатки и прессования. Техническим результатом является повышение эффективности изготовления горячепрессованных прутков за счет снижения количества технологических переделов и трудоемкости производства.

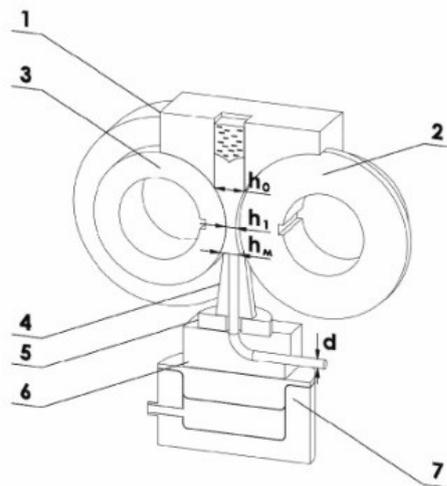


Рисунок 7.9 – Схема способа беслитковой прокатки-прессования прутков и устройства для его реализации: 1 – заливочное устройство; 2 – валок с выступом; 3 – валок с канавкой; 4 – матрица; 5 – матрицедержатель; 6 – склиз; 7 – гидроприжим

Устройство работает следующим образом. Расплавленный металл, подается в заливочное устройство 1, захватывается валками 2 и 3. При этом на поверхностях

водоохлаждаемых валков 2 и 3 начинается кристаллизация металла. Далее закристаллизовавшийся в виде заготовки прямоугольного сечения металл обжимается в закрытом калибре, распрессовывается и выдавливается через калибрующее отверстие матрицы 4 с образованием пресс-изделия (прутка) заданной формы и размеров. При вращении валков гидроприжим 7 через матрицедержатель 5 и склиз 6 плотно прижимает матрицу 4 к поверхностям валков 2 и 3, обеспечивая постоянный зазор между валками и матрицей. Склиз 6 изменяет направление выхода прутка диаметром d и удаляет его из устройства.

Разработанные технические решения дали возможность реализовать новые технологии получения проволоки малых диаметров из сплавов системы Al-PЗМ, в том числе для предложенного сплава, а также спроектировать валковый и прессовый инструмент для реализации процессов термомодеформационной обработки с использованием роторного и электромагнитного кристаллизаторов для получения заготовки, а также опытно-промышленных установок совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400.

7.2. Опытно-промышленное опробование разработанной технологии получения проволоки из сплава 01417 с применением установки СПП-400

Для проведения экспериментально-промышленных испытаний на оборудовании СПП-400 (см. рисунок 7.10) потребовалась непрерывнолитая заготовка, произведенная на ЭМК, из сплава 01417. В качестве заготовки была выбрана бухта с диаметром 12 мм. Габариты бухты составили 300×1000×1000 мм, а её общая масса достигла 300 кг. Изготовление заготовки велось на действующей технологической линии, принадлежащей ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».

Физико-механические свойства непрерывнолитой заготовки следующие: предел прочности при растяжении составляет 212-214 МПа, относительное удлинение варьируется в пределах 8-9%, удельное электрическое сопротивление – 0,03610 Ом·мм²/м. В процессе опытно-промышленных испытаний было задействовано уникальное технологическое оборудование, в частности, установка непрерывного прессования СПП-400 [215].

Результаты теоретических (см. главу 2) и экспериментальных (см. главу 3) исследований в виде параметров совмещенной прокатки-прессования и режимов волочения использовали для апробации технологии получения проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, проведенной в промышленных условиях на предприятиях ООО «Завод современных материалов» и ООО «Альянс 2008».



Рисунок 7.10 – Установка промышленного непрерывного прессования, совмещающая прокатку и прессование (модель СПП-400)

Требуется разработка проектной документации, описывающей новый валковый и прессовый инструмент. Данная документация была разработана с использованием технических решений, защищенных авторскими патентами РФ (см. раздел 7.1). Для экспериментальных исследований были разработаны конструкции валка с выступом (рис. 7.11, а), валка с канавкой (рис. 7.11, б).

Конструкция прессового инструмента показана на рис. 7.12.

На агрегате СПП-400 производилась обработка круглой бухтовой заготовки из ЭМК (см. рисунок 7.13, а), имевшей диаметр 18 мм и изготовленной из сплава 01417. Вес каждой бухты достигал 100 кг. Эта заготовка, полученная способом ЭМК, предназначалась для дальнейшего изготовления длинномерного горячепрессованного прутка, имеющего диаметр 9 мм [215].

Анализ предыдущих исследований по прессованию образцов сплава 01417 показал значительное влияние скорости процесса на качество конечного продукта. На первом этапе исследования, цель которого — определить наилучшие параметры, была установлена предельная допустимая скорость вращения валков, равная 8 об/мин. При этом температура исходного материала (T_3) поддерживалась на уровне 550 °С, а температура валков (T_B) — на 200 °С. Несмотря на общую стабильность процесса, выбранные режимы скорости и температуры привели к образованию температурных трещин по всей площади поперечного среза полученного стержня. С учётом этого эффекта последующие испытания были проведены с понижением частоты вращения валков до 4 об/мин при неизменных остальных условиях. В результате выполненных экспериментов был накоплен практический опыт по корректировке технологических параметров СПП для данного сплава, что позволило избавиться от вышеупомянутых дефектов.

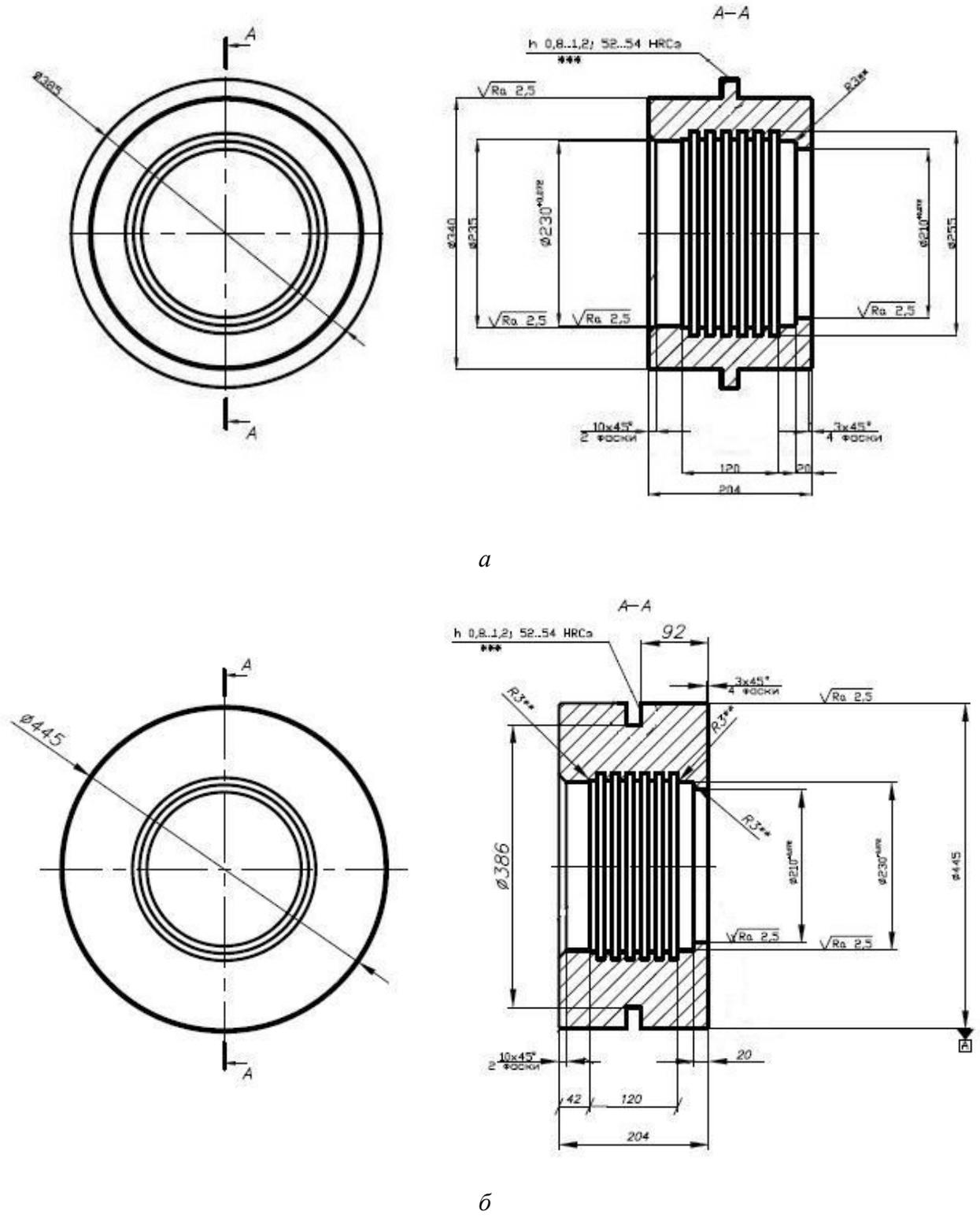


Рисунок 7.11 – Валковый инструмент для установки СПП-400:

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

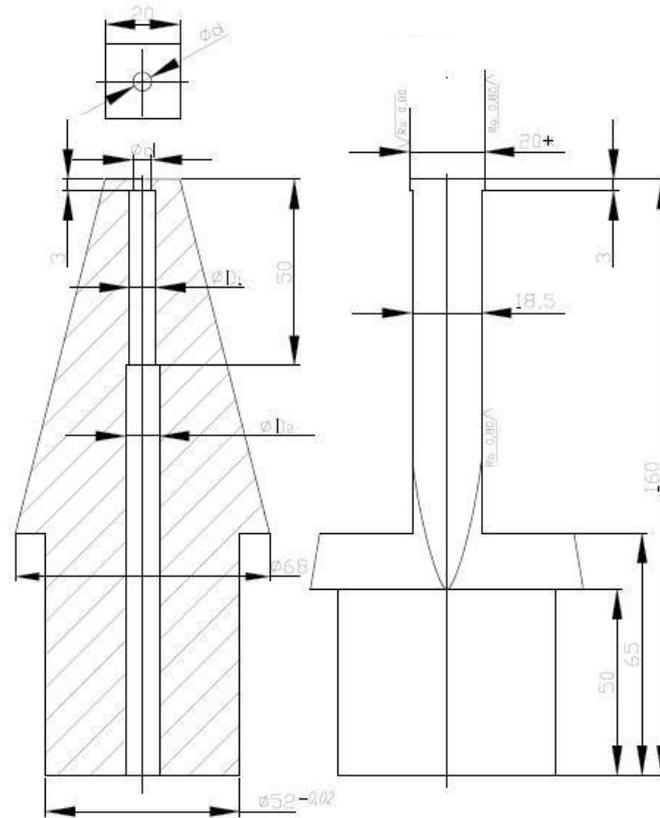


Рисунок 7.12 – Матрица для установки СПП-400



a



б

Рисунок 7.13 – Опытные партии непрерывнолитой заготовки из ЭМК диаметром 18 мм (*a*) и проволоки диаметром 0,5 мм (*б*) из сплава 01417

Далее осуществлялось волочение до диаметра 0,5 мм, с периодическими отжигами (подробности в разделе 3.4). Внедрение технологии СПП обусловило пригодность слитков к

волочению, которое шло уверенно, без разрывов, а проволока отличалась превосходной зеркальной поверхностью (см. рис. 7.13, б) [215].

Исследование микроструктуры полуфабрикатов, полученных литьем в ЭМК и обработкой давлением (см. рисунок 7.14), привело к следующим выводам. Микроструктура исходной заготовки, произведенной непрерывным литьем с диаметром 18 мм, изготовленной из сплава 01417 (рис. 7.14, а), в сечении образца демонстрирует наличие мелких интерметаллидных частиц с габаритами $0,008 \times 0,003$; $0,005 \times 0,002$; $0,01 \times 0,002$; $0,007 \times 0,002$; $0,017 \times 0,011$ мм. В структуре деформированной горячей обработкой заготовки диаметром 9 мм, полученной методом прокатки-прессования (рис. 7.14, б), также обнаруживаются небольшие интерметаллиды размерами $0,006 \times 0,003$; $0,006 \times 0,004$; $0,015 \times 0,005$; $0,010 \times 0,007$ мм [215].

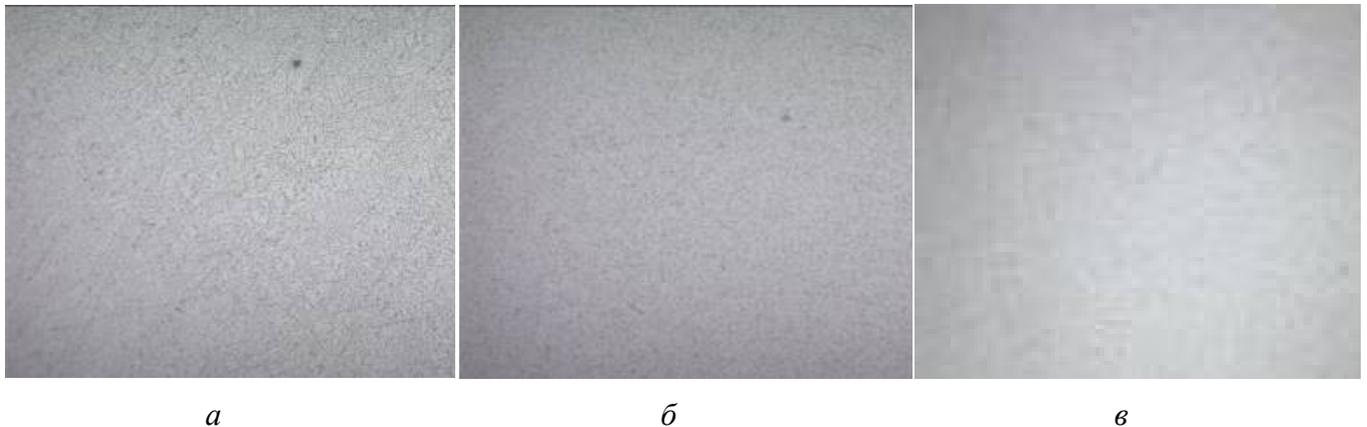


Рисунок 7.14 – Микроструктура непрерывнолитой заготовки диаметром 18 мм (а), горячедеформированного прутка после СПП диаметром 9 мм (б) и проволоки диаметром 0,5 мм (в) из сплава 01417, $\times 200$

В рамках промышленного предприятия ООО «Альянс 2008» была создана экспериментальная программа, детализированная в табл. 7.4. Температура промежуточных отжигов была зафиксирована на уровне $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ с часовой выдержкой, после чего следовало воздушное охлаждение. Результаты тестирования механических свойств проволоки, полученные на разных этапах волочения и после завершающего отжига с использованием различных подходов, представлены в таблице 7.5 [215].

В процессе волочения проволоки из заготовки, произведенной на СПП-400, удалось получить необходимые механические свойства при конечном диаметре 0,5 мм. Разработанный технологический процесс, примененный в волочении, прошёл успешное производственное тестирование на территории ООО «Альянс 2008».

Таблица 7.4 – Программа эксперимента направленного на получение 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%

Анализ информации тоже показал, что проволока сечением 0,5 мм в нагартованном виде показывает незначительную пластичность (смотри таблицу 7.5). Пластичность материала при этом не превосходит значение $\delta = 1,3\%$, что расходится с ТУ 1-809-1038-2018, где минимальное значение данного показателя установлено на уровне 8%.

В связи с этим было принято решение провести исследования различных режимов заключительного отжига для достижения требуемых показателей пластичности. Кроме того, нужно было определить минимальный уровень деформации, который обеспечивает оптимальное сочетание прочности и пластичности упрочненной проволоки в интервалах между отжигами, основываясь на данных, полученных в ходе исследований [224].

Предложенный вариант волочения, подразумевающий значительные деформации между этапами (см. табл. 7.4), позволил выпустить промышленные партии проволоки сечением 0,5 мм (рис. 7.13, б) с заданными характеристиками, применяя финальный отжиг по различным протоколам. Анализ данных по механическим свойствам (см. таблицу 7.6) показывает: увеличение суммарной деформации до диапазона 72-84% приводит к значительному снижению прочности и пластичности металла, а минимальная температура для промежуточного отжига должна быть не менее 420 °С [224].

Применительно к механическим характеристикам и удельному электросопротивлению, у проволоки по технологии ЭМК-СПП-волочение из сплава 01417 было подтверждено соответствие ТУ 1-809-1038-2018 (см. таблицу 7.6).

Таблица 7.5 – Механические свойства полуфабрикатов из сплава 01417

Полуфабрикат	Механические свойства		
	Временное сопротивление, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Пруток диаметром 9,0 мм после СПП	145	85	31,1
	145	85	32,0
Пруток диаметром 7,0 мм	170	150	15,8
	160	150	17,0
	165	145	14,5
Пруток диаметром 6,0 мм	190	170	12,0
	170	170	11,3
	175	155	12,5
Проволока диаметром 3,0 мм после отжига (T=420 °C, τ =5 часов)	130	90	23,5
	130	90	22,7
	130	95	23,1
Проволока диаметром 1,8 мм	190	190	13,0
	195	190	12,9
	205	195	12,0
Проволока диаметром 1,6 мм	235	140	4,0
	230	140	3,8
	240	135	4,1
Проволока диаметром 1,2 мм в нагартованном состоянии	245	145	1,4
	240	150	1,6
	240	150	2,0
Проволока диаметром 1,2 мм после отжига (T=350 °C, τ =5 часов)	130	105	12,1
	130	105	15,0
	130	100	12,2
Проволока диаметром 1,2 мм после отжига (T=400 °C, τ =5 часов)	125	65	18,2
	120	65	18,0
	120	65	17,9
Проволока диаметром 0,5 мм в нагартованном состоянии	260	240	1,4
	260	245	1,3
	265	240	1,1
Проволока диаметром 0,5 мм после отжига (T=500 °C, τ =4 часа)	165	-	16,3
	160	-	17,0
ТУ 1-809-1038-2018	Не менее 142,5	-	Не менее 8,0

В соответствии с разработанной технологией по результатам исследований были изготовлены опытные образцы горячепрессованных прутков на производственной площадке ООО «Завод современных материалов», расположенном в с. Устюг Красноярского края (см. Приложение А). Применяемое в процессе оборудование – СПП-400, получаемые полуфабрикаты были диаметром 9 мм из сплава 01417. После получения прутков на установке СПП-400, они подвергались волочению до диаметра 0,5 мм на базе предприятия ООО «Альянс 2008» (Приложение Б).

Таблица 7.6 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в зависимости от различных режимов отжига

Состояние и режимы отжига	Механические свойства			Удельное электро- сопротивление, Ом мм ² /м
	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	
Нагартованное	257	242	1,2	0,03149
	260	243	1,2	0,03157
Отожженное (Т=350 °С,τ=4 часа)	159	-	13,4	0,03139
	164		13,3	0,03136
Отожженное (Т=400 °С,τ=4 часа)	157	-	14,2	0,03129
	159		14,4	0,03137
Отожженное (Т=450 °С,τ=4 часа)	155	-	15,8	0,03132
	157		15,2	0,03143
Отожженное (Т=500 °С,τ=4 часа)	160	-	16,7	0,03141
	157		16,8	0,03132
ТУ 1-809-1038-2018	142,5	-	8,0	0,03200

Таким образом, проанализировав данные, можно заключить: они подтверждают первоначальные заключения. Проволока, изготовленная согласно предложенной технологии, полностью соответствует положениям ТУ 1-809-1038-2018. Это относится к ее механическим характеристикам, параметрам удельного электросопротивления и уровню термостойкости.

7.3. Выводы по главе

1. Разработаны защищенные 6 патентами РФ новые технические решения на конструкции устройств для совмещенной прокатки-прессования, бесслитковой прокатки и прессования, на основе которых спроектированы, изготовлены и опробованы инструмент, валковые и прессовые узлы установок СПП-200 и СПП-400, а также 1 сплав системы Al-PZM.

2. В ходе промышленных испытаний данной технологии были апробированы технологические параметры обработки металла, применимые к непрерывному прессованию и волочению, а также режимы промежуточного и завершающего отжигов. Цель – получение проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм.

3. Было установлено, что образцы проволоки, произведенные с применением разработанной технологии, демонстрируют совокупность механических и электрофизических характеристик, соответствующих установленным требованиям, после выполнения

заключительного отжига при температуре 500 °С и продолжительности процесса в течение 4 часов.

4. Определены рациональные режимы деформирования, температурные и скоростные характеристики для процесса непрерывного прессования, используемого на установке СПП-400 на основе проведенного компьютерного моделирования. Промышленные испытания осуществлены на ООО «Завод современных материалов» с получением опытных партий прутков, изготовленных из сплава 01417 с диаметром 9 мм. В качестве заготовки для производства использовалась непрерывнолитая заготовка, произведенная на ЭМК.

5. По предложенному режиму волочения произведены промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, и установлены режимы промежуточного и окончательного отжигов.

6. Выявлено, что произведенная по данной технологической схеме ЭМК-СПП-волочение проволока, имеющая диаметр 0,5 мм и изготовленная из сплава 01417, целиком отвечает параметрам, регламентированным техническими условиями ТУ-1-809-1038-2018.

7. Опытные партии проволоки сечением 0,5 мм, произведенные в рамках опытно-промышленного этапа, подверглись серии испытаний, направленных на оценку их механических, электротехнических характеристик и термостойкости. Испытания проводились на базах следующих организаций: ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск), а также в СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель, Республика Беларусь). Результаты тестирования подтвердили соответствие проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, изготовленной с применением двух исследуемых технологических подходов, требованиям ТУ 1-809-1038-2018 в части совокупности физико-механических и эксплуатационных показателей, наблюдаемых в отожженном состоянии (см. Приложения А-В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований сделаны выводы и получены результаты.

1. В рамках развития научных основ совмещенной прокатки-прессования длинномерных деформируемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов впервые разработана теоретическая база для исследований процессов деформации заготовки прямоугольного поперечного сечения при использовании одного приводного вала и заготовки круглого поперечного сечения при использовании двух приводных валков в закрытых ящичных калибрах, позволяющих снизить энергозатраты на деформацию металла при СПП в среднем на 30-50% по сравнению с использованием двух приводных валков, которые включают теоретический анализ геометрических и энергосиловых параметров процесса, его моделирование и аналитическую оценку температуры деформируемого металла и температуры валков на контакте при прохождении каждой зоны очага деформации без учета и с учетом охлаждения инструмента.

2. В результате решения вариационной задачи и численного моделирования выявлены основные закономерности формоизменения металла при прокатке-прессовании заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах и получены формулы для расчета оптимальной величины удаления матрицы от общей оси валков, показателей напряженного состояния и подводимой валками мощности при условии минимальных энергозатрат на осуществление процесса деформации.

3. Получены регрессионные зависимости реологических свойств для четырех исследуемых сплавов системы Al-PЗМ.

4. Созданы компьютерные модели процессов совмещенной прокатки-прессования, использование которых дало возможность получить новые научные данные, в том числе по параметрам термомодеформационной обработки при использовании заготовки круглого поперечного сечения для исследуемых сплавов, основными из которых являются следующие: температура обработки 480-550 °С; температура инструмента 100-200 °С; обжатие при прокатке не менее 50%; вытяжка при прессовании в диапазоне 6,5-15,3.

5. При использовании этих данных проведены экспериментальные исследования для опытных сплавов с оценкой технологических и энергосиловых параметров совмещенной обработки с целью получения деформированных и отожженных полуфабрикатов и проволоки.

6. Проведена оценка физико-механических свойства длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов на всех технологических переделах и установлено, что они соответствуют уровню пластических и прочностных свойств полуфабрикатов, полученных традиционными видами обработки (прессованием, прокаткой).

7. Создана методика реализации последовательности разработки технологических процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров, с применением которой проведены комплексные исследования этих процессов применительно к сплавам системы Al-PЗМ.

8. Разработана технология и произведены опытные серии электротехнической проволоки диаметром до 0,3 мм из сплавов Al-PЗМ с разным уровнем церия и лантана. Определено, что изготовленная по предложенной технологической схеме ЭМК-СПП-волочение проволока из сплава 01417, в отожженном состоянии, обладает комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик, соответствующих ТУ 1-809-1038-2018.

9. Разработана технология и произведены экспериментальные партии электротехнической проволоки диаметром до 0,3 мм из сплавов системы Al-PЗМ. В производстве применялась схема БПП-волочение, в сплавах варьировалось содержание церия и лантана. Установлено, что проволока из сплава 01417, изготовленная по данной технологии, после отжига обладает необходимым комплексом физико-механических характеристик и соответствует эксплуатационным требованиям ТУ 1-809-1038-2018.

10. Разработана технология и произведены экспериментальные партии сварочной проволоки диаметром 3 мм, из сплавов 01570 и 1580. Установлено, что предложенный технологический процесс производства сварочной проволоки, включающий в себя три этапа обработки (БПП, сортовую прокатку, волочение) и операции промежуточных отжигов, обеспечивает выпуск высококачественных длинномерных деформированных полуфабрикатов, полностью соответствующих требованиям актуальных стандартов, таких как ГОСТ 7871-2019.

11. Результаты исследований прошли промышленную апробацию на предприятиях металлургического и машиностроительного профиля (Приложение А-Е), а ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технологий совмещенной обработки только для изготовления проволоки из сплава 01417 составил 7215500 руб. в год (Приложение Ж).

12. Создан и запатентован ряд технических и технологических решений [255-259], применение которых позволяет повысить производительность процесса непрерывной прокатки-прессования и качество получаемых профилей, снизить его трудо- и энергоемкость, а также позволяет получать деформированные полуфабрикаты из заготовок круглого поперечного сечения малопластичных металлов и сплавов с высоким уровнем механических свойств.

13. Результаты работы внедрены в учебный процесс для подготовки магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» (программа 22.04.02.05 «Обработка металлов давлением») и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4. (05.16.05) «Обработка металлов давлением» (Приложение И).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические основы производства проволоки из сплавов алюминия с переходными металлами с применением совмещенных методов термомеханической обработки: монография / С. Б. Сидельников, Д. С. Ворошилов, В. М. Беспалов [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2025. – 208 с.
2. Федоров, М. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М. Федоров // Металлоснабжение и сбыт. – 2002. – № 6. – С. 86–91.
3. Министерство строительства, архитектуры и ЖКХ республики Татарстан: официальный сайт. – URL: [https://minstroy.tatarstan.ru/file/File/1\(85\).pdf?ysclid=lw5ut6rkdi899464063](https://minstroy.tatarstan.ru/file/File/1(85).pdf?ysclid=lw5ut6rkdi899464063) (дата обращения 14.05.2024).
4. Алюминиевая ассоциация «Объединение производителей, поставщиков и потребителей алюминия»: официальный сайт. – URL: http://www.aluminas.ru/aluminum/in_the_world/ (дата обращения: 12.02.2024).
5. Фридляндер, И. Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. Избранные труды / И. Н. Фридляндер. – Москва : Наука, 2013. – 291 с.
6. Добаткин, В. И. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин, В.М. Федоров. – М. : ВИЛС, 1995. – 341 с.
7. Захаров, В. В. Легирование алюминиевых сплавов скандием / В. В. Захаров, Ю. А. Филатов, И. А. Фисенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – №8. – С. 31–36.
8. Золотаревский, В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В. С. Золотаревский, Н. А. Белов. – Москва : МИСиС, 2005. – 375 с.
9. Белов, Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография. / Н. А. Белов. – Москва : МИСиС, 2010. – 511 с.
10. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.
11. Ерманок, М. З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. / М. З. Ерманок, В. И. Фейгин, Н. А. Сухоруков. – М. : Металлургия, 1977. – 264 с.
12. Щерба, В. Н. Технология прессования металлов / В. Н. Щерба, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1995. – 335 с.
13. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 319 с.
14. 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.

15. Зиновьев, А. В. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / А. В. Зиновьев, А. И. Колпашников, П. И. Полухин. – М. : Metallurgia, 1992. – 511 с.

16. Бережной, В. Л. Прессование с активным действием сил трения / В. Л. Бережной, В. Н. Щерба, А. И. Батулин. – М. : Metallurgia, 1988. – 295 с.

17. 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.

18. 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.

19. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография. / Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, С.Б. Сидельников, [и др.] ; Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. – 2009. – 255 с.

20. 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.

21. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов : [монография] / Ю. В. Горохов, В. Г. Шеркунов, Н. Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 224 с. – ISBN 978-5-7638-2768-2.

22. Шаталов, Р. Л. Совмещенные процессы литья и деформации металлов / Р. Л. Шаталов, Н. Ш. Босхамджиев, В. А. Николаев ; М. : Изд-во МГОУ, 2009. – 210 с.

23. 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.

24. 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.

25. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting / M. Tani, M. Zeze, T. Toh, K. Tsunenari // Nippon steel technical report. – 2013. – No. 104. – P. 62–68.

26. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Yu. Zuo, Ji. Cui, D. Mou [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – № 24. – P. 2408–2413.

27. 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.
28. 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.
29. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al–1Fe binary alloys / Z. Shi, K. Gao, Y. T. Shi, Y. Wang // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – No 632. – P. 62–71.
30. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al-Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl–KCl melts / M. Zhang, H. Wang, W. Han [et al.] // *Science China Chemistry*. – 2014. – № 57(11). – P. 1477–1482.
31. Mogucheva, A. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy // A. Mogucheva, D. Zybakin, R. Kaibyshev // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 706–709. – P. 361–366.
32. Belov, N. A. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires / N. A. Belov, A. N. Alabin, A. R. Teleuova // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 53, Iss. 9–10. – P. 455–459.
33. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys / Yu. Zhang, F. Wei, J. Mao, G. Niu // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 158. – 109963.
34. Study of rare earth element effect on microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Si cast alloy / W. Wan, J. Han, W. Li, J. Wang // *Rare Met*. – 2006. – Vol. 25(6) – P. 129–132.
35. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents / Ya. He, J. Liu, Sh. Qiu [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 701. – P. 134–142.
36. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy / W. Jiang, Z. Fan, Y. Dai, C. Li // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 597. – P. 237–244.
37. Huang, X. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy / X. Huang, H. Yan // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. – 2013. – Vol. 28. – P. 202–205.
38. Effect of cerium on mechanical performance and electrical conductivity of aluminum rod for electrical purpose / P. Li, Z. Wu, Y. Wang [et al.] // *Journal of Rare Earths*. – 2006. – Vol. 24(1). – P. 355–357.
39. Effects of La addition on mechanical properties and thermal-resistant properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA6201 / W. Yuan, Zh. Liang, Ch. Zhang, L. Wei // *Materials & Design*. – 2012. – Vol. 34. – P. 788–792.
40. Effect of trace elements La, Ti and homogenization on electrical properties of pure aluminum / W. Feng, M. Jian, L. Chunfang, L. HuiHua // *Rare Metal Materials and Engineering*. – 2018. – Vol.

47(1). – P. 3257–3263.

41. Effect of Ce on castability, mechanical properties and electric conductivity of commercial purity aluminum / Ch.-L. Lv, H. Liao, Ye Liu, Q. Wang // *China Foundry*. – 2015. – Vol. 12(4) – P. 277–284.

42. Cao, X. The effect of annealing and aging on the high temperature internal friction spectra of Al-Ce alloy / X. Cao, Sh. Wang, Yi. Wang // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – Vol. B 163. – P. 174–178.

43. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy / Q. Yang, F. Q. Bu, F. C. Meng [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. A 628. – P. 319–326.

44. Effects of La addition on the elevated temperature properties of the casting Al–Cu alloy / D. Yao, Y. Xia, F. Qiu, Q. Jiang // *Materials Science and Engineering*. – 2011. – Vol. A 528. – P. 1463–1466.

45. Effect of Ce addition on the microstructure and properties of Al-Cu-Mn-Mg-Fe lithium battery shell alloy / J. Du, D. Ding, W. Zhang [et al.] // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 142. – P. 252–260.

46. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al–7Si–0.35Mg) aluminum alloys / Y. C. Tsai, C. Y. Chou, S. L. Lee [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 487 (1-2). – P. 157–162.

47. Effects of La addition on the microstructure and tensile properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys / T. Lu, Y. Pan, J. Wu [et al.] // *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. – 2015. – Vol. 22(4). – P. 405–410.

48. Effect of Ce addition on castability, mechanical properties and electric conductivity of Al-0.3Si-0.2 Mg alloy / H. C. Liao, Y. Liu, C. L. Lu, Q. G. Wang // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2015. – Vol. 28(4). – P. 213–220.

49. Vijeesh, V. The effect of addition of Ce and Sr on the solidification path of Al–8Si–2Cu alloy / V. Vijeesh, K. N. Prabhu // *Transactions – Indian Institute of Metals*. – 2015. – Vol. 68 (6). – P. 1119–1123.

50. Gao, G. Z. Effect of rare earth on conductivity of the aluminum wire / G. Z. Gao, Y. W. He, J. Z. Chen // *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. – 1992. – Vol. 78.

51. Effect of the eutectic Al-(Ce, La) phase morphology on microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and heat resistance of Al-4.5(Ce, La) alloy after SPD and subsequent annealing / A.E. Medvedev, M.Y. Murashkin, N.A. Enikeev [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 796. – P. 321–330.

52. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5wt. % RE (RE=5.4wt.% Ce, 3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation / M. Y. Murashkin, I. Sabirov, A. E.

Medvedev [et al.] // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 90. – P. 433–442.

53. Valiev, R. Z. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity / R. Z. Valiev, M. Y. Murashkin, I. Sabirov // *Scripta Materialia*. – 2014. – Vol. 76. – P. 13–16.

54. Development and Research of New Aluminium Alloys with Transition and Rare-Earth Metals and Equipment for Production of Wire for Electrotechnical Applications by Methods of Combined Processing / I. Matveeva, N. Dovzhenko, S. Sidelnikov [et al.] // *Light Metals 2013. The Minerals, Metals & Materials Society 2013: Annual Meeting and Exhibition*. – San Antonio, TX, United states, 2013. – P. 443–447.

55. Mogucheva, A. A. Effect of annealing on the structure and properties of aluminium alloy Al-8%MM / A. A. Mogucheva, D. V. Zyabkin, R. O. Kaibyshev // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 53. – P. 9–10.

56. Обоснование технологии изготовления плоского проката из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc для аэрокосмической промышленности / В. В. Яшин, В. Ю. Арышенский, И. А. Латушкин, М. С. Тептерев // *Цветные металлы*. – 2018. – № 7. – С. 75–82.

57. Филатов, Ю. А. Промышленные сплавы на основе системы Al-Mg-Sc / Ю. А. Филатов // *Технология легких сплавов*. – 1996. – № 3. – С. 30–35.

58. 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.

59. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 1, Под общ. Ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – 992 с.

60. Патент № 2344187 Российская Федерация, МПК С22С 1/02 (2006.01), С22С 21/00 (2006.01). Алюминиевый сплав : № 2006146758/02 : заявл. 28.12.2006 : опубл. 20.01.2009 / Куприянов Н. С., Шанин Н. Д., Федоров В. Н. ; патентообладатели Куприянов Н. С., Шанин Н. Д., Федоров В. Н. – 7 с.

61. Патент № 2370560 Российская Федерация, МПК С22С 1/02 (2006.01), С22С 21/00 (2006.01). Способ получения алюминиевой лигатуры Al-Mg-Mn-Y для получения алюминиевых сплавов : № 2008108695/02 : заявл. 05.03.2008 : опубл. 20.10.2009 / Александровский С. В., Сизяков В. М., Айматов У. А., Уголков В. Л. [и др.] ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)". – 5 с.

62. Патент № 928823 СССР, МПК С22С 21/00 (1995.01). Сплав на основе алюминия : № 2969433/02 : заявл. 08.08.1980 : опубл. 20.02.1996 / Вахобов А. В., Ганиев И. Н. Каменский М. К., Лыскова Ю. Б. [и др.].
63. Патент № 2413023 Российская Федерация, МПК С22С 21/00 (2006.01). Сплав на основе алюминия : № 2009109132/02 : заявл. 13.03.2009 : опубл. 27.02.2011 / Матвеев Ю. А., Кортунов И. М. ; патентообладатели Матвеев Ю. А., Кортунов И. М., Федоров В. Н. [и др.]. – 5 с.
64. Патент № 96118739 Российская Федерация, МПК С22С 19/03 (1995.01), В23К 35/32 (1995.01). Сплав на основе никеля : № 96118739/02 : заявл. 20.09.1996 : опубл. 10.11.1998 / Ветер В. В., Самойлов М. И., Черкасов Е. В., Бабанов А. А.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Валок-Чугун", Ветер В.В.
65. Патент № 2044096 Российская Федерация, МПК С22С 21/00 (1995.01), С22С 1/05 (1995.01). Сплав на основе алюминия : № 5032844/02 : заявл. 18.03.1992 : опубл. 20.09.1995 / Шмаков Ю. В., Федоров В. М., Мартиросов Р. Г. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Всероссийский институт легких сплавов».
66. Патент № 1503327 Российская Федерация, МПК С22С 21/00 (1995.01). Сплав на основе алюминия : № 87 4321031/02 : заявл. 11.09.1987 : опубл. 10.01.1996 / Ганиев И. Н., Вахобов А. В., Забелин А. М. [и др.] ; заявитель Институт химии им. В.И. Никитина.
67. Патент на полезную модель № 130708 Российская Федерация, МПК G01N 3/22 (2006.01). Установка для испытания на скручивание : 2013110265/28 : заявл. : 07.03.2013 : опубл. : 27.07.2013 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Беляев С. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 2 с.
68. Механические свойства алюминиевых сплавов: [монография] / Н. А. Грищенко, С. Б. Сидельников, И. Ю. Губанов [и др.]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – 196 с.
69. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо, пер. с англ. под ред. Ф. И. Квасова, Г. Б. Строганова, И. Н. Фридляндера. – М. : Metallurgia, 1979. – 639 с.
70. Алюминий: свойства и физическое металловедение: справочник / под ред. Дж. Е. Хэтча. пер. с англ. под ред. Э. З. Непомнящей, И. Н. Фридляндера – М. : Metallurgia, 1989. – 424 с.
71. Klinger, J. M. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age / J. M. Klinger // The Extractive Industries and Society. – 2015. – Vol. 2. – P. 572–580.
72. Tukker, A. Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications / A. Tukker // Environmental Science and Technology. – 2014. – Vol. 48. – P. 9973–9974.

73. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies / E. Alonso, A. M. Sherman, T. J. Wallington [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2012. – Vol. 46 – P. 3406–3414.
74. Humphries M. Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf> (дата обращения: 24.05.2024).
75. Zhou, B. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies / B. Zhou, Zh. Li, C. Chen // *Minerals*. – 2017. – Vol. 7(203). doi:10.3390/min7110203.
76. U.S. Geological Survey. Minerals Year Book—Rare Earths. – URL: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2015-raree.pdf (дата обращения: 24.05.2024).
77. Su, W. Economic Analysis and Policy Research of Rare Earth Industry in China; China Financial & Economic Publishing House: Beijing, China, 2009; ISBN 9787509513361. (In Chinese)
78. Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe’s Rare Earth Ore Deposits. – URL: http://promine.gtk.fi/documents_news/promine_final_conference/8_50_PASPALIARIS_EURARE_project_promine.pdf (дата обращения: 24.02.2021).
79. Liu, H. Rare Earths: Shades of Grey. Can China Continue to Fuel Our Global Clean and Smart Future. – URL: <http://chinawaterrisk.org/wp-content/uploads/2016/07/CWR-Rare-Earths-Shades-Of-Grey-2016-ENG.pdf> (дата обращения: 24.05.2024).
80. Kanazawa, Y. Rare earth minerals and resources in the world / Y. Kanazawa, M. Kamitani // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 408–412(19). – P. 1339–1343.
81. Europe’s rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting / K. M. Goodenough, J. Schilling, E. Jonsson [et al.] // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – Vol. 72. – P. 838–856.
82. U.S. Geological Survey. Minerals Year Book—Rare Earths. – URL: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2014-raree.pdf (дата обращения: 24.05.2024).
83. The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States / Long K. R., Van Gosen B. S., Foley N. K., Cordier D. – URL: <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/> (дата обращения: 24.05.2024).
84. Проект русский кабель. – URL: <http://www.RusCable.ru> (дата обращения: 24.05.2024).
85. «Алюминиевая промышленность». / «Сайт про алюминий». – URL: http://www.aluminiumleader.com/serious_industry/ (дата обращения: 24.02.2021).
86. Российская Алюминиевая промышленность в XXI веке. Конференция Metal Bulletin Москва. – URL: <http://www.rusal.ru> (дата обращения: 24.02.2021).
87. Алюминиевая ассоциация. Официальный сайт. – URL: <https://www.aluminas.ru/> (дата

обращения: 24.05.2024).

88. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т 1 / под общ. ред. Н. П. Лякишева – М. : Машиностроение, 1996. – 992 с.
89. Czerwinski, F. On the Al-Al₁₁Ce₃ eutectic transformation in aluminum-cerium binary alloys / F. Czerwinski, B. S. Amirkhiz // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(20). – 4549.
90. Czerwinski, F. Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying / F. Czerwinski // *Materials Science and Technology*. – 2020 – Vol. 36(3) – P.255–263.
91. Беспалов, В. М. Исследование совмещенных процессов обработки сплавов системы Al-Zr для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Беспалов Вадим Михайлович ; ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2014. – 180 с.
92. Gorbunov, Yu. A. The Role and Prospects of Rare Earth Metals in the Development of Physical-Mechanical Characteristics and Applications of Deformable Aluminum Alloys / Yu. A. Gorbunov // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2015. – № 8(5). – P. 636–645.
93. Production of aluminum alloy onboard wire with a high content of rare-earth metals produced using electromagnetic crystallization / V. N. Timofeev, G. P. Usynina, V. N. Lebedev, V. Yu. Konkevich // *Tsvetnye Metally*. – 2022. – № 1. С. 71–78.
94. ТУ 1-809-1038-2018. Проволока электротехническая из алюминиевого сплава 01417. Технические условия : дата введения 2018. – Москва : ОАО «ВИЛС», 2018. – 11 с.
95. Патент № 2745520 Российская Федерация, МПК В22D 11/049 (2006.01), СПК В22D 11/049 (2020.08). Способ непрерывного литья слитка и плавно-литейная установка для его осуществления : № 2020111983 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 25.03.2021 / Тимофеев В. Н., Первухин М. В., Сергеев Н. В. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственный центр магнитной гидродинамики".
96. Simlandi, S. Studies on Transport Phenomena during Continuous Casting of an Al-Alloy in Presence of Electromagnetic Stirring / S. Simlandi, N. Barman, H. Chattopadhyay // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2013. – Vol. 66(2). – P. 141–146.
97. Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting / M. Tani, M. Zeze, T. Toh, K. Tsunenari // *Nippon steel technical report*. – 2013. – Vol. 104. – P. 56–61.
98. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminium alloy / Y. Zuo, J. Cui, D. Mou [et al.] // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2014. – Vol. 24. – P. 408–2413.

99. Distinctive features of the structure and characteristics of long-length light gauge ingots from aluminium alloys, cast into electromagnetic crystallizer / A. A. Avdulov, G. P. Usynina, N. V. Sergeev, I. S. Gudkov // *Tsvetnye Metally*. – 2017. – Vol. 7. – P. 73–77.
100. Timofeev, V. Theoretical design fundamentals for MHD stirrers for molten metals / V. Timofeev, M. Khatsayuk // *Magnetohydrodynamics*. – 2016. – Vol. 52(4). – P. 495–506.
101. Timofeev, V. Analysis of transverse edge in MHD-stirrer of liquid metals / V. Timofeev, M. Khatsayuk, S. Timofeev // *Magnetohydrodynamics*. – 2017. – Vol. 53(3). – P. 521–536.
102. Mathematical modeling of MHD processes in the casting of aluminum alloys in electromagnetic mold / M. V. Pervukhin, V. N. Timofeev, G. P. Usynina [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 643. – 012063.
103. Improvement of continuous forming the "Conform" method / A.R. Fastikovskiy, E.V. Selivanova, A.A. Fedorov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411(1). – 012082.
104. Simulation of the process of extruding a bar billet into a cylindrical extrusion die with active friction / S. N. Larin, V. A. Korotkov, A. N. Isaeva, A. A. Pasyukov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1753(1). – 012023.
105. Jensrud, O. High strength aluminium alloys extrusions - A review of the thermo-mechanical-process in high performance profile manufacturing / O. Jensrud // *Key Engineering Materials*. – 2012. – Vol. 491. – P. 11–18.
106. Raab, G. I. Development and Research of Method CCRE-SPD for Obtaining Aluminum Semi-Finished Products of High Quality / G. I. Raab, E. I. Fakhretdinova, R. Z. Valiev // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2014. – Vol. 3(7). – P. 309–315.
107. Raab, G. I. The study of the strained state of the long-length aluminum billet obtained by a new method - multi-ECAP-conform / G. I. Raab, E. I. Fakhretdinova, R. Z. Valiev // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 870. – P. 603–607.
108. Simulation and experimental research on continuous extrusion flow characteristics of rod billet / L. - B. Wang, B. Li, Y. Zhao, X. - B. Yun // *Suxing Gongcheng Xuebao/Journal of Plasticity Engineering*. – 2021. – Vol. 28(1). – P. 52–59.
109. Skuratov, A. P. Numerical analysis of the non-stationary thermal state of the tool in the combined casting and extrusion of aluminum alloy / A. P. Skuratov, N. P. Popiyakova, A. S. Potapenko [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 117. – P. 295–303.
110. Initiation of noncontact deformation zones in porous bar rolling-extrusion process / Yu. N. Loginov, A. A. Ershov, N. N. Zagirov, E. V. Ivanov // *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. – 2017. – Vol. 3. – P. 38–41.

111. Computational-and-experimental evaluation of the implementation condition of combined rolling–pressing using the power balance method / N. N. Zagirov, N. N. Dovzhenko, S. B. Sidel'nikov, V. M. Bespalov // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2016. – Vol. 57(2). – P. 95–100.
112. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов : [коллективная монография] / С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, Н. Н. Довженко [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 180 с. – ISBN 978-5-7638-3280-8.
113. Application and Research Twin Roll Casting-Extruding Process for Production Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloys / S. B. Sidelnikov, R. I. Galiev, A. S. Bersenev, D. S. Voroshilov // *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 918. – P. 13–20.
114. Ji, C. A review of the twin-roll casting process for complex section products / C. Ji, H. Huang // *ISIJ International*. – 2020. – Vol. 60(10). – P. 2165–2175.
115. Якивбюк, О. В. Разработка технологии получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, и исследование их свойств : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Якивбюк Ольга Викторовна ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2018. – 148 с.
116. Zhemchuzhnikova, D. Effect of rolling on mechanical properties and fatigue behavior of an Al-Mg-Sc-Zr alloy / D. Zhemchuzhnikova, R. Kaibyshev // *Materials Science Forum* – 2014. – Vols. 794–796. – P. 331–336.
117. Zhemchuzhnikova, D. Effect of Grain Size on Cryogenic Mechanical Properties of an Al-Mg-Sc Alloy / D. Zhemchuzhnikova, R. Kaibyshev // *Advanced Materials Research* – 2014. – Vol. 922. – P. 862–867.
118. Патент № 2082808 Российская Федерация, МПК C22C 21/06 (1995.01). Сплав на основе алюминия для сварки плавлением : № 95112174/02 : заявл. 13.07.1995 : опубл. 27.06.1997 / Золоторевский Ю. С., Макаров А. Г., Махмудова М. А. [и др.] ; патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Всероссийский институт легких сплавов», Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».
119. Патент № 2171308 Российская Федерация, МПК C22C 21/00 (2000.01), C22C 21/06 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него : № 2000104293/02 : заявл. 24.02.2000 : опубл. 27.07.2001 / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б. ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".
120. Патент № 2180929 Российская Федерация, МПК C22C 21/12 (2000.01). Сплав на основе

алюминия и изделие, выполненное из него : № 2000112829/02 : заявл. 24.05.2000 : опубл. 27.03.2002 / Каблов Е. Н., Петраков А. Ф., Лукин В. И. [и др.] ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

121. Патент № 2180930 Российская Федерация, МПК С22С 21/12 (2000.01), С22С 21/16 (2000.01), С22F 1/057 (2000.01). Сплав на основе алюминия и способ изготовления полуфабрикатов из этого сплава : № 2000120272/02 : заявл. 01.08.2000 : опубл. 27.03.2002 / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Сандлер В. С. [и др.] ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

122. Патент № 2184165 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава : № 2000123612/02 : заявл. 14.09.2000 : опубл. 27.06.2002 / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Сетюков О. А, Ручьева Н. В. ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

123. Патент № 2184167 Российская Федерация, МПК С22С 21/16 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава : № 2000123608/02 : заявл. 14.09.2000 : опубл. 29.06.2002 / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Сандлер В. С., Боровских С. Н. ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

124. Патент № 2208655 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2000.01), С22С 21/12 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него : № 2001127128/02 : заявл. 08.10.2001 : опубл. 20.07.2003 / Фридляндер И. Н., Каськов В. С., Горбунов П. З. ; патентообладатель Государственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

125. Патент № 2212463 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2000.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2001118883/02 : заявл. 06.07.2001 : опубл. 20.09.2003 / Андреев Г. Н., Бакулин А. В, Барахтина Н. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей".

126. Патент № 2215055 Российская Федерация, МПК С22С 21/08 (2000.01), С22С 21/18 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него : № 2001133680/02 : заявл. 17.12.2001 : опубл. 27.10.2003 / Фридляндер И. Н., Колобнев Н. И., Самохвалов С. В. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

127. Патент № 2215805 Российская Федерация, МПК С22С 21/04 (2000.01), С22С 21/08

(2000.01), С22С 21/10 (2000.01), С22С 21/14 (2000.01), С22С 21/18 (2000.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него : № 2001133677/02 : заявл. 17.12.2001 : опубл. 10.11.2003 / Фридляндер И. Н., Хохлатова Л. Б., Колобнев Н. И., Колесенкова О.К. ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов".

128. Патент № 2218437 Российская Федерация, МПК С22С 21/00 (2000.01), С22С 21/06 (2000.01), С22С 21/10 (2000.01), С22С 21/12 (2000.01), С22С 21/18 (2000.01), С22С 21/16 (2000.01). Сплав системы алюминий-марганец и изделие из этого сплава : № 2002116884/02 : заявл. 26.06.2002 : опубл. 10.12.2003 ; патентообладатель Региональный общественный фонд содействия защите интеллектуальной собственности.

129. Патент № 2233902 Российская Федерация, МПК С22С 21/10 (2000.01). Высокопрочный сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава : № 2002134952/02 : заявл. 25.12.2002 : опубл. 10.08.2004 / Ткаченко Е. А., Фридляндер И. Н., Латушкина Л. В. ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов.

130. Патент № 268319 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2000.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2004115347/02 : заявл. 20.05.2004 : опубл. 20.01.2006 / Андреев Г. Н., Барахтина Н. Н., Горынин И. В. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" (ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей").

131. Патент № 2387725 Российская Федерация, МПК С22С 21/18 (2006.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия и изделие из него : № 2008136600/02 : заявл. 09.07.2008 : опубл. 27.04.2010 / Овсянников Б. В., Захаров В. В., Филатов Ю. А., Чертовиков В. М. ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Каменск-Уральский металлургический завод"

132. Патент № 2393073 Российская Федерация, МПК В23К 35/28 (2006.01), С22С 21/06 (2006.01). Состав сварочной проволоки на основе алюминия : № 2009109736/02 : заявл. 17.03.2009 : опубл. 27.06.2010 / Павлова В. И., Орыщенко А. С., Осокин Е. П. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" (ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей").

133. Патент № 2406773 Российская Федерация, МПК С22С 21/10 (2006.01). Деформируемый алюминиевый сплав системы алюминий-цинк-магний-скандий и способ его получения : № 2007132871/02 : заявл. 01.02.2006 : опубл. 20.12.2010 / Лэнган Т. ; патентообладатель Лэнган

Тимоти.

134. Патент № 2410458 Российская Федерация, МПК С22С21/08 (2006.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2009138429/02 : заявл. 20.10.2009 : опубл. 27.01.2011 / Филатов Ю. А., Захаров В. В., Панасюгина Л. И.; патентообладатель Открытое акционерное общество "Всероссийский институт легких сплавов" (ОАО "ВИЛС").

135. Патент № 2416657 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2010115579/02 : заявл. 20.04.2010 : опубл. 20.04.2011 / Пименов Ю. П, Филатов Ю. А., Конкевич В. Ю. [и др.] ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Всероссийский институт легких сплавов" (ОАО "ВИЛС").

136. Патент № 2416658 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2010115581/02 : заявл. 20.04.2010 : опубл. 20.04.2011 / Филатов Ю. А., Аксенова Е. А., Панасюгина Л. И. ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Всероссийский институт легких сплавов" (ОАО "ВИЛС").

137. Патент № 2431692 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава : № 2010125006/02 : заявл. 18.06.2010 : опубл. 20.10.2011 / Дриц А. М., Орыщенко А. С., Григорян В.А. [и др.] ; патентообладатели Закрытое акционерное общество "Алкоа Металлург Рус", Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей", Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт стали".

138. Патент № 2576286 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Сплав на основе алюминии : № 2014119988/02 : заявл. 19.05.2014 : опубл. 27.02.2016 / Каблов Е. Н., Антипов В. В., Вахромов Р. О. [и др.] ; патентообладатели Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов" (ФГУП "ВИАМ").

139. Патент № 2585602 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Поддающийся сварке высокопрочный Al-Mg сплав : № 2011147090/02 : заявл. 14.08.2006 : опубл. 27.05.2016 / Телиоуй Н., Мейерс С. Д., Норманн Э. [и др.] ; патентообладатель АЛЕРИС АЛЮМИНУМ КОБЛЕНЦ ГМБХ.

140. Патент № 2599590 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01). Конструкционный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 2015119352/02 : заявл. 22.05.2015 : опубл. 10.10.2016 / Филатов Ю. А., Захаров В. В., Панасюгина Л. И. [и др.] ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Всероссийский институт легких сплавов" (ОАО "ВИЛС"), Открытое акционерное общество "Композит" (ОАО "Композит").

141. Патент № 95103826 Российская Федерация, МПК C22C 21/06 (1995.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 95103826/02 : заявл. 17.03.1995 : опубл. 20.01.1997 / Захаров В. В., Филатов Ю. А., Конкевич В. Ю. [и др.] ; заявитель Захаров В. В., Филатов Ю. А., Конкевич В. Ю. [и др.].
142. Патент № 95112171 Российская Федерация, МПК C22C 21/06 (1995.01). Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия : № 95112171/02 : заявл. 13.07.1995 : опубл. 27.06.1997 / Елагин В. И., Захаров В. В., Филатов Ю. А. [и др.] ; заявители Акционерное общество открытого типа "Всероссийский институт легких сплавов", Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей".
143. Патент № 3619181 США, МПК51 C22C 21/00. Aluminum scandium alloy : опубл. 09.11.1971 / Willey L. A. ; заявитель и патентообладатель Aluminum Co Of America.
144. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – К: «КОМИНТЕХ», 2005. – 365 с.
145. Филатов, Ю. А. Развитие представлений о легировании скандием сплавов Al-Mg / Ю. А. Филатов // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 19–22.
146. Структура и свойства сплавов Al-Sc и Al-Mg-Sc / М. Е. Дриц, Л. С. Торопова, Ю. Г. Быков [и др.] // В кн.: Металлургия и металловедение цветных сплавов. – М. : Наука. – 1982. – С. 213–223.
147. Металловедческие принципы легирования алюминиевых сплавов скандием / В. В. Захаров, В. И. Елагин, Т. Д. Ростова, Ю. А. Филатов // Технология легких сплавов. – 2010. – № 1. – С. 67–73.
148. Захаров, В. В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов / В. В. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 7. – С. 7–15.
149. Filatov, Yu. A. New Al-Mg-Sc alloys / Yu. A. Filatov, V. I. Yelagin, V. V. Zakharov // Materials Science and Engineering A. – 2000. – Vol. 280. – № 1. – P. 97–101.
150. О характере взаимодействия скандия с алюминием в богатой алюминием части системы. / М. Е. Дриц, Э. С. Каданер, Т. В. Добаткина, Н. И. Туркина // Известия Академии наук СССР – 1973. – № 4. – С. 213–217.
151. Редкие металлы в цветных сплавах / М. Е. Дриц, Н. И. Туркина, Э. С. Каданер, Т. В. Добаткина. – М. : Наука, 1975. – С. 160–166.
152. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава AlMg4 / С. Ж. Иброхимов, Б. Б. Эшов, И. Н. Ганиев, Н. Ф. Иброхимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Том 16 – №4. – С. 256–260.
153. Marquis, E. A. Nanoscale structural evolution of Al₃Sc precipitates in Al (Sc) alloys / E. A. Marquis, E. A. Seidman // Acta Materialia. – 2001. – Vol. 49. – P. 1909–1919.

154. Norman, A. F. The solidification behaviour of dilute aluminium–scandium alloys / A. F. Norman, P. B. Prangnell, R. S. McEwen // *Acta Materialia*. – 1998. – Vol. 46. – P. 5715–5732.
155. Каблов, Е. Н. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и высоких технологий будущего / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, А. В. Вершков // *Электронный научный журнал «Труды ВИАМ»*. – 2013. – № 2.
156. Malopheyev, S. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Sc-Zr alloy / S. Malopheyev, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 698. – P. 957–966.
157. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Cr alloys / W. Kang, H. Y. Li, S. X. Zhao [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 704. – P. 683–692.
158. De Luca, A. Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al-Sc-Er-Zr-Si alloy with a high Zr/Sc ratio / A. De Luca, D. C. Dunand, D. N. Seidman // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 119. – P. 35–42.
159. Influence of grain size on the flow properties of an Al-Mg-Sc alloy over seven orders of magnitude of strain rate / P. H. R. Pereira, Y. Ch. Wang, Y. Huang, T. G. Langdon // *Materials Science & Engineering*. – 2017. – Vol. A685. – P. 367–376.
160. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy / S. Mondol, T. Alamb, R. Banerjee [et al.] // *Materials Science & Engineering*. – 2017. – Vol. A687. – P. 221–231.
161. High strain rate superplasticity in an Al–Mg–Sc–Zr alloy processed via simple rolling / M. Li, Q. Pan, Y. Shi [et al.] // *Materials Science & Engineering*. – 2017. – Vol. A687. – P. 298–305.
162. Перспективные технологии легких и специальных сплавов / Б. И. Бондарев, В. М. Чуйко, А. Н. Кузнецов [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 432 с.
163. Патент № 2735846 Российская Федерация, МПК С22С 21/06 (2006.01), СПК С22С 21/06 (2020.08), С22С 21/08 (2020.08). Сплав на основе алюминия : № 2020115035 : заявл. 27.12.2019 : опубл. 09.11.2020 / Манн В. Х., Алабин А. Н., Хромов А. П. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".
164. Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава Р-1580, экономно легированного скандием, при горячей деформации / Н. Н. Довженко, С. В. Рушиц, И. Н. Довженко, П. О. Юрьев // *Цветные металлы*. – 2019. – № 9. – С. 80–86.
165. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium / N. N. Dovzhenko, S. V. Rushchits, I. N. Dovzhenko, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 115(7-8). – P.

2571–2579.

166. Бадурдинов, С. Т. Потенциометрическое исследование сплава АК12, легированного скандием, в среде NaCl / С. Т. Бадурдинов, А. Э. Бердиев, И. Н. Ганиев // Доклады академии наук республики Таджикистан. – 2011. – Том 54. – № 6. – С.485–488.

167. Анодное поведение сплава АК1М2, легированного скандием / Х. Х. Ниязов, А. Э. Бердиев, И. Н. Ганиев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Том 14. – № 4. – С.112–115.

168. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.15Zr alloy / С. Shi, L. Zhang, G.Wu [et al.] // Materials Science & Engineering. – 2017. – Vol A680. – P. 232–238.

169. High strain rate superplasticity in an Al-Mg-Sc-Zr alloy processed via simple rolling / M. Li, Q. Pan, Y. Shi [et al.] // Materials Science & Engineering. – 2017. – Vol. A687.– P.298–305.

170. Al₃(Sc, Zr) – based precipitates in AlMg alloy: Effect of severe deformation / Yu. Buranova, V. Kulitskiy, M. Peterlechner [et al.] // Acta Materialia. – 2017. – 124. – P. 210–224.

171. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы. Свойства, состав, технология, применение: Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – К. : «КОМИНТЕХ», 2005. – 365 с.

172. Нарзиев, Б. Ш. Потенциометрическое исследование низколегированных электротехнических сплавов / Б. Ш. Нарзиев, Р. О. Баротов, И. Н. Ганиев // Доклады академии наук республики Таджикистан. – 2008. – т. 51. – № 10. – С. 759–764.

173. Термодинамика и аморфизация сплавов NI-F, CU-ZR и AL-LA. – URL: http://bankrabort.com/work/work_69040.html (дата обращения: 07.06.2021).

174. Шевченко, В. Г. Свойства высокодисперсных сплавов Al-PЗМ, полученных методом плазменной переконденсации / В. Г. Шевченко // Перспективные материалы. – 2010. – № 1. – С. 68.

175. Прутки и проволока. – URL: <http://www.Metagran.ru> (дата обращения: 07.06.2021).

176. Алюминий и его сплавы. – URL: <http://www.proelectro.ru/lib/kabel/48.html> (дата обращения: 07.06.2021).

177. Патент № 2639203 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Способ совмещенного непрерывного литья, прокатки и прессования металлической заготовки и устройство для его реализации : № 2016121617 : заявл. 31.05.2016 : опубл. 20.12.2017 / Манн В. Х., Фролов В. Ф., Сальников А. В. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".

178. Патент № 2334574 Российская Федерация, МПК В21С 25/00 (2006.01). Установка для непрерывной прокатки и прессования металлов : № 2006143978/02 : заявл. 11.12.2006 : опубл.

27.09.2008 / Беляев С. В., Довженко Н. Н., Сидельников С. Б. [и др.] ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет цветных металлов и золота".

179. Патент № 1785459 Российская Федерация, МПК В21С 25/00. Устройство для непрерывного прессования металла / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Загиров Н. Н. ; опубл. 30.12.1992.

180. Патент № 2100113 Российская Федерация, МПК В21С 23/08 (1995.01). Устройство для непрерывного прессования труб : № 96100289/02 : заявл. 05.01.1996 : опубл. 27.12.1997 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Ешкин А. В., Гилевич Ф. С. ; патентообладатель Красноярская государственная академия цветных металлов и золота.

181. Патент № 2100136 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (1995.01), В21С 23/00 (1995.01). Установка для непрерывного литья и прессования : № 95121390/02 : заявл. 19.12.1995 : опубл. 27.12.1997 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Ешкин А. В. [и др.] ; патентообладатель Сидельников Сергей Борисович.

182. Патент № 2200644 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2000.01), В21С 23/08 (2000.01). Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей : № 2001110206/02 : заявл. 13.04.2001 : опубл. 20.03.2003 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Гришечкин А. И., Сидельникова Е. С. ; патентообладатель Красноярская государственная академия цветных металлов и золота.

183. Патент № 2335376 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования профилей : № 2006142973/02 : заявл. 04.12.2006 : опубл. 10.10.2008 / Беляев С. В., Довженко Н. Н., Сидельников С. Б. [и др.] ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет цветных металлов и золота".

184. Патент на полезную модель № 68387 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/08 (2006.01). Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей : № 2006142998/22 : заявл. 04.12.2006 : опубл. 27.11.2007 / Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

185. Патент на полезную модель № 67492 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла : № 2006146472/22 : заявл. 25.12.2006 : опубл. 27.10.2007 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Тимофеев В. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

186. Патент на полезную модель № 70828 Российская Федерация, МПК В21С 25/00 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей : № 2007139481/22 : заявл. 24.10.2007 : опубл. 20.02.2008 / Беляев С. В., Довженко Н. Н., Сидельников С. Б. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".
187. Патент на полезную модель № 102550 Российская Федерация, МПК ВВ22D 11/06 (2006.01), В21В 1/46 (2006.01). Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла : № 2010142016/02 : заявл. 13.10.2010 : опубл. 10.03.2011 / Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко И. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".
188. Патент на полезную модель № 73245 Российская Федерация, МПК В21С 3/00 (2006.01), В22D 11/00 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов : № 2007148951/22 : заявл. 25.12.2007 : опубл. 20.05.2008 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Лопатина Е. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".
189. Патент № 2486027 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования катанки : № 2012100886/02 : заявл. 11.01.2012 : опубл. 27.06.2013 / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".
190. Патент № 2487777 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования катанки : № 2012100889/02 : заявл. 11.01.2012 : опубл. 20.07.2013 / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".
191. Патент на полезную модель № 128529 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01). Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов : № 2012147083/02 : заявл. 06.11.2012 : опубл. 27.05.2013 / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Беляев С. В. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".
192. Патент № 2519078 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01). Способ совмещенного литья, прокатки и прессования и устройство для его реализации : №

2012143646/02 : заявл. 11.10.2012 : опубл. 10.06.2014 / Рааб Г. И., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Гималтдинова Э. И. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "НаноMeT".

193. Патент на полезную модель № 145114 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения цветных металлов и сплавов : № 2014118259/02 : заявл. 06.05.2014 : опубл. 10.09.2014 / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В. [и др.] ; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Ресурс".

194. Патент № 2556264 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01). Установка для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов : № 2014104642/02 : заявл. 10.02.2014 : опубл. 10.07.2015 / Белокопытов В. И., Сидельников С. Б., Губанов И. Ю., Сидельников А. С. ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

195. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273. «PROVOL» : № 2015612273 : заявл. 19.12.2014 : опубл. 20.03.2015 / Сидельников С. Б., Беляев С. В., Лебедева О. С. [и др.] ; правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

196. Шмаков, Ю. В. Исследование закономерностей и разработка научных основ технологии производства полуфабрикатов из гранулируемых алюминиевых сплавов для изделий ответственного назначения: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шмаков Ю. В. – Москва, 1997.

197. Патент на полезную модель № 48836 Российская Федерация, МПК В22D 11/04 (2000.01). Устройство для непрерывного литья слитков в электромагнитном поле : № 2005116058/22 : заявл. 26.05.2005 : опубл. 10.11.2005 / Первухин М. В., Тимофеев В. Н., Христинич Р. М. [и др.] ; патентообладатель Красноярский государственный технический университет (КГТУ).

198. Salnikov, A. V. Production of rolled wire from hard aluminum alloys using combined rolling and extrusion method / A. V. Salnikov, A. V. Strellov, M. M. Motkov // Non-ferrous Metals Miner. – 2017. – P. 674–677.

199. Рааб, Г. И. Разработка и исследование метода СЛиПП-ИПД для получения алюминиевых полуфабрикатов высокого качества / Г. И. Рааб, Э. И. Фахретдинова, Р. З. Валиев // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2014. – Т. 7. – № 3. – С. 309–315.

200. Сидельников, С. Б. Разработка устройств и технологии для получения проволоки из

труднодеформируемых алюминиевых сплавов с применением методов совмещенной обработки / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Р. Е. Соколов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2009. – № 4. – С. 30–34.

201. Довженко, Н. Н. Моделирование тепловых условий процесса совмещенной прокатки-прессования / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, С. В. Беляев [и др.] // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: Сборник материалов Международной НПК. – Красноярск, 2006. – С. 227–228.

202. Галиев, Р. И. Разработка и исследование процесса совмещенной прокатки-прессования с целью повышения эффективности производства длинномерных пресс-изделий из алюминиевых сплавов : специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением. Технические науки» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галиев Роман Илсурович ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2004. – 20 с.

203. Катарева, А. А. Разработка совмещенного процесса непрерывного литья и прокатки-прессования для производства длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов : специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением. Технические науки» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Катарева Алла Александровна ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2004. – 20 с.

204. Лопатина, Е. С. Изучение механизма модифицирования алюминиевых сплавов и закономерностей структурообразования при получении лигатурных материалов методом высокоскоростной кристаллизации-деформации : специальность 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лопатина Екатерина Сергеевна ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет цветных металлов и золота». – Красноярск, 2005. – 20 с.

205. Довженко, И. Н. Разработка моделей функционирования агрегата совмещенной прокатки-прессования с целью повышения эффективности производства длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов : специальность 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением. Технические науки» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Довженко Иван Николаевич ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2006. – 20 с.

206. Беляев, С. В. Повышение эффективности производства пресс-изделий из алюминиевых сплавов на основе управления тепловыми условиями процесса прессования : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : автореферат диссертации на соискание ученой

степени доктора технических наук / Беляев Сергей Владимирович ; ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2009. – 35 с.

207. Соколов, Р. Е. Разработка устройств технологии для получения проволоки из силуминов с применением методов совмещенной обработки : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Соколов Руслан Евгеньевич ; ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2010. – 165 с.

208. Выбор оптимальных зазоров в калибре при совмещенной прокатке-прессовании / С. В. Беляев, С. Б. Сидельников, И. Н. Довженко, ..., Д. С. Ворошилов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 411–421.

209. Исследование реологических свойств электротехнической катанки из сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами, полученной методами непрерывного литья и обработки давлением / С. Б. Сидельников, А. П. Самчук, А. С. Сидельников, Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 89–95.

210. Voroshilov, D. S. Developing Technology of Obtaining wire from High Alloyed Alloys Al-REM System Using the Methods of Combined Treatment / Voroshilov D. S., Sidelnikov S. B., Rudnitsky E. A. // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 61–65.

211. Simulation of combined rolling-extrusion process for round section billets in closed box caliber / D. S. Voroshilov, S. B. Sidelnikov, I. L. Konstantinov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – № 127. – P. 2893–2910.

212. 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 [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – № 861. – P. 540–546.

213. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing / S. B. Sidelnikov, D. S. Voroshilov, M. M. Motkov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 114. – P. 2633–2649.

214. Voroshilov, D. S. Characterization Properties and Structure for Wires from Al-Ce-La System Alloy Via the Method of Combined Rolling-Extrusion with a Single-Driven Roll. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. – 2025. – Т. 23. № 1. – С. 44–53.

215. Мотков, М. М. 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 / Мотков Михаил Михайлович ; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2021. – 126 с.
216. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2001. – 836 с.
217. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное. М. : Теплотехник, 2010. – 490 с.
218. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – М. : Metallurgia, 1987. – 368 с.
219. Смирнов, В. К. Методика решения вариационного уравнения численным методом при исследовании прокатки в калибрах / В. К. Смирнов, И. Я. Тарновский, В. А. Шилов // Теория и технология прокатки. – 1970. – Вып. 67. – С. 92–98.
220. Агеев, Л. М. Теоретическое сравнение расхода энергии и коэффициента полезного действия процессов прокатки-волочения и обычной прокатки / Л. М. Агеев, Л. М. Сухарев // Обработка металлов давлением: сб. трудов Вузов Российской Федерации. Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова. – 1974. – Вып. 2. – С. 45–52.
221. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М. : Машиностроение, 1979. – 215 с.
222. Исследование структуры металла и оценка опытных образцов из сплава системы Al-P3M, полученных совмещенными методами литья и обработки давлением / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довжено, Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 2. – С. 23–28.
223. 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. Довжено, Л. П. Трифоненков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4. – С. 43–45.
224. Прогнозирование свойств металла при совмещенной обработке сплавов системы Al-P3M на основе поэтапной оценки их механических характеристик / С. Б. Сидельников, Н. Н. Загиров, Е. С. Лопатина, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 32–37.

225. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al-PЗМ с применением совмещенной обработки / С. Б. Сидельников, Д. С. Ворошилов, М. В. Первухин, М. М. Мотков // Цветные металлы. – 2019. – № 9. – С. 63–68.
226. 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 [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2019. – № 8(2S2). – P. 300–304.
227. Investigation of the structure and properties of deformed semi-finished products from alloys of the Al-REM system made by the method of ingotless rolling-extruding / V.M. Bespalov, S.B. Sidelnikov, V.A. Bergardt, D. S. Voroshilov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – № 837. – P. 9–15.
228. 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 [et al.] // Materials Science Forum. – 2020. – № 992. – P. 498–503.
229. Experimental and Analytical Assessment of the Power Parameters of the Combined Rolling-Extruding Process Using a Round Billet from Alloy 01417 Obtained Using an Electromagnetic Mold / S. Sidelnikov, D. Voroshilov, M. Motkov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2021. – № 887. – P. 300-305.
230. Influence of the parameters of combined processing and drawing on the structure and properties of conductor semi-finished products from aluminum alloys with additives of rare earth and transition metals / V. M. Bespalov, D. S. Voroshilov, V. A. Bergardt [et al.] // Metals and Materials International. – 2024. – № 30(3). – P. 773–799.
231. Исследование структуры и оценка свойств литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ с различным содержанием никеля / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, Т. Н. Дроздова, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 1. – С. 45–48.
232. Изучение режимов получения проволоки из сплава Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки и последующего волочения / Д. С. Ворошилов, О. С. Лебедева, Д. Д. Беспалова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 62–77.
233. Development of Combined Rolling-Extruding Modes for Producing Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloy with Low Cerium Content / D. Voroshilov, S. Sidelnikov, V. Bespalov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2021. – № 887. – P. 262–268.

234. Combined rolling-extrusion of rods from alloy Al-0.5REM using billet after electromagnetic mold / D. Voroshilov, S. Sidelnikov, V. Bespalov [et al.] // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2023. – № 58(6). – P. 1133–1138.
235. Combined rolling-extrusion of various billets from the Al–Ce–La alloy for electrical wire production / D. S. Voroshilov, S. B. Sidelnikov, V. M. Bespalov [et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – № 131. – P. 4699–4725.
236. Electrical wire production from Al - Ce - La alloy rods after electromagnetic mold and combined rolling - extrusion / D. Voroshilov, S. Sidelnikov, D. Darmazhapov [et al.] // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2025. – № 60(2). – P. 237–336.
237. Разработка и исследование процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из алюминиевого сплава 6082 / С. Б. Сидельников, А. С. Берсенев, Ю. А. Горбунов, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 47–57.
238. Совмещенный процесс литья и прокатки-прессования и свойства длинномерных полуфабрикатов из Al-Mg-сплавов, легированных скандием / В. Н. Баранов, С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2019. – № 1. – С. 26–29.
239. Investigation of mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from the test alloys of Al-Mg system, economically alloyed with scandium / V. N. Baranov, S. B. Sidelnikov, V. F. Frolov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – № 411. – 012015.
240. Computer simulation, analysis of force and temperature-speed parameters of the process of combined machining of Al-Mg-Sc alloys / S. B. Sidelnikov, O. V. Yakiviyuk, V. N. Baranov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – № 544. – 012018.
241. Study of the Manufacturability of Production and Properties of Welding Wire from Alloy 1580 / S.B. Sidelnikov, V.N. Baranov, N.N. Dovzhenko, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2020. – № 861. – P. 3–8.
242. Investigation the structure and properties of deformed semi-finished products produced from chips of Al-Mg alloys system alloyed with scandium / S. B. Sidelnikov, N. N. Zagirov, Yu. N. Loginov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. – 2023. – № 6. – P. 46–58.
243. Development and research of technology for obtaining and properties of welding wire from Al-Mg-Sc alloys using combined methods of thermal deformation treatment / S. B. Sidelnikov, D. S.

Voroshilov, E. S. Lopatina [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2024. – № 7(3). – P. 384–404.

244. Mechanical properties and microstructure of multi-pass butt weld of plates made of Al-Mg-Zr alloy sparingly doped with scandium / N. N. Dovzhenko, A. I. Demchenko, A. A. Bezrukikh, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 113. – P. 785–805.

245. Obtaining welding wire from alloy 1580 by technology including the method of combined rolling-extrusion / I. L. Konstantinov, V. N. Baranov, E. Y. Zenkin, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // Appl. Phys. A. – 2024. – 130. – 403.

246. Modeling and investigation of ingotless rolling-extrusion process of rods from Al-Zr-Fe and Al-Mg-Sc alloys / S. B. Sidelnikov, A. V. Durnopyanov, E. S. Lopatina, D. S. Voroshilov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – 140. – 3965–3981.

247. 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 : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Самчук Антон Павлович ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2018. – 110 с.

248. Physical Modeling Technological Regimes of Production Deformed Semi-Finished Products from Experimental Aluminium Alloys Alloyed by Scandium / V. Baranov, S. Sidelnikov, E. Zenkin, O. Yakiviyuk // Materials Science Forum. – 2018. – № 918. – P. 54–62.

249. ГОСТ 9.021-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. – М.: Межгосударственный стандарт, 1975. – 6 с.

250. ASTM G67-18 Standard Test Method for Determining the Susceptibility to Intergranular Corrosion of 5XXX Series Aluminum Alloys by Mass Loss After Exposure to Nitric Acid (NAMLT Test).

251. Патент № 2570684 Российская Федерация, МПК C22C 21/00 (2006.01). Алюминиевый сплав : № 2014127399/02 : заявл. 04.07.2014 : опубл. 10.12.2015 / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

252. Патент на полезную модель № 101390 Российская Федерация, МПК B21C 23/00 (2006.01). Устройство для непрерывной прокатки и прессования : № 2010134856/02 : заявл. 20.08.2010 : опубл. 20.01.2011 / Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко И. Н. [и др.] ;

патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

253. Патент на полезную модель № 102313 Российская Федерация, МПК В21С 23/08 (2006.01). Устройство для непрерывной прокатки и прессования : № 2010135543/02 : заявл. 24.08.2010 : опубл. 27.02.2011 / Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко И. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

254. Патент на полезную модель № 102542 Российская Федерация, МПК В21С 23/00 (2006.01). Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей : № 2010134857/02 : заявл. 20.08.2010 : опубл. 10.03.2011 / Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

255. Патент № 2457914 Российская Федерация, МПК В21С 3/00 (2006.01), В22D 11/00 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов : № 2011103241/02 : заявл. 31.01.2011 : опубл. 10.08.2012 / Баранов В. Н., Ворошилов Д. С., Галиев Р. И. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".

256. Патент № 2689460 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), В21С 23/00 (2006.01), СПК В22D 11/06 (2019.02), В21С 23/00 (2019.02). Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения сварочной проволоки и лигатурных прутков из цветных металлов и сплавов : № 2018146200 : заявл. 24.12.2018 : опубл. 28.05.2019 / Баранов В. Н., Зенкин Е. Ю., Сидельников С. Б., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".

257. Патент № 2724758 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), СПК В22D 11/06 (2020.02). Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла : № 2019139742 : заявл. 04.12.2019 : опубл. 25.06.2020 / Сидельников С. Б., Баранов В. Н., Старцев А. А., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

258. Патент № 2792327 Российская Федерация, МПК В22D 11/06 (2006.01), СПК В22D 11/06 (2022.08). Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла : № 2021120933 : заявл. 12.10.2020 : опубл. 21.03.2023 / Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

259. Патент № 2847204 Российская Федерация, МПК В21С 23/00 (2006.01), В22D 11/06 (2006.01). Способ бесслитковой прокатки-прессования прутков и устройство для его реализации : № 2024138405 : заявл. 19.12.2024 : опубл. 30.09.2025 / Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., Парубок А. В., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

260. Патент № 2458170 Российская Федерация, МПК С22С 21/00 (2006.01). Алюминиевый сплав : № 2011103242/02 : заявл. 31.01.2011 : опубл. 10.08.2012 / Баранов В. Н., Биронт В. С., Галиев Р. И. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".

261. Падалка, В. А. Особенности технологии получения и свойства литых и деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из низколегированных сплавов системы Al – РЗМ / В. А. Падалка, Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников [и др.] // Литейщик России. – 2011. – № 8. – С. 26–29.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

В.И. Колмаков
2018 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «Завод современных материалов»

В.И. Зыков
2018 г.

АКТ

промышленной апробации результатов исследований по получению проволоки из сплава системы Al-PЗМ методом совмещенной обработки

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований по созданию и внедрению в производство энергосберегающей технологии совмещенной обработки с применением операций литья, прокатки и прессования, предназначенной для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ, выполненные коллективом ученых института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) СФУ в составе С.Б. Сидельникова, Д.С. Ворошилова, И.Н. Довженко, Р.И. Галиева, А.А.Ковалевой, А.П. Самчука, О.В. Яквивюк, Т.В. Бермешева и студентами П.Н. Шабариним, В.А. Фроловым, Д.В. Назаренко, И.Н. Белоконовой, А.В. Дурнопьяновым прошли промышленную апробацию и позволяют повысить эффективность процесса изготовления проволоки сварочного и электротехнического назначения.

Технология была разработана в лаборатории совмещенных методов обработки ИЦМиМ СФУ и реализована на установке совмещенной обработке СПП-400, установленной на ООО «Завод современных материалов».

Она включала в себя следующие переделы:

- приготовление сплавов системы Al+PЗМ с различным содержанием редкоземельных металлов;
- получение длинномерных заготовок диаметром 5 - 9 мм на установках совмещенного литья и прокатки-прессования СПП-200 (СФУ) и СПП-400 (ООО «Завод современных материалов»);
- получение проволоки диаметром 2 мм из полученных заготовок методом волочения.

По разработанной технологии изготовлены опытные партии деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки и проведен анализ их механических и эксплуатационных свойств. Высокие показатели их прочностных, пластических и электрофизических характеристик были подтверждены испытаниями механических свойств (ГОСТ 1497-84), электрических свойств (ГОСТ Р МЭК 62004-2014), а также результатами металлографического анализа макро- и микрошлифов полученных полуфабрикатов.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать проволоку сварочного и электротехнического назначения из сплавов системы Al+PЗМ с требуемыми значениями механических и эксплуатационных свойств для нужд отечественной электроэнергетики и других отраслей промышленности.

Зав. кафедрой ОМД ФГАОУ ВО СФУ
д-р техн. наук, проф.

С.Б. Сидельников
«18» 01 2018 г.


 УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
 М.В. Румянцев
 «30» 2020


 УТВЕРЖДАЮ
 Директор
 ООО «Альянс-2008»
 А. Утенков
 «29» сентября 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. Дурнопьянова, 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» сентября 2020

СОГЛАСОВАНО
 Директор
 ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»


 Д.В. Назаренко
 «23» сентября 2020

СОГЛАСОВАНО
 Директор
 ООО «Завод современных материалов»


 В.И. Зыков
 «23» сентября 2020

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО Ректора ФГАОУ ВО «Сибирский
Федеральный университет»

« 16 »

М.И. Румянцев

2019

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
СОАО «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-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, 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 применение промышленном установке непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор ЭМК-12, затем на установке непрерывного прессования «ТЛЖ 300» и на линии волочения NESF 5/3 «MAG» (СОАО «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 (СОАО «Гомелькабель») до диаметров 2,65 – 5 мм.
- Волочение проволоки до диаметра 0,5 мм с промежуточными и окончательным отжигами. (СОАО «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
2024



УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Завод современных материалов»

В.И. Зыков
2024



АКТ

внедрения результатов исследований по получению длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплава Al-1%PЗМ, полученных с помощью методов совмещенной обработки

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований по созданию и внедрению в производство технологии получения тонкой проволоки из сплава Al-1%PЗМ с применением операций совмещенной обработки, в рамках научно-исследовательской работы 23-29-00028 «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов из низколегированных алюминиевых сплавов системы Al-PЗМ для производства кабельно-проводниковой продукции с использованием различных совмещенных методов обработки и исследование их реологических характеристик», поддержанной Российским научным фондом, выполненной коллективом ученых института цветных металлов СФУ в составе Д.С. Ворошилова, С.Б. Сидельникова, Р.И. Галиева, В.М. Беспалова, М.М. Моткова, А.В. Дурнопянова, Т.В. Бермешева, В.А. Бернгардта, М.В. Ворошиловой, Д.Б. Дармажапова, прошла промышленную апробацию. Полученные результаты подтверждают возможность использования технологии совмещенной прокатки-прессования и совмещенного литья и прокатки-прессования при получении заготовок под дальнейшее тонкое волочение.

Технология получения прутков включала в себя две схемы (совмещенная прокатка-прессование (СПП) литых длинномерных заготовок и совмещенное литье и прокатку-прессование (СЛиПП) по патентам №2792327, №2724758, №2689460, №2457914), была разработана в лаборатории совмещенных методов обработки ИЦМ СФУ и реализована на опытном участке ООО «Завод современных материалов» с применением промышленной установки СПП-400.

Разработанная технология СПП включает в себя следующие переделы:

- непрерывное литье длинномерных заготовок диаметром 18 мм и размерами 20×20 мм (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»);
- деформационная обработка длинномерных заготовок на промышленной установке непрерывного прессования СПП-400 (ООО «Завод современных материалов») до диаметров 5-9 мм.
- волочение проволоки из полученных прутков до диаметра 0,2-0,5 мм с промежуточными и окончательными отжигами (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»).

Разработанная технология СЛиПП включает в себя следующие переделы:

- непрерывное литье и прокатка-прессование прутков диаметром 5-9 мм на установке СПП-400 (ООО «Завод современных материалов»);
- волочение проволоки из полученных прутков до диаметра 0,2-0,5 мм с промежуточными и окончательными отжигами (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»).

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.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать прутки и тонкую проволоку из сплава Al-1%PЗМ с требуемым значением механических свойств и электропроводности.

СОГЛАСОВАНО

Руководитель проекта, канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой ОМД ИЦМ ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»

Д.С. Ворошилов
«15» 2024



АКТ
 апробации экспериментальной сварочной проволоки

В лаборатории сварки отдела главного сварщика службы главного технолога проведены испытания сварочных проволок, выполненных из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc и Al-Si с заваркой образцов-имитаторов ручной аргонодуговой сваркой и последующим исследованием полученных сварных швов.

Сварочные проволоки получены из длинномерных деформированных полуфабрикатах в лаборатории совмещенного литья-прокатки-прессования ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» коллективом ученых института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) СФУ в составе: В.Н. Баранова, Д.С. Ворошилова, Н.Н. Загирова, Е.С. Лопатиной, А.П. Самчука, С.Б. Сидельникова, О.В. Якивчук и студентами И.Н. Белоконовой, А.В. Дурнопьяновым, В.А. Фроловым.

Цель испытаний: апробация сварочных проволок на образцах-имитаторах, определение технологичности свойств при сварке и возможности дальнейшего применения.

Основной материал:

- образцы-имитаторы из алюминиевого сплава АМг6 (сертификат качества №04-23114-14 приложение 1), размером пластин 4×150×300мм

Сварочные материалы:

- поставленные сварочные проволоки из сплавов №1 1570, №2 Al-Mg-Sc и №3 АК12 (приложение 2);
 - электрод вольфрамовый лантанированный ТУ 48-19-27-77;
 - аргон ГОСТ 10157-79 (паспорт качества приложение 1).

Сварочное оборудование: EVOTIG 500 P AC/DC

Методика испытаний:

1. Подготовка образцов-имитаторов и сварочной проволоки;
2. Сборка и сварка образцов-имитаторов;
3. Визуальный и измерительный контроль;
4. Металлографические исследования;
5. Механические испытания образцов.

1. Подготовка образцов-имитаторов

Пластины из сплава АМг6 и сварочные проволоки подготовлены согласно ОСТ 92-1152-75 и подвергнуты общему обезжириванию и травлению по ОСТ 92-1178-77 с последующим шабрением торцов деталей и зоны сварки.

После травления и осветления проволоки 1570 и Al-Mg-Sc приобрели светлый белый цвет.

Проволока АК-12 при травлении приобрела серый цвет, который не изменился после осветления.

2. Сборка и сварка образцов-имитаторов

Сборка пластин выполнялась в приспособлении на прихватках. Тип соединения ГОСТ 14806-80-С4.

Сварка на переменном токе в нижнем положении на съемной подкладке с пролавоформирующей канавкой.

Режимы сварки:

Сварочный ток 180-200А.

Расход аргона 9 л/мин.

2.1. Сплав №1 1570

Процесс формирования сварного шва стабильный с незначительным газообразованием в расплаве сварочной ванны не повлекшее образование пор (наиболее вероятная причина – насыщение проволоки влагой во время хранения).

2.2. Сплав №2 Al-Mg-Sc

Начало процесса сварки равномерное с хорошим формированием шва на длине ориентировочно 200мм, после стабильность процесса формирования шва нарушается с газовыделением, выделением включений черного цвета. После прерывания процесса сварки и возобновления сварки с места остановки с применением нового, холодного отрезка присадочной проволоки процесс продолжается стабильно.

Эффект проявляется как на отожженной проволоке так и на нагартованной проволоке с незначительными отличиями.

Предполагаемая причина нарушения формирования – прогрев присадочной проволоки по длине во время сварки, а соответственно перегрев проволоки (низкая температура плавления) вблизи сварочной дуги с преждевременным расплавлением большей массы проволоки.

2.3. Сплав №3 АК-12

При сварке происходит интенсивное газовыделение, формирование шва крайне неравномерное с образованием несплавлений, кратеров и выделением черного осадка и включениями окисной пленки в расплаве сварочной ванны.

3. Визуальный и измерительный контроль

Контролю на соответствие ГОСТ 14806-80 подвергались собранные под сварку пластины и конструктивные элементы сварного шва.

Дефектность сварных швов контролировалась по ОСТ 92-1114-80.

Результаты контроля:

- швы образцов сплава 1570 соответствуют ГОСТ 14806-80 и ОСТ 92-1114-80;
- швы образцов сплава Al-Mg-Sc на протяжении ориентировочно 200мм соответствуют ГОСТ 14806-80 и ОСТ 92-1114-80, участки после нарушения стабильности формирования шва не соответствуют ГОСТ 14806-80 и ОСТ 92-1114-80;
- швы образца АК-12 не соответствуют ГОСТ 14806-80 и ОСТ 92-1114-80.

4. Металлографические исследования;

По результатам металлографического исследования (приложение 3) сварной шов, выполненный с применением сплава АК12, не соответствует ОСТ 92-1114-80.

5. Механические испытания образцов (приложение 4).

5.1. Сплав 1570

Потеря прочности составляет менее 10% от номинального требования для сплава АМгб в отожженном состоянии, что соответствует требованиям ОСТ 92-1114-80 для сварных швов 1 категории ($\sigma_{ш} \geq 0,9\sigma_0$).

5.2. Сплав Al-Mg-Sc

Потеря прочности составляет менее 10% от, что соответствует требованиям ОСТ 92-1114-80 для сварных швов 1 категории ($\sigma_{ш} \geq 0,9\sigma_0$).

Отмечаются более высокие показатели прочности нежели при сварке проволокой 1570.

5.3. Сплав АК12

Потеря прочности составляет более 20% (37,5%) от номинального требования для сплава АМгб в отожженном состоянии, что не соответствует требованиям ОСТ 92-1114-80 даже для 2 категории.

Выводы:

1. Проволока из сплава АК12 не применима для сварки сплава АМгб в отрасли ракетостроения;
2. Проволока из сплава Al-Mg-Sc требует корректировки технологических свойств, после чего рекомендуются повторные испытаниями в ручном и автоматическом режимах сварки;
3. Проволока из сплава 1570 рекомендуется для дальнейшего исследования в ручном и автоматическом режимах сварки.

Начальник лаборатории сварки



А.Н. Пашкин

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

М.В. Румянцев
2024

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Завод современных материалов»

В.И. Зыков
2024

АКТ

внедрения результатов исследований по получению длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов 1580 и 01570, изготовленных с применением методов совмещенной обработки

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований по созданию и внедрению в производство технологии получения сварочной проволоки из сплавов 1580 и 01570 с применением операций совмещенной обработки в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013 «Развитие физико-химических основ ресурсосберегающих технологий производства цветных, рассеянных и редкоземельных металлов, создание новых материалов на их основе», выполненной коллективом ученых института цветных металлов СФУ в составе С.Б. Сидельникова, Д.С. Ворошилова, Р.И. Галиева, А.В. Дурнопьянова, Е.С. Лопатиной, П.О. Юрьева, Ю.В. Байковского, М.В. Ворошиловой прошла промышленную апробацию. Полученные результаты подтверждают возможность использования технологии совмещенного литья и прокатки-прессования при получении заготовок под дальнейшее волочение для получения сварочной проволоки.

Технология получения прутков и оборудование для ее реализации были разработаны на базе использования патента РФ №2689460 в лаборатории совмещенных методов обработки ИЦМ СФУ и внедрены на опытном участке ООО «Завод современных материалов» с применением промышленной установки СПП-400.

Разработанная технология включает в себя следующие переделы:

- непрерывное литье и прокатка-прессование прутков диаметром 9 мм на установке СПП-400 (ООО «Завод современных материалов»);
- сортовая прокатка и (или) волочение проволоки из полученных прутков до диаметра 3 мм с промежуточными и окончательным отжигами (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»).

По разработанной технологии изготовлены опытные партии деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки, проведен анализ их механических свойств и микроструктуры. Высокие показатели их прочностных и пластических характеристик были подтверждены испытаниями механических свойств по ГОСТ-1497-84.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать прутки и сварочную проволоку из сплавов 1580 и 01570 (система Al-Mg-Sc) с требуемым значением механических свойств.

СОГЛАСОВАНО

Зав. лабораторией ФХМПМ, канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой ОМД ИЦМ ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»

Д.С. Ворошилов
«15» 10 2024



АКТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения технологии бесслитковой прокатки- прессования прутков из алюминиевого сплава 01417

Внедрение технологии бесслитковой прокатки-прессования (БПП) прутков из алюминиевого сплава 01417 на опытно-промышленной установке СПП-400 позволит в условиях Завода современных материалов (Красноярский край) снизить себестоимость получения продукции на 30 062 руб/т (см. таблицу).

Таблица - Сводная таблица расчета экономической эффективности

Показатель	Прессование на гидропрессе	Технология БПП
Выход годного, %:		
Плавильный цех	77%	96%
Прессовый цех	63%	97%
Электроэнергия, кВт-ч на 1т:		
Плавильный цех	832	95
Прессовый цех	5303	3073
Переработка:		
Плавильный цех, руб/т	10 042	18 689
Дополнительный переплав (446 кг/т)	2 300	-
Прессование, руб/т	36 409	-
Волочение	28 446	28446
Себестоимость по переменным, руб/т	193 754	163 692
Снижение себестоимости, руб/т		30 062

Экономический эффект от внедрения технологии изготовления прутков диаметром 9 мм из сплава 01417 с использованием непрерывной разливки, прокатки и прессования может быть определен по выражению

$$\mathcal{E}_r = \Pi (C_1 - C_2) - E_n (K_1 - K_2),$$

где \mathcal{E}_r - годовой экономический эффект, руб;

Π - годовой объем продукции, т;

C_1, C_2 - себестоимость до и после внедрения, руб/т;

E_n - нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;

K_1, K_2 - затраты до и после внедрения, руб.

Расчеты по приведенной формуле показали, что ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения технологии непрерывной разливки, прокатки и прессования прутков из алюминиевого сплава 01417, составит

$$\mathcal{E}_r = 250 \cdot (193\,754 - 163\,692) - 0,15 \cdot 2000000 = 7215500 \text{ руб.}$$

От ООО «Завод современных материалов»

Бухгалтер завода

Мельникова Л.Е.



ТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГАОУ ВО

«Сибирский федеральный
университет»

М.В. Румянцев

2020 г.

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что в учебный процесс института цветных металлов и материаловедении внедрены и применяются при обучении магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» результаты НИР по теме «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-RЗМ с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств», выполняемой в 2019-2020 г.г. по проекту № 18-48-242021 междисциплинарных фундаментальных научных исследований, проводимых совместно РФФИ и Красноярским краем.

Результаты научных исследований получены коллективом авторов в составе: руководителя, д.т.н., проф. Сидельникова С.Б., к.т.н., доц. Ворошилова Д.С., доц., к.т.н. Беспалова В.М., зав. лабораторией, к.т.н. Самчука А.П., аспирантов Моткова М.М. и Дурнопьянова А.В., инженера Бермешева Т.В.

Разработанные при выполнении НИР компьютерные модели, методики оценки технологических и силовых параметров при реализации процессов непрерывного прессования, данные по реологическим и механическим свойствам литых и деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами, разработанные конструкции установок для совмещенной прокатки-прессования, а также новые технологии получения проволоки из этих сплавов, используются при проведении лекционных, лабораторных и практических занятий по следующим дисциплинам магистерской программы 22.04.02.05 «Обработка металлов давлением: «Современные методы металлургии, машиностроения и материаловедения», «Комбинированные и совмещенные методы обработки металлов», «Непрерывное литье и обработка цветных металлов и сплавов», «Математические методы в автоматизированном проектировании», «Технология прессования», «Технология прокатки», «Технология волочения» и др., а также при выполнении кандидатских и докторских диссертаций, научно-исследовательских курсовых и выпускных квалификационных работ студентов.

Директор ИЦМиМ

В.Н. Баранов