

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

НГУЕН СУАН ЗЬЕП

Разработка и исследование технологических режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков диаметром менее 18 мм алюминиевых кальцийсодержащих сплавов и сплава 01570 с высоким уровнем механических свойств

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: старший научный сотрудник, кандидат технических наук
Акопян Торгом Кароевич

Москва - 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

В настоящий момент широкое распространение получили сплавы типа 01570 на базе системы Al-Mg-Sc взамен сплавов типа АМгб, значительно превосходя их по прочностным свойствам. Сплав 01570 используется для изготовления крупных деталей, таких как топливные баки, а также для сварных конструкций, кронштейнов, фитингов и т.д. Данный сплав относится к группе деформируемых термически неупрочняющих сплавов, поэтому для получения из него изделий используются такие методы обработки давлением, как листовая прокатка, ковка, прессование и т. д. Известно, что применение специальных методов обработки давлением, классифицируемых как методы интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяют существенно повысить свойства обрабатываемого материала. Методы ИПД для получения мелкозернистой структуры (метод кручения под высоким давлением, РКУП, всесторонняя ковка и т.д.) широко изучались в течение длительного времени, но практически не нашли применения в промышленности из-за ряда ограничений. В частности, данные методы не позволяют получать длинномерные полуфабрикаты.

Для производства длинномерных цилиндрических полуфабрикатов с повышенными механическими характеристиками исследуется и применяется метод радиально-сдвиговой прокатки (РСП). По результатам многих исследований показано, что этот метод может быть использован для обработки практически любых металлов и сплавов, в том числе высокопрочных и труднодеформируемых.

Исследования показывают, что метод РСП позволяет создавать градиентную мелкозернистую структуру. Материал в области поверхности деформируется более интенсивно, что приводит к формированию как мелкозернистой структуры, являющейся результатом динамической рекристаллизации, так и крупнозернистой структурой, сформированной в результате развития процессов рекристаллизации. В центральных же слоях сохраняется деформированная нерекристаллизованная структура. В итоге после РСП удается добиться формирования так называемой градиентной структуры, обеспечивающей одновременно высокую прочность и вязкость обработанного материала. При этом итоговый уровень механических свойств заготовок оказывается сопоставим с тем, что получают с применением методов ИПД.

Однако в настоящее время большинство исследований метода РСП производятся применительно к сталям и титановым сплавам, тогда как для алюминиевых сплавов систематические исследования влияния РСП представлены

в весьма ограниченном количестве. Это связано с тем, что производство длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов в основном осуществляется методом прессования.

Следует отметить, что наличие в структуре сплава 01570 высокой доли упрочняющих наночастиц фазы Al_3Sc , выступающих также в качестве эффективных стабилизаторов структуры, делает сплавы данной группы весьма перспективными для применения обработки методом РСП. С другой стороны, перспективным сочетанием технологических и механических свойств обладают алюмоматричные композиционные сплавы, образованные эвтектическими системами. Преимущество данного типа материалов по сравнению с другими группами композиционных материалов, получаемых при помощи различных технологических процессов (например, механическим легированием или методами порошковой и гранульной металлургии), заключается в простом технологическом процессе получения, требующим лишь наличие стандартного промышленного оборудования для плавки и литья алюминиевых сплавов. При этом в сплавах эвтектического типа благодаря относительно высокой доле вторых фаз (обычно до 10-20 %) можно ожидать синергетического эффекта при формировании градиентной структуры в процессе РСП-обработки. В настоящий момент сплавы на базе Al-Ni, Al-Ca и Al-РЗМ (La, Ce) эвтектических систем представляются одними из наиболее перспективных для широкого промышленного применения. Марочные и перспективные деформируемые сплавы на базе данных систем обладают удачным сочетанием механических и технологических свойств, позволяющих рассматривать их в качестве перспективных для применения метода РСП.

Процесс РСП характеризуется сложным динамическим изменением температурных и деформационных параметров в очаге деформации, которые в конечном счете во многом определяют качество, структуру и свойства проката. Данные параметры крайне сложно отследить в реальном эксперименте в объеме заготовки. Одним из методов, используемых для решения вышеуказанных задач, является имитационное моделирование, основанное на методе конечных элементов. Инструментальные программы для моделирования процессов пластической деформации, которые обычно используются сегодня, это—Qform, Deform, Autoform, Ansys, Abaqus. Благодаря этим программам упрощается исследование и экономится много средств на экспериментальные работы и испытания. С помощью моделирования можно делать прогнозы о разрушении материала, об эволюции структуры и механических свойствах после деформации и задавать оптимальные условия для достижения заданных механических свойств.

Цель и задачи

Целью работы является разработка технологических режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков диаметром менее 18 мм опытных алюминиевых кальцийсодержащих сплавов с добавкой лантана и марочного сплава 01570 с высоким уровнем механических свойств

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать с использованием конечно-элементного математического метода моделирования, реализованного в программе QForm, влияние варьируемых параметров деформационной обработки (температура, степень, скорость деформации) на напряженно-деформированное состояние (накопленная степень деформации, характер и величина действующих напряжений) и распределение температурного поля в очаге деформации.

2. Для материалов, для которых в базе данных отсутствуют сведения по реологическим свойствам, проведение советующих механических испытаний для их определения.

3. Провести выбор и обоснование режимов деформационной обработки экспериментальных сплавов, включающих радиально-сдвиговую прокатку, для получения прутков диаметром менее 18 мм.

4. Проанализировать влияние варьируемых параметров деформационной обработки на структуру (фазовый состав, размер и распределение вторых фаз, характеристики зеренной структуры) и механические свойства при испытаниях на микротвердость и на одноосное растяжение полученных деформированных полуфабрикатов.

5. Разработка перспективных режимов деформационной обработки, обеспечивающих наилучший комплекс механических свойств прутков из экспериментальных сплавов.

Методология и методы исследований

Для выполнения задач исследования применялись методология и метод математического моделирования с использованием специализированной компьютерной программы QForm 3D, основанной на законах теории обработки металлов давлением (ОМД), и в том числе – метода конечных элементов. Также производилось физическое моделирование с использованием специализированного экспериментального комплекса Gleeble System 3800. После проведения имитационного моделирования изучаемые объекты подвергались экспериментальным исследованиям с целью получения деформированных

полуфабрикатов по различным режимам радиально-сдвиговой прокатки, обоснованным на этапе имитационного моделирования. При проведении эксперимента использовалась методология соответствия модельного материала реальному (алюминиевые сплавы 01570 и Al-3Ca-La(Cu)-1,5Mn).

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается:

1. Применением современных методов имитационного моделирования с помощью лицензионной программы QFORM.
2. При экспериментальных исследованиях применялось современное технологическое и аналитическое оборудование.
3. Текст диссертации и научного доклада проверен на отсутствие плагиата с помощью программы "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

Научная новизна

1. Расчетными и экспериментальными методами для исследуемых алюминиевых сплавов подтверждены известные сведения, полученные ранее на примере сталей и других сплавов, что в процессе радиально-сдвиговой прокатки (РСП) материал заготовки деформируется неравномерно, пластическая деформация происходит существенно более интенсивно в приповерхностной области и уменьшается в направлении к центральной части деформированного образца.

2. На основании анализа траекторий истечения деформируемого металла в очаге деформации выявлены и описаны особенности процесса радиально-сдвиговой прокатки и их влияние на параметры формоизменения. Показано, что поверхностные слои металла характеризуются цикличностью изменения параметра температуры, амплитуда которой зависит от управляемых технологических факторов (температура и скорость прокатки, режим обжатий), а центральные слои подвержены монотонному изменению.

3. Показано, что РСП сплавов приводит к формированию градиентной структуры, характеризующейся рекристаллизованной мелкозернистой структурой приповерхностных слоев и волокнистой структурой центральных слоев деформированного полуфабриката. Сохранение дисперсной рекристаллизованной структуры в приповерхностных слоях является прямым следствием высокой гетерогенности структуры сплавов, образованной наночастицами фазы $L1_2$ в сплаве 01570 и эвтектическими частицами фазы $Al_4(Ca,La)$ в сплавах на основе системы Al-Ca-La-Mn.

4. Показана высокая релевантность теоретических результатов

моделирования напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации в процессе прокатки по отношению к экспериментально наблюдаемым изменениям структуры и свойств получаемых заготовок. В частности, предсказанные расчетом количественные данные по формированию высокой неоднородности распределения накопленной деформации и полей напряжения и температур по сечению получаемых прутков находятся в соответствии с наблюдаемыми структурными изменениями, приводящими к формированию итоговой градиентной структуры в деформированном полуфабрикате.

Практическая значимость

1. Результаты исследования реологических свойств изученного марочного сплава 01570 (ГОСТ4784-2019) и новых кальцийсодержащих сплавов могут быть использованы в качестве базы данных для создания технологических процессов и моделирования процессов ОМД.

2. Результаты моделирования можно использовать для общей оценки влияния технологических параметров на напряженно-деформированное состояние и температурное поле, формирующееся в процессе радиально-сдвиговой прокатки других алюминиевых сплавов, обладающих близким химическим составом и структурными характеристиками.

3. Подтверждена возможность применения метода радиально-сдвиговой прокатки для изготовления цилиндрических прутков диаметром менее 18 мм с высоким уровнем механических свойств из алюминиевых сплавов. В частности, для марочного сплава 01570 показано, что высокий уровень прочности и пластичности достигается у прутков, полученных при температуре РСП в 300 °С ($\sigma_{\text{в}} \sim 436$ МПа, $\sigma_{0,2} \sim 350$ МПа, относительное удлинение 15,5 %).

4. Полученные результаты позволяют расширить области применения метода радиально-сдвиговой прокатки, в частности, для обработки алюминиевых сплавов разных групп для изготовления прутков диаметром менее 18 мм.

5. На примере эвтектического кальцийсодержащего сплава Al-3Ca-2La-1Mn показана возможность получения прутков методом радиально-сдвиговой прокатки с высоким обжатием с коэффициентом вытяжки за проход не менее 5. Для этого была разработана специальная калибровка валков, обеспечивающая высокие степени деформации и напряжения сжатия по всему сечению заготовки в очаге деформации.

6. Полученные расчетно-экспериментальные результаты могут быть использованы в учебном процессе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических исследований поведения марочного алюминиевого сплава 01570 и опытных Са и La-содержащих сплавов в процессе пластической деформации при варьируемых режимах деформационной обработки, включающих температуру деформации, скорость и степень деформации.

2. Полученные теоретические данные влияния технологических параметров процесса радиально-сдвиговой прокатки на температурное поле и напряженно-деформированное состояние в очаге деформации изучаемых алюминиевых сплавов.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса радиально-сдвиговой прокатки и режимов деформационно-термической обработки на поведение марочного алюминиевого сплава 01570 и опытных Са и La-содержащих сплавов.

4. Результаты исследования влияния технологических параметров процесса радиально-сдвиговой прокатки на возможность получения из марочного алюминиевого сплава 01570 и опытных Са и La-содержащих сплавов прутков диаметров менее 18 мм, а также результаты влияния режимов обработки на микроструктуру и механические свойства полученных деформированных полуфабрикатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях:

- XVIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов" - ИМЕТ-РАН 2021г.;

- XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» 16-20 мая 2022 г. Санкт-Петербург;

- Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022), Ялта.

- XII конференция молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий, посвященной 115 годовщине со дня рождения Александра Павловича Гуляева. 30 марта 2023 г. ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

- XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 2023 г., Санкт-Петербург.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем

ВАК РФ и 4 тезиса докладов в сборниках научных конференций. Список работ, в которых отражено основное содержание диссертации, приведён в конце научного доклада.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цель и основные задачи работы, обозначена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен обзор и анализ предшествующих научно-технических публикаций о химическом составе, структуре и механических свойствах алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Sc, а также алюминиевых кальцийсодержащих сплавов системы Al-Ca-La-Mn. Рассмотрены способы получения мелкозернистой структуры с высоким уровнем механических свойств алюминиевых сплавов. Приведен анализ метода радиально-сдвиговой прокатки и возможности его применения при производстве длинномерных цилиндрических полуфабрикатов из алюминиевых сплавов.

Во второй главе представлены методология, методы, а также оборудование, использованное для проведения экспериментальных исследований.

Предварительные теоретические исследования процесса деформации при различных режимах проведены с использованием математического моделирования в программе QForm, которое позволило изучить распределение температурных полей и напряженно-деформированное состояние, возникающее в очаге деформации в процессе РСП прутков по различным режимам.

Для материалов, для которых в базе данных программы отсутствовали сведения по реологическим свойствам, проводились механические испытания с использованием комплекса физического моделирования Gleeble System 3800 для их определения и последующего использования для математического моделирования процесса деформации.

После теоретического изучения экспериментальные сплавы подвергались деформационной обработке методом РСП. РСП сплава 01570 производили с использованием исходной заготовки, полученной из горячекатаной плиты, произведенной в промышленных условиях на заводе ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод». Химический состав сплава представлен в таблице 1. Исходный слиток, полученный в промышленных условиях, подвергали гомогенизационному отжигу 360 °С/6 часов и последующей горячей прокатке при 400 °С при суммарной степени деформации 91,38%. Далее из полученной заготовки вытачивались цилиндрические образцы диаметром 31 мм, которые подвергались радиально-сдвиговой прокатке при различных режимах обработки. В частности, прокатку проводили на мини-станах РСП 20-40 и РСП 10-30 с углом подачи $\beta=20^\circ$,

углом раскатки $\delta=7^\circ$. Скоростью вращения валков при прокатке составляла 60-100 об/мин. Прокатку проводили для трех исходных температур заготовки: 250; 300 и 400 °С. Деформация производилась в 5 проходов до конечного диаметра прутка 10 мм. Суммарный коэффициент вытяжки составил $\lambda = 9,61$. Коэффициент вытяжки за один проход выбран в диапазоне 1,3-2,0, исходя из условия получения качественной поверхности и точных геометрических размеров прутка, а также ограничения интенсивного роста температуры вследствие деформационного разогрева.

Таблица 1- – Химический состав сплава 01570, произведенного на заводе ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод».

Основ.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sc	Zr	Be	Другие
Al	0,2	0,3	0,1	0,2- 0,6	5,3- 6,3	-	0,1	0,01- 0,05	0,17- 0,27	0,05- 0,15	0,0002- 0,005	<0,15

Цилиндрические слитки опытных кальцийсодержащих сплавов для проведения экспериментального анализа процесса радиально-сдвиговой прокатки были изготовлены в лабораторных условиях методом плавки в печи электросопротивления PlavkaPro ПП-10 (в графитошамотном тигле) и последующего литья в цилиндрическую графитовую изложницу с формообразующей частью $\Phi 42 \times 280$ мм. Аналогичные цилиндрические слитки диаметром 42 мм были изготовлены и для марочного сплава 01570 для последующего изготовления экспериментальных образцов, предназначенных для экспериментальных исследований реологических свойств сплава.

Цилиндрические слитки из сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn после литья были обработаны методом радиально-сдвиговой прокатки по режиму 42-31-24-17-14-9 мм (суммарная степень деформации 95 %) при температурах 350-450 °С на мини-станах РСП 20-40 и РСП 10-30 с углом подачи $\beta=20^\circ$ и углом раскатки $\delta=7^\circ$. Скоростью вращения валков при прокатке составляла 60-100 об/мин. Коэффициент вытяжки за один проход выбран в диапазоне 1,4-2,5, исходя из условия получения качественной поверхности и точных геометрических размеров прутка, а также ограничения интенсивного роста температуры вследствие деформационного разогрева.

В ходе экспериментальных исследований было также использовано следующее оборудование:

- Установка METKON DUROLINE MH-6 для измерения микротвердости;
- Установке «Gleeble System 3800» для исследований реологических свойств сплавов;
- Световой микроскоп Axio Observer D1m Carl Zeiss для изучения микроструктуры сплавов;

- Сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA 3 SBH с приставкой-микроанализатором INCA Energy 15013 X-act для исследований микроструктуры и фазового состава, а также химического состава фаз, первичных кристаллов и твердого раствора;

- Детектор NordlysMax2 (Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy) для анализа методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD);

- Просвечивающий электронный микроскоп Jeol JEM 1400 для анализа тонкой микроструктуры сплавов;

- Установка Z250 Zwick/Roell с усилием от 500Н до 6000 кН для механических испытаний на растяжение.

В третьей главе с использованием теоретических и экспериментальных методов исследований проведен анализ влияния технологических параметров процесса радиально-сдвиговой прокатки на напряженно-деформированное состояние, структуру и свойства прутков, получаемых из марочного сплава 01570.

На первом этапе с использованием образцов, полученных из литых цилиндрических слитков диаметром 42 мм, произведен анализ реологических свойств сплава 01570 (рисунок 1) (химический состав полученного сплава представлен в таблице 2).

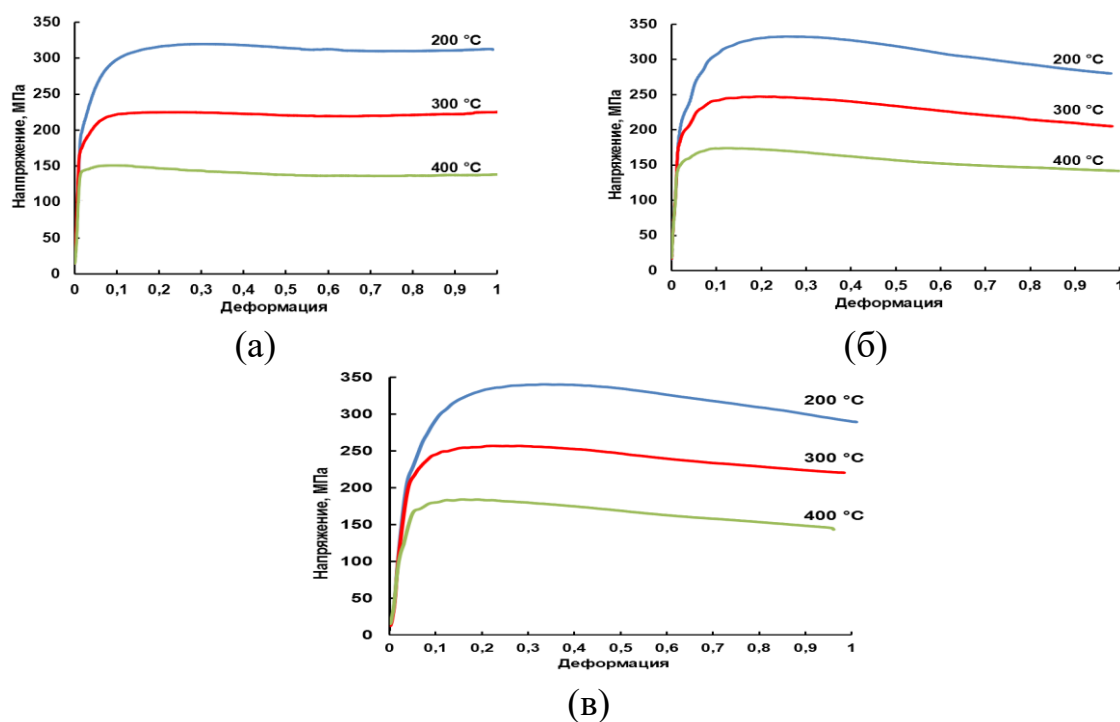


Рисунок 1 - Кривые сопротивления деформации сплава Al-6Mg-0.3Sc при скорости деформации 1 с⁻¹ (а), 10 с⁻¹ (б) и 20 с⁻¹ (в)

Твердость сплава 01570 в литом состоянии составляла 84±5 HV, а после гомогенизации 360 °C/6ч 100 ±2 HV.

Таблица 2 – Химический состав сплава 01570

Химический состав, % масс.							
Al	Mg	Mn	Sc	Zn	Fe	Si	Прочие
Основа	6,25	0,46	0,27	0,2	0,3	0,2	0,1

Далее проводилось моделирование процесса радиально-сдвиговой прокатки сплава 01570 в среде QFORM-3D. На первом этапе моделирование прокатки выполнялось в 1 проход с варьированием коэффициента вытяжки за проход λ и изменением частоты вращения рабочих валков n (скорости прокатки). В результате получено 8 вариантов расчета. Основные параметры моделирования представлены в таблице 3. По результатам моделирования произведено теоретическое изучение траекторий истечения и изменения температуры заготовки в процессе РСП сплава 01570.

Таблица 3 - Параметры модели для моделирования

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Диаметр заготовки	D_0	мм	42
Температура заготовки перед прокаткой	T	°C	400
Угол конусности очага деформации на обжимном участке	α_1	градусы	11
Угол подачи	β	градусы	20
Угол раскатки	δ	градусы	7
Материал валков	-	-	Сталь 5ХНМ
Температура валков	$T_в$	°C	20
Температура окружающей среды	$T_{o.c.}$	°C	20
Коэффициент вытяжки	λ	-	1,2; 1,6; 2,0; 2,4
Частота вращения валков	n	об/мин	15; 30; 60; 120

На рисунке 2 приведены проекции траекторий истечения металла на плоскость перпендикулярную оси прокатки для трех точек P1 (в центральной зоне), P3 (в промежуточной зоне) и P5 (в периферийной зоне).

Результаты анализа показывают, что периферийная траектория (точка P5, рисунок 2) имеет знакопеременную кривизну. Вблизи контакта заготовки с валками образуются вогнутые участки с условно отрицательной кривизной, в зазоре между

валками – выпуклые с условно положительной кривизной. Деформация элементарных объемов, совершающих движения по этой траектории, имеет немонотонный, явно выраженный циклический характер. Проявление элементов цикличности процесса максимально на внешнем контуре и затухает по мере приближения к центру. В промежуточной зоне (точка P3, рисунок 2) имеется определенная немонотонность в изменении радиуса и кривизны траектории, при существенно ослабленной цикличности. В центральной зоне (точка P1, рисунок 2) металл постоянно находится в состоянии непрерывного радиального и окружного сжатия и, соответственно, осевого растяжения. Радиус геликоидальной траектории монотонно уменьшается без изменения знака кривизны. Цикличность деформации практически отсутствует. Деформированное состояние близко к осесимметричному.

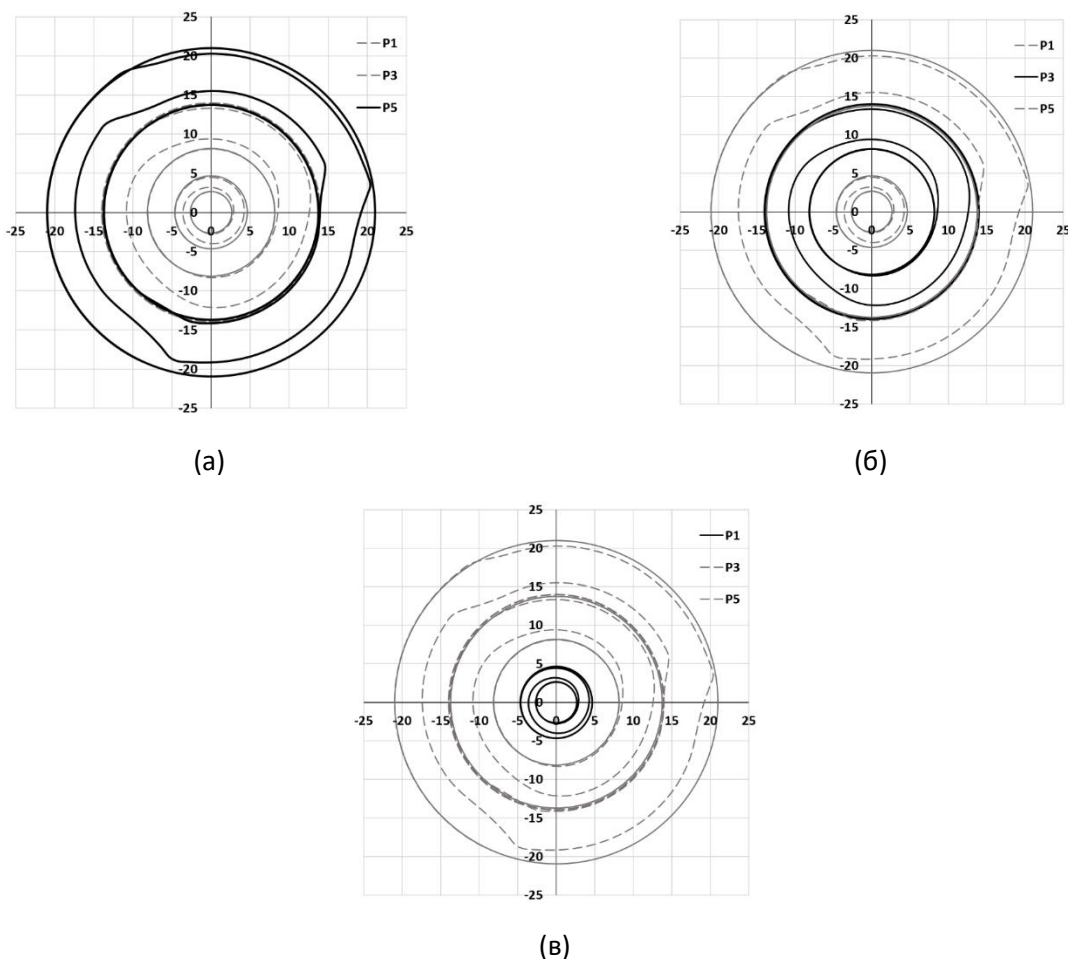


Рисунок 2 - Проекция траекторий точек P5 (а), P3 (б) и P1 (в) (толстые сплошные линии) на плоскость поперечного сечения заготовки при $\lambda=2,4$.

Таким образом, во внешней зоне развивается знакопеременная радиальная деформация циклического характера. В центральной зоне металл постоянно

находится в состоянии равномерного радиального сжатия. Согласно расчетам, величина накопленной степени деформации в центральной зоне определяется текущим значением коэффициента вытяжки λ для всего сечения, практически совпадая с $\ln(\lambda)$, а во внешней зоне в 8-10 и более раз больше, чем в центральной.

Исследования влияния коэффициента вытяжки на изменение температуры заготовки показали, что увеличение коэффициента вытяжки оказывает существенное влияние на результирующий рост температуры сплава. В приконтактных слоях отмечается резко выраженная цикличность изменения температуры. В зоне контакта с валками температура падает, в зазоре между валками возрастает. По мере приближения к центру очага деформации цикличность изменения температуры затухает, приобретая характер монотонного роста от входа в очаг деформации к выходу.

Далее для заготовки с исходным диаметром 31 мм было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния и температурного поля в очаге деформации по планируемым режимам экспериментальной РСП обработки. Параметры РСП для моделирования и экспериментальных исследований, представленные в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры РСП, выбранные для математического моделирования и последующей экспериментальной обработки заготовок из сплава 01570.

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Исходная заготовка	завод ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»		
Диаметр заготовки	D_0	мм	31
Температура заготовки перед прокаткой	T	°С	250, 300, 400
Угол конусности очага деформации на обжимном участке	α_1	градусы	11
Угол подачи	β	градусы	20
Угол раскатки	δ	градусы	7
Скорость вращения валков	n	об/мин	60-100
Коэффициент вытяжки за проход (5 проходов)	λ_i	-	1,82-1,63-1,65- 1,36-1,44

Результаты теоретического анализа температурного поля в очаге деформации показали, что в процессе РСП тепловые эффекты распределяются неравномерно по сечению заготовки (рисунок 3а). При максимальной температуре прокатки 400 °С почти все сечение заготовки от поверхности к центру имеет температуру 400 – 420 °С. При снижении температуры до 300 и 250 °С зоны нагрева локализуются в районе кольца, центральная часть имеет более низкую температуру. Из гистограммы распределения температуры (рисунок 3б) видно, что с уменьшением температуры Т происходит более интенсивное повышение температуры в очаге деформации, а градиент температуры по сечению растет.

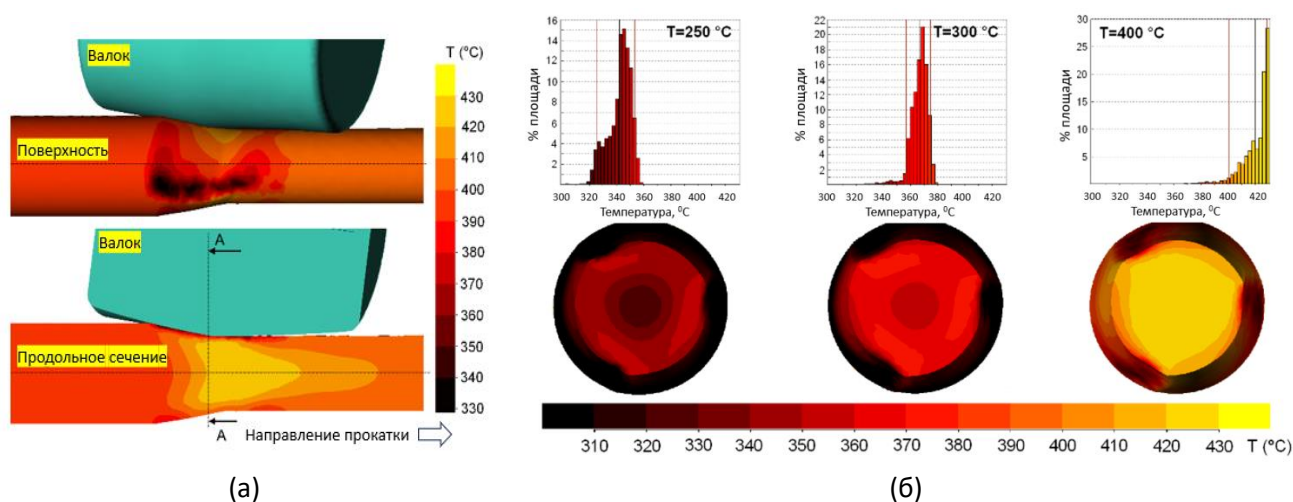


Рисунок 3 - Распределение температуры в очаге деформации на 1 проходе (а) в продольном сечении при $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и (б) в поперечном сечении (в плоскости желоба валков, сечение А-А)

Проводили анализ нормализованного среднего нормального напряжения $\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ в очаге деформации в процессе РСП. Результаты анализа показаны на рисунке 4.

По распределению нормализованного среднего нормального напряжения можно видеть, что в приповерхностной и промежуточной областях материал подвергается напряжению сжатия, а в центральной области – растягивающему напряжению. Минимальное значение нормализованного среднего нормального напряжения составляет -3,17; -2,76; -2,76; -2,82, а максимальное значение для центральной зоны 0,56; 0,64; 0,74; 0,94. Как показано в исследованиях процесса деформирования методом РСП, как правило, разрушение может происходить в центральной области, что связано со схемой напряженного состояния. Вместе с тем известны случаи кольцевого разрушения, где разрушение металла является следствием локального кольцевого перегрева.

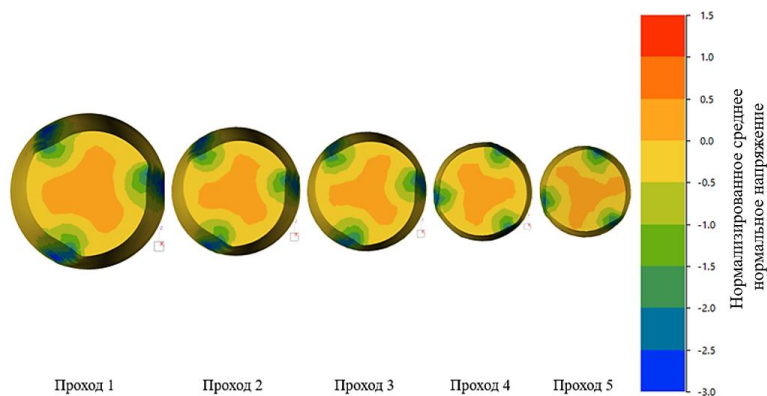


Рисунок 4 - Нормализованное среднее нормальное напряжение при радиально-сдвиговой прокатке сплава 01570 при температуре 300 °С

Произведена оценка параметра эквивалентной деформации (рисунок 5), который в значительной степени характеризует разное деформированное состояние по сечению прутка в очаге деформации при РСП, равномерность деформации и влияние цикличности на формирование градиентной микроструктуры.

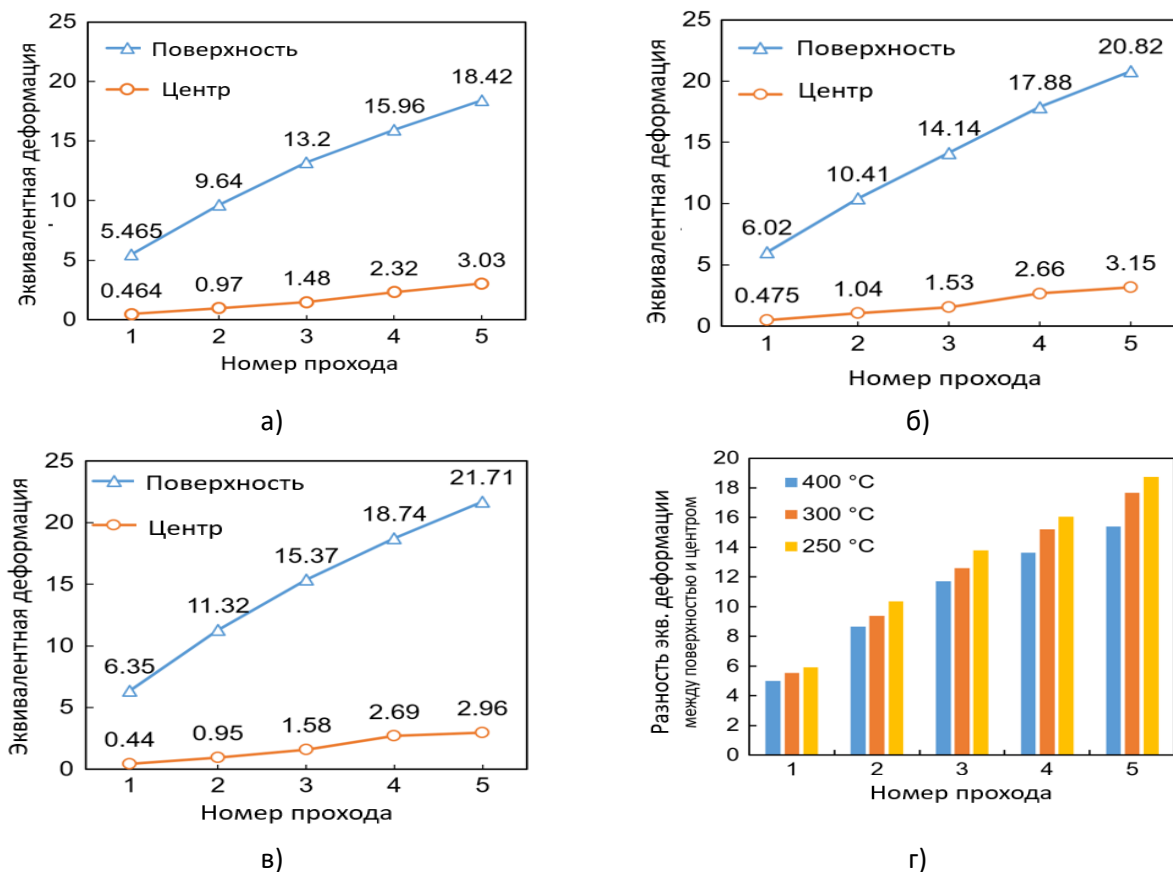


Рисунок 5 - Эквивалентная деформация при температуре прокатки (а) 400 °С, (б) 300 °С, (в) 250 °С и (г) разница ЭД между поверхностью и центром в каждом проходе

Видно, что параметр эквивалентной деформации в центральной части прутка монотонно возрастает от 0,44-0,55 после первого прохода до ~3 после 5-го прохода независимо от температурного режима (рисунок 5). Эти значения примерно равны $\ln(\lambda)$. Значения эквивалентной деформации в 5-7 раз выше на поверхности и значительно увеличиваются с каждым новым проходом. Эти отличия характерны для процесса РСП и определяют формирование естественной градиентной структуры материала.

Процесс прокатки проводили на мини-станах РСП 10-30 и 20-40 за 5 проходов с диаметра 31 мм до конечного диаметра 10 мм. Полученные прутки диаметром 10 мм после прокатки не имели видимых дефектов (рисунок 6).



Рисунок 6 – Полученные на мини-станах РСП прутки диаметром 10 мм

Для полученных прутков по различным температурным режимам производили измерение микротвердости в продольном сечении от поверхности до оси деформированного полуфабриката диаметром 10 мм. По результатам измерений (рисунок 7) показано градиентное распределение микротвердости по сечению прутков, что находится в хорошем соответствии с результатами теоретических исследований, описывающих существенно более высокие значения накопленной деформации в приповерхностной области.

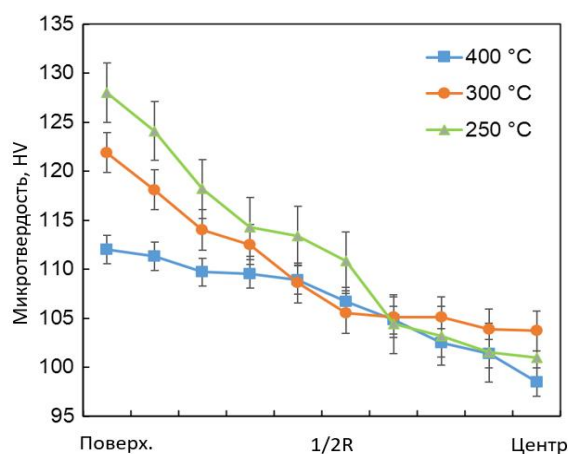


Рисунок 7 - Микротвердость в поперечном сечении прутков (D=10 мм), полученных при различных температурах прокатки.

Максимальная твердость прутка составляет ~ 128 HV для образцов, полученных при температуре РСП 250 °С, что на ~ 22 % выше, чем для исходной заготовки. Увеличение температуры прокатки до 400 °С приводит к незначительному снижению твердости в центральной зоне, в то время как на расстоянии от $1/2R$ прутка до поверхности отмечается более значительное уменьшение твердости (в среднем с 128 HV до 112 HV вблизи поверхности прутков).

Для объяснения причин наблюдаемого распределения микротвердости по сечению были проведены исследования структуры, при этом дополнительные прецизионные исследования были проведены для прутка, полученного при температуре прокатки 300 °С. Как будет показано ниже именно для этой температуры в выбранных условиях прокатки был получен пруток с наиболее высоким уровнем свойств.

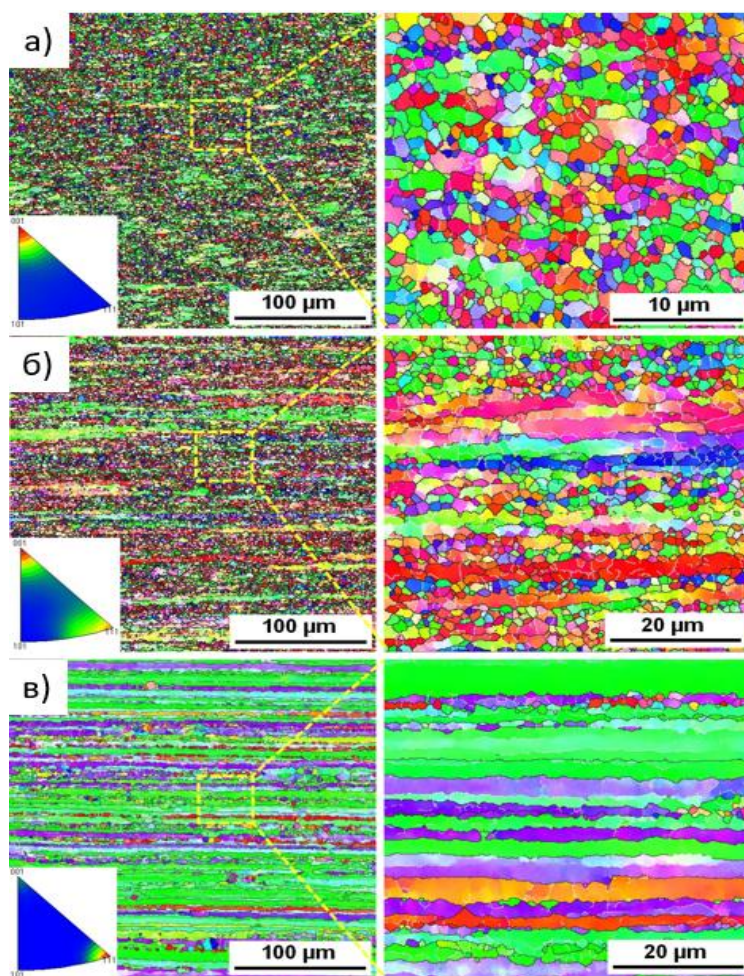


Рисунок 8 - EBSD-микроструктура (цветная карта) ориентации зерен следующих участков обработанного прутка с конечным диаметром 10 мм в продольном сечении: (а) у поверхности, (б) в середине радиуса и (в) вблизи центра. Малоугловые и высокоугловые границы показаны серыми и черными линиями, соответственно.

Зеренная структура алюминиевого сплава 01570 после РСП при 300 °С представлена на рисунке 8. Анализ показал, что материал вблизи поверхности заготовки полностью подвергается динамической рекристаллизации, средний размер зерна в этой области составляет ~ 1 мкм. Накопленная деформация в центральной части прутка согласно математическому моделированию (рисунок 5), даже после последнего прохода ниже в несколько раз, чем на поверхности. Низкая деформация в сочетании с относительно невысокой температурой в этой области и наличием высокой доли дисперсных стабилизирующих частиц фазы $Al_3(Zr,Sc)$ приводят к сохранению деформированной волокнистой структуры в центральной части заготовки. EBSD-анализ на половине радиуса от центра прутка (рисунок 8б) показал, что, хотя некоторые деформированные волокнистые зерна все еще различаются, большая часть структуры преимущественно рекристаллизованная с образованием обширной сети малоугловых границ внутри зерен. Средний размер зерна в этой части несколько больше, чем в приповерхностной области, и составляет около 2 мкм. Таким образом, на основании полученных данных EBSD можно сделать вывод о том, что за счет сочетания специфического вида деформации и распределения напряжений происходит формирование градиентной зеренной структуры по сечению полученной заготовки. В зоне от поверхности прутка до середины радиуса, где преобладают большие значения сдвиговых деформаций, происходит полная перестройка структуры материала относительно исходного состояния.

Данные по механическим свойствам полученных образцов диаметром 10 мм при испытаниях на одноосное растяжение представлены на рисунке 9. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами, описанными выше. В частности, прутки, полученные при температуре 250 °С, имеют наибольшую прочность (предел прочности ~ 437 МПа, предел текучести ~ 359 МПа), что соответствует условиям теплой деформации и более высокому деформационному упрочнению. При этом относительное удлинение δ для этого режима снижается до 10-11 % в сравнении со значением, полученным для исходной заготовки (17 %). Повышение температуры прокатки до 400 °С приводит к значительному снижению предела текучести (~ 290 МПа) при максимальном удлинении из всех исследованных режимов, равном примерно 16 %. Полученные результаты связаны с интенсивным развитием процессов рекристаллизации. Оптимальное сочетание свойств наблюдается у образцов, полученных при температуре 300 °С. Прочностные свойства заготовок (предел прочности σ_b ~ 436 МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}$ ~ 350 МПа) практически не уступают полученным для низкотемпературных образцов, а пластичность 15,5 % почти не уступает высокотемпературному образцу. Такое сочетание свойств является прямым следствием развития в полученных прутках описанной выше градиентной структуры.

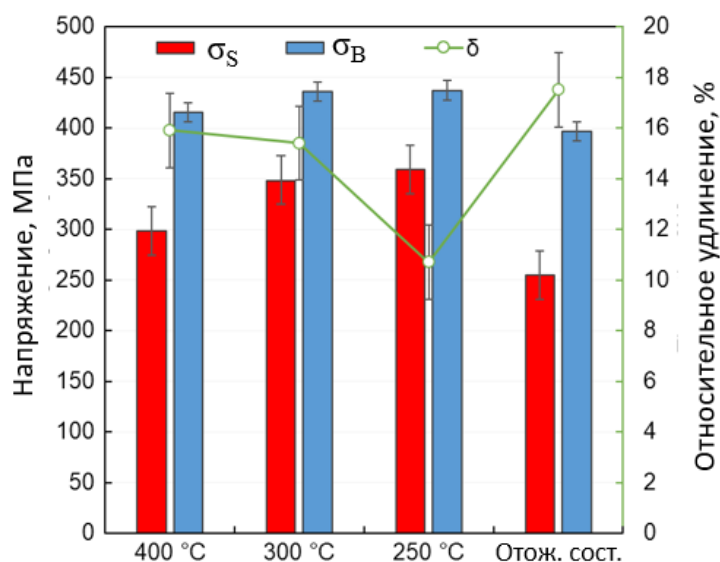


Рисунок 9 - Механические свойства прутков диаметра 10мм после испытаний на одноосное растяжение

По результатам исследований была предложена технологическая схема для изготовления прутков диаметром менее 18 мм из алюминиевого сплава 01570 (рисунок 10).

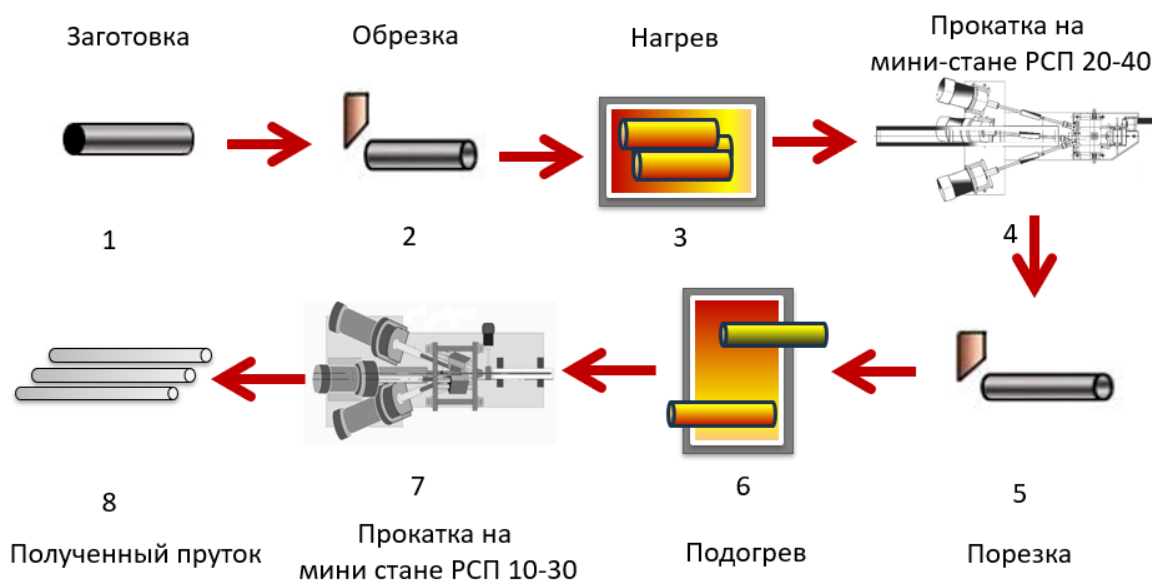


Рисунок 10 – Технологическая схема для изготовления прутков малого диаметра из алюминиевого сплава 01570 методом РСП

В четвертой главе выполнен анализ процесса РСП опытных алюминиевых сплавов системы Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn (таблица 5).

Испытания на реологические свойства новой группы сплавов проведены на примере сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn (таблица 5) при одноосном сжатии образцов при температурах 300-350-400-450 °C и скоростях деформации 0,1-1-10 с⁻¹.

Цилиндрические слитки диаметром 42 мм из опытных сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn после литья были обработаны методом радиально-сдвиговой прокатки по режиму 42-31-24-17-14-9 мм (суммарная степень деформации ~95 %) при температурах 350-450 °С на мини-станах РСП 20-40 и РСП 10-30.

С целью оценки технологической пластичности новых сплавов процесс РСП был проведен на примере сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn при повышенной температуре 450 °С, обеспечивающей получение качественных прутков. Микроструктура в поперечном и продольном сечении прутка диаметром 9 мм после радиально-сдвиговой прокатки сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn при 450 °С представлена на рисунке 11. Можно видеть характерную для эвтектических сплавов деформированную структуру, состоящую из дендритов алюминиевого твердого раствора и эвтектических колоний по границам дендритных ячеек, вытягивающихся в направлении прокатки. Согласно ранее полученным результатам эвтектика в сплавах данной группы образована интерметаллидным соединением $Al_4(Ca,La)$, объемная доля которого достигает ~10 %.

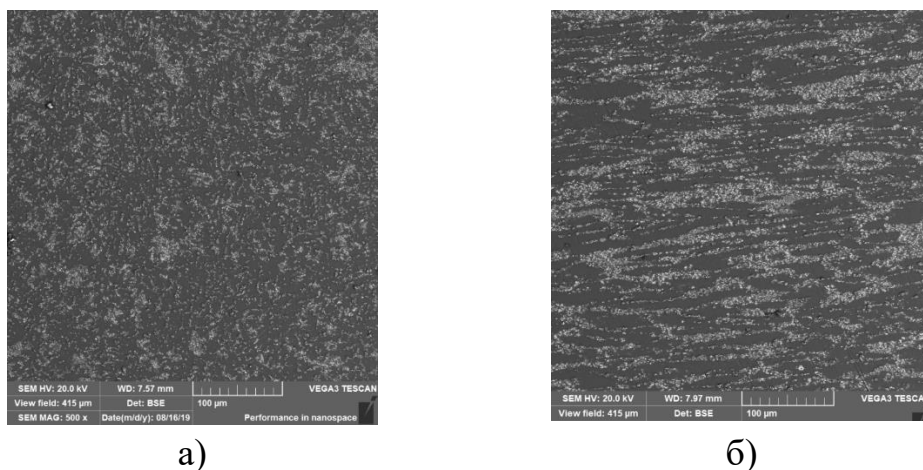


Рисунок 11 - Микроструктура в поперечном (а) и продольном (б) сечении заготовок, полученных после радиально-сдвиговой прокатки сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn при 450 °С

Анализ механических свойств полученных прутков после испытаний на одноосное растяжение показал среднюю прочность (предел прочности ~160 МПа) при высокой пластичности, достигающей более 17 %.

На основе полученных данных по результатам прокатки при 450 °С было принято решение снизить температуру РСП до 400 и 350 °С. В процессе деформационной обработки методом РСП сплавы с концентрацией лантана 0,5 и 1,0 масс. %, аналогично ранее изученному сплаву Al-3Ca-2La-1,5Mn, также продемонстрировали высокую технологичность в процессе РСП даже при температуре 350 °С. Механические свойства прутков после РСП изучаемых

опытных сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn после прокатки при более низкой температуре (350 °С) представлены в таблице 6. Можно видеть, что при понижении температуры прокатки до 350 °С прочные свойства сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn в сравнении с температурой РСП 450 °С увеличиваются более, чем на 50 %. При этом снижение концентрации лантана в сплаве мало влияние на прочностные свойства, приводя к существенному повышению пластичности. Следует отметить, что механические свойства данных сплавов можно сравнить со сплавами системы 6XXX (сплав 6063- EN -755-2) (таблица 6). Предел прочности и относительное удлинение сплава 6063 уступают сплавам системы Al-Ca-La-Mn, но предел текучести выше. А после термообработки Т66 (естественное старение), предел прочности сплава 6063 незначительно (3,8 %) выше, чем у сплава Al-3Ca-2La-1,5Mn, предел текучести выше на 17,6 %, при этом относительное удлинение меньше на 3,4 %. Поскольку для новых сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn для достижения таких механических свойств не требуется упрочняющей термической обработки, при производстве такое преимущество приведет к экономии времени и энергии и соответствующему снижению стоимости продукции.

Таблица 5 – Химический состав экспериментальных сплавов

Сплав	Концентрация масс. %					
	Al	Ca	La	Mn	Si	Fe
Al-3Ca-2La-1,5Mn	Ост.	3,30	2,24	1,26	0,1	0,07
Al-3Ca-1La-1,5Mn	Ост.	3,14	1,05	1,38	0,1	0,07
Al-3Ca-0,5La-1,5Mn	Ост.	3,14	0,53	1,28	0,1	0,05

Таблица 6 – Сравнение механических свойств алюминиевых сплавов системы Al-Ca-La-Mn после РСП при температуре 350 °С со сплавом 6063 (EN-755-2).

№	Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	Al-3Ca-0,5La-1,5Mn	232	161	18,2
2	Al-3Ca-1La-1,5Mn	231	158	23,1
3	Al-3Ca-2La-1,5Mn	240	166	13,4
4	6063 (Т6)	215	170	10,0
5	6063(Т66)	245	200	10,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для изученных алюминиевых сплавов, включающих марочный сплав 01570 и опытные сплавы на базе системы Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn, продемонстрирована и обоснована возможность изготовления качественных прутков диаметров менее 18 мм с высоким уровнем механических свойств с использованием метода радиально-сдвиговой прокатки (РСП) при варьируемых режимах деформационной обработки.

2. Для экспериментальных сплавов проведены механические испытания для определения реологических свойств, с использованием которых методом конечно-элементного математического моделирования, реализованного в программе QForm, изучено влияние варьируемых параметров деформационной обработки (температура, скорость и степень деформации) на напряженно-деформированное состояние (накопленная степень деформации, характер и величина действующих напряжений) и распределение температурного поля в очаге деформации в процессе получения прутков малых диаметров методом радиально-сдвиговой прокатки.

3. На основании анализа траекторий истечения деформируемого металла в очаге деформации выявлены и описаны особенности процесса радиально-сдвиговой прокатки и их влияние на параметры формоизменения. Поверхностные слои металла характеризуются цикличностью изменения параметров температуры и напряжений, амплитуда которых зависит от управляемых технологических факторов (температура и скорость прокатки, режим обжатий), а центральные слои подвержены монотонному изменению.

4. Показано, что изменение температурного поля в очаге деформации в процессе РСП изучаемых сплавов носит сложный характер, связанный с интенсивным деформационным разогревом и одновременным теплообменом заготовки с инструментом и окружающей средой. Установлено, что при характерной для сплавов типа 01570 температуре деформации 400 °С практически все поперечное сечение заготовки имеет повышенную температуру 410-420 °С. При снижении температуры деформации до 300 и 250 °С зоны нагрева локализуются в кольцевой зоне, приближенной к поверхности, тогда как центральная часть имеет более низкую температуру.

5. На основе расчетных и экспериментальных исследований произведено обоснование режима деформационной обработки экспериментальных сплавов для получения прутков диаметров менее 18 мм методом РСП. В частности, для марочного сплава 01570 предложена технологическая схема, включающая горячую радиально-сдвиговую прокатку при начальной температуре исходной заготовки 250-400 °С, угле подачи 20 °, угле раскатки 7 °, среднем коэффициенте выдержки за проход 1,8 и частоте вращения валков 60-100 об/мин. Для опытных модельных сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn произведено изучение возможности получения

прутков методом РСП при температурах 250-450 °С, угле подачи 20 °, угле раскатки 7 °, среднем коэффициенте вытяжки за проход 1,8 и частоте вращения валков 60-100 об/мин. Показано, что во всем изученном диапазоне режимов возможно получение требуемых цилиндрических прутков без видимых дефектов геометрии или структуры металла, но отличающихся уровнем механических свойств.

6. Анализ влияния варьируемых параметров деформационно-термической обработки на структуру получаемых заготовок показал, что РСП сплавов приводит к формированию градиентной зеренной структуры. В частности, приповерхностные слои сплава 01570, подвергнутого РСП при 300 °С, характеризуются образованием рекристаллизованной мелкозернистой структуры со средним размером зерна менее 1 мкм, тогда как вблизи центра прутка наблюдается формирование деформированной волокнистой структуры зерен. Сохранение дисперсной рекристаллизованной структуры в приповерхностных слоях обрабатываемых сплавов является прямым следствием высокой гетерогенности структуры, образованной наночастицами фазы L12 в сплаве 01570 и эвтектическими частицами фазы Al₄(Ca,La) в сплавах на основе системы Al-Ca-La-Mn.

7. На основе полученных данных произведен выбор наиболее перспективных режимов деформационной обработки, обеспечивающей наилучший комплекс механических свойств заготовок из экспериментальных сплавов. В частности, для марочного сплава 01570 предложен режим деформационной обработки, включающий радиально-сдвиговую прокатку при 300 °С со средним коэффициентом вытяжки за проход 1,8 и частоте вращения валков 60-100 об/мин. В результате деформационной обработки получены прутки диаметром 10 мм, обладающие следующим уровнем механических свойств: σ_{\sim} 436 МПа, $\sigma_{0,2}$ ~ 350 МПа, относительное удлинение 15,5 %.

8. Наиболее оптимальное сочетание механических свойств полученных прутков из сплавов Al-3Ca-(0,5-2)La-1,5Mn установлено в случае РСП при минимально рассмотренной начальной температуре исходной заготовки 350 °С, среднем коэффициенте вытяжки за проход 1,8 и частоте вращения валков 60-100 об/мин, обеспечивающих достижение в деформированном полуфабрикате конечного диаметра 9 мм следующего сочетания механических свойств: σ_{\sim} 230-240 МПа, $\sigma_{0,2}$ 160-165 МПа и относительное удлинение 13-23 %. Полученный уровень свойств прутка после РСП близок со свойствами прессованных прутков из марочного сплава типа 6063 после полного цикла упрочняющей термической обработки, включающей закалку и старение.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в изданиях, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук»:

1. Gamin Yu.V., Galkin S.P., **Nguyen X. D.**, Akopyan T.K. Analysis of Temperature-Deformation Conditions for Rolling Aluminum Alloy Al–Mg–Sc Based on FEM Modeling// Non-Ferrous Metals, 2022, Vol. 63, №. 4, pp. 417-425 (*перечень SCOPUS*).
2. Letyagin N.V., Shurkin P.K., **Nguyen Z.**, Koshmin A.N. Effect of Thermodeformation Treatment on the Structure and Mechanical Properties of the Al₃Ca₁Cu_{1.5}Mn Alloy// Non-Ferrous Metals, 2022, Vol. 122, №. 8, pp. 814-819 (*перечень SCOPUS*).
3. Letyagin N.V., Akopyan T.K., **Nguyen Z.**, Sviridovoi T.A., Koshmin A.N., Aksenova A.A. Influence of La on the microstructure and mechanical properties of deformed alloys based on the (Al) + Al₄(Ca, La) system// Physics of Metals and Metallography, 2023, Vol. 124, pp. 84-90 (*перечень SCOPUS*);
4. **Nguyen S. Z.**, Gamin Yu.V., Akopyan T.K., Kin T. Yu The Deformation Behavior and Microstructure of Al-6Mg-0.3Sc Aluminum Alloy under Hot Deformation Conditions// Physics of Metals and Metallography, 2022, Vol. 123, №. 11, pp. 1176-1184 (*перечень SCOPUS*).
5. Torgom K. Akopyan, Nikolay A. Belov, Nikolay V. Letyagin, Stanislav O. Cherkasov and **Xuan D. Nguyen**. Description of the New Eutectic Al-Ca-Cu System in the Aluminum Corner//Metals, 2023, vol. 13, PP. 802 (*перечень SCOPUS*).