

На правах рукописи



Фахретдинова Эльвира Илдаровна

**РАЗРАБОТКА НОВОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА  
ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ  
ПОЛУФАБРИКАТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, **Рааб Георгий Иосифович**

Официальные оппоненты:

**Сосенушкин Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», кафедра «Системы пластического деформирования», профессор

**Соколов Руслан Евгеньевич**, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Обработка металлов давлением», доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск).

Защита состоится 14 апреля 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Гильманшина Татьяна Ренатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из крупнейших отраслей промышленности является электроэнергетика. Известно, что провода для высоковольтных линий электропередач и самонесущие изолированные провода производят преимущественно из алюминиевой катанки и сплавов на основе алюминия. Важными характеристиками проводов являются прочность и электропроводность. Обеспечение условий одновременного увеличения указанных характеристик алюминиевых сплавов является важной задачей, которая может быть решена за счет формирования в проводниковых материалах ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Наиболее распространенным методом ИПД, используемым для получения металлов и сплавов с УМЗ структурой, является равноканальное угловое прессование (РКУП). На его основе в последнее время разработано несколько модифицированных методов, например, таких как РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК) и РКУП по схеме «Конформ» (РКУП-К). Эти методы направлены на частичное устранение недостатков присущих классическому методу РКУП, таких как необходимость многократного повторения циклов обработки материала и низкий коэффициент использования материала (КИМ). Однако даже метод РКУП-К, обеспечивающий высокий КИМ при получении длинномерных полуфабрикатов и высокий уровень физико-механических свойств, не исключает необходимости применения многоциклового обработки, что обуславливает повышенную трудоемкость процесса и увеличивает издержки на энергозатраты.

**Степень разработанности темы.** Известно, что алюминиевую катанку получают на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) методом непрерывного литья и прокатки. Однако получение катанки повышенной прочности из алюминиевых сплавов на ЛПА ограничено температурными условиями обработки. Эти обстоятельства делают актуальными исследования в области создания новых технологий получения алюминиевых полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и удельной электропроводимости.

**Объектом исследований** в работе является алюминиевый сплав марки Al6101 системы Al-Mg-Si, полученный методом Мульти-РКУП-Конформ (Мульти-РКУП-К).

**Целью диссертационной работы** является повышение качества длинномерных полуфабрикатов алюминиевого сплава электротехнического применения за счет разработки комплекса новых технических и технологических решений с использованием преимуществ интенсивной пластической деформации.

Для достижения данной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Моделирование процесса Мульти-РКУП-К в среде программного комплекса Deform-3D с целью выявления особенностей течения металла в зависимости от геометрических параметров оснастки.
2. Теоретические исследования процесса Мульти-РКУП-К для определения энергосиловых параметров и обоснования технологических режимов получения длинномерных полуфабрикатов;
3. Изучение микроструктуры, механических свойств и удельной электропроводимости длинномерных полуфабрикатов из сплава Al 6101 после обработки методом Мульти-РКУП-К.
4. Разработка комплекса технических и технологических решений, обеспечивающих получение алюминиевых полуфабрикатов с повышенными физико-механическими свойствами.

#### **Научная новизна.**

1. На основании результатов компьютерного моделирования установлена закономерность влияния геометрических параметров канала прессования на однородность деформированного состояния и силовые характеристики при новом процессе Мульти-РКУП-К.
2. Разработана методика расчета силовых параметров нового процесса интенсивной пластической деформации Мульти-РКУП-К.
3. Получены полуфабрикаты из сплава Al6101 системы Al-Mg-Si с новым комплексом прочностных свойств и электропроводимости.

#### **Практическая значимость.**

1. Получены длинномерные полуфабрикаты из сплава Al6101 системы Al-Mg-Si с повышенным комплексом физико-механических свойств за счет сформированной УМЗ структуры.
2. Создано программное обеспечение для расчета силы прессования процесса Мульти-РКУП-К при проектировании технологии получения длинномерных полуфабрикатов с УМЗ структурой.
3. Разработаны технологические режимы получения катанки из сплавов системы Al-Mg-Si, на примере сплава марки 6101, с повышенным комплексом физико-механических свойств на опытно-промышленной установке Д400;
4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГАТУ» и используются при чтении курса лекций по дисциплине «Деформационно-термическая обработка материалов» и «Термическая и химико-термическая обработка материалов» по специальности 28.03.02 «Наноинженерия».

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты работы апробированы на предприятии АО «Цветлит».

**Методология и методы исследований.** Работа выполнена с использованием базовых основ и традиционных методик обработки металлов давлением, современных виртуальных программных продуктов, в частности Deform-3D, статистического анализа данных, а также универсальных методов исследований структуры и свойств металла.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, планировании экспериментов, выборе методики, в обобщении и научном обосновании результатов и в формулировке выводов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов, разработанных методик и технологий основаны на использовании современных методов исследований алюминиевых сплавов, компьютерного моделирования, опытно-промышленных исследований, статистической обработки результатов, внедрением, а также подтверждены патентами.

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат.РГБ».

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на VI и VIII Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2014, 2016 гг.); The Sixth International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation (г. Метц, Франция, 2014 г.); V Всероссийской конференции по наноматериалам НАНО 2013 (г. Звенигород, 2013 г.); I и II Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (г. Москва, 2014, 2015 гг.); 11th International Congress Machines, Technologies, Materials «МТМ 2014» (г. Варна, Болгария, 2014 г.); Открытой школе-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы» (г. Уфа, 2014 г.); VII - X Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2014-2016 гг.).

**Работа проводилась в рамках выполнения** гранта президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ в области знания НШ-7996.2016.8, проекта РФФИ № 14-08-31301 - мол\_а и проекта Российского Научного Фонда №14-19-01062.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 18 печатных трудах и тезисах докладов, из них 3 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, и в 3 патентах РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п.1,2,3,5 и 6 паспорта специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением (технические науки).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, содержащего 118 источников, и 2 приложения. Основной материал изложен на 143 страницах, включая 10 таблиц и 89 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведена оценка современного состояния производства алюминиевых полуфабрикатов для электротехнической промышленности, обзор свойств сплавов системы АВЕ, выполнен анализ оборудования и методов для получения полуфабрикатов электротехнического назначения.

При решении поставленной задачи был использован научно-технический потенциал, созданный известными учеными, такими как В.М. Сегал, В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б. Авитцур, Г.Я. Гун, В.Л. Бережной, Н. Н. Довженко, М.З. Ерманок, И.Л. Перлин, И.П. Ренне, Л.Г. Степанский, В.М. Салганик, В.Г. Шеркунов, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, В.Н. Щерба, Е.Н. Сосенушкин, Ю.В. Горохов, Ф.С. Гилевич, Р.З. Валиев и др.

На основании проведенного анализа поставлены цели и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** даны результаты исследований, направленных на рационализацию геометрических параметров оснастки и анализ напряженно-деформированного состояния металла процесса Мульти-РКУП-К с использованием компьютерного моделирования. Моделирование проводили в программном прикладном комплексе Deform-3D.

Авторами разработан новый метод ИПД – Мульти-РКУП-К, обеспечивающий высокий уровень накопленной деформации  $e$  за один цикл обработки ( $e \geq 3$ ) и интенсивное измельчение исходной структуры.

Процесс реализуется следующим образом (рисунок 1): заготовка 1 подается на вход рабочего канала, образованный прямоугольной гравюрой вращающегося рабочего колеса 2 и неподвижным прижимом 3. Посредством вращения рабочего колеса 2 и возникающих активных сил трения между гравюрой колеса 2 и заготовкой 1 обеспечивается сила прессования, приводящая к продвижению заготовки 1 через рабочий канал. Рабочий канал в выходной части имеет два ступенчатых перегиба, что обеспечивает последовательную трехкратную деформацию сдвигом заготовки 1 в условиях непрерывной обработки.

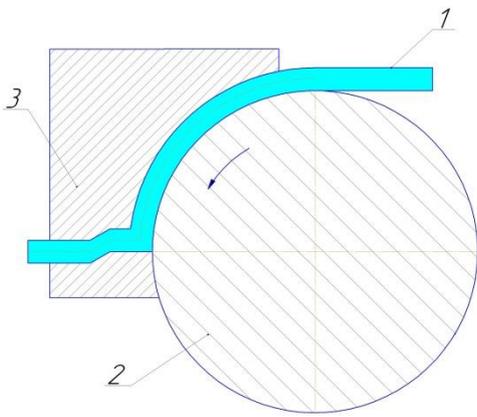


Рисунок 1 – Схема Мульти-РКУП-К: 1- заготовка, 2- рабочее колесо, 3 – прижим

Алгоритм, по которому проводили компьютерное моделирование процесса Мульти-РКУП-К в программном комплексе Deform-3D, выполняли в три этапа: 1) Выбор углов пересечения каналов; 2) Выбор радиусов сопряжения каналов; 3) Исследование процесса Мульти-РКУП-К с рациональными геометрическими параметрами.

Данный алгоритм был выбран исходя из того, что при РКУП геометрические параметры деформирующей оснастки оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние

(НДС) и характер течения обрабатываемого материала.

Метод Мульти-РКУП-К включает в себя последовательную традиционную обработку РКУП-К и обработку в параллельных каналах РКУП-ПК, т.е. за один цикл обработки реализуется три акта сдвиговой деформации. В таких условиях важно интенсифицировать пластическое воздействие на первой стадии обработки, когда материал обладает максимальным запасом пластичности. Поэтому первый угол пересечения каналов был выбран  $\Phi_1=90^\circ$ , что обеспечивает максимальную сдвиговую деформацию и наиболее благоприятно влияет на формирование УМЗ структуры в металле. Для последующих сдвигов объективно следует снижать интенсивность воздействия, по причине заметного упрочнения материала после первого акта сдвиговой деформации, и для организации более однородного течения материала в этих условиях. В этой связи последовательное и совмещенное использование схемы прессования в параллельных каналах (РКУП-ПК) наиболее адекватно отвечает этим условиям (рисунок 2). Однако следует провести исследования по получению более рациональной геометрии рабочего канала, в частности, выбора углов пересечения каналов на стадии обработки по схеме РКУП-ПК.

Учитывая, что виртуальный подход позволяет исследовать большое количество вариаций геометрии с минимальными материальными затратами, были выбраны 4 варианта комбинации углов пересечения каналов: 1)  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 90^\circ$  и  $\Phi_3 = 90^\circ$ ; 2)  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 90^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ ; 3)  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 90^\circ$ ; 4)  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ . При этом радиусы сопряжения углов были равны  $R=0,2 \cdot d$ .

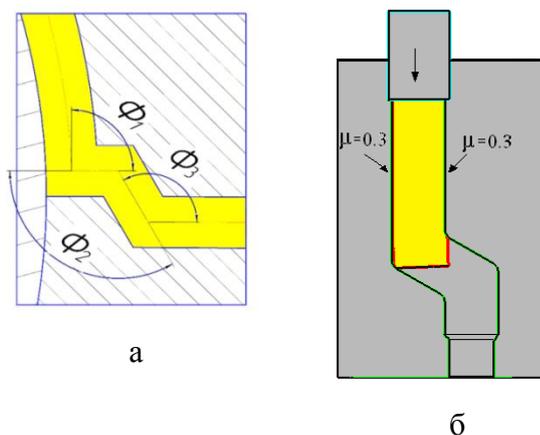


Рисунок 2 – Моделирование углов пересечения каналов: а – очаг деформации при Мульти-РКУП-К; б – схема процесса РКУП-ПК в комплексе Deform-3D

редукции на выходе заготовки из канала.

Выявлено, что при пересечении каналов под углами  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$  разность интенсивности деформации между центром и краями образца составляет  $e = 0,51$ ; для варианта пересечения углов  $\Phi_2=120^\circ$ ,  $\Phi_3=120^\circ$  разность составляет 0,18. При применении остальных вариантов сочетания углов разность составляла 0,2...0,58. Соответственно, при  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$  распределение накопленной деформации более однородное по сравнению с другими вариантами.

Установлено, что максимальная степень деформации  $e = 3,2$  достигается при сочетании углов  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$ , но при этих углах возникают максимальные контактные напряжения порядка 3620 МПа (без редукции) и 5180 МПа (с редукцией), значительно превышающие предельно допустимые напряжения на инструменте порядка 1300 МПа, поэтому РКУП-ПК с этими углами пересечения каналов нельзя реализовать на практике.

Минимальные контактные напряжения возникают при сочетании углов  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$  и составляют 1310 МПа (без редукции), также в этом случае наблюдается низкое значение силы деформирования (0,247 МН), что, следовательно, позволяет снижать мощность используемого оборудования и энергозатраты.

Исследование температурных полей показало, что деформационный прирост температуры варьируется от 66 до 144 °С, при этом минимальный прирост температуры равный 66 °С наблюдается при сочетании углов  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$ .

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что при РКУП-ПК сила противодействия способствует более полному заполнению каналов и, соответственно, реализации схемы простого сдвига, но увеличивает контактные напряжения на оснастке ~ в 2

Коэффициент трения был принят равным  $\mu = 0,3$ , что соответствует наиболее рациональным условиям в процессе Мульти-РКУП-К. Скорость перемещения пуансона была задана равной 3,7 мм/с, соответствующей окружной скорости при реализации Мульти-РКУП-К.

Известно, что противодействие при процессах РКУП играет положительную роль, поэтому в данной работе было изучено также влияние противодействия на условия обработки, созданного за счет применения

раза, прирост температуры и силу деформирования  $\sim$  в 1,5 раза. Поэтому редукцию заготовки рекомендуется проводить как отдельную операцию после обработки Мульти-РКУП-К.

Следовательно, рациональным вариантом сочетания углов для процесса РКУП-ПК является  $\Phi_2 = 120$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ .

После рационализации углов пересечения каналов необходимо определить радиусы сопряжений в выходной части каналов. Для снижения многовариантности экспериментов варьировались радиусы сопряжения  $R$  на выходной части канала (рисунок 3), остальные радиусы соответствовали наиболее рациональным значениям для РКУП обработки  $R = 0,2d$ .

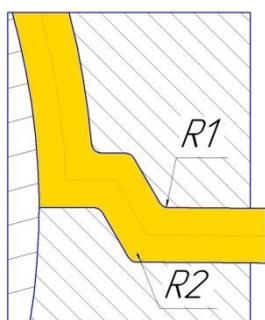


Рисунок 3 – Схема процесса Мульти-РКУП-К, где:  $R1, R2$  – радиусы сопряжения на выходной части канала

В процессе исследований было проанализировано три варианта геометрического исполнения канала прессования. Первый вариант с  $R1 = R2 = 0,2 \cdot d$ ; второй с  $R1 = 0,2 \cdot d, R2 = 0,5 \cdot d$  и третий с  $R1 = R2 = 0,5 \cdot d$ , т.е. радиусы сопряжения канала имеют тенденцию к увеличению.

Из анализа полей скоростей деформации в очагах деформации было отмечено, что увеличение радиусов сопряжения снижает уровень неоднородности скоростей деформации в очаге. Так для варианта №3 по сравнению с вариантом №1 она снизилась в 1.5 раза.

Из анализа силовых условий при деформировании заготовок методом Мульти-РКУП-К видно, что увеличение радиусов сопряжения каналов приводит к снижению крутящего момента на рабочем колесе, разница между вариантом  $R1 = R2 = 0,2 \cdot d$  и вариантом  $R1 = R2 = 0,5 \cdot d$  почти двукратная.

Были исследованы картины распределения интенсивности деформации в поперечном сечении заготовки для оценки однородности поля деформаций, картины (объемные) распределения величин главных напряжений для оценки реализуемой схемы и выявлено, что рациональным вариантом радиусов сопряжения на выходной части канала является вариант  $R1 = R2 = 0,5 \cdot d$ .

Полученные результаты исследований по выбору рациональных геометрических параметров ступенчатого канала прессования позволили перейти к компьютерному моделированию процесса Мульти-РКУП-К в целом, с возможностью оценки схемы деформации, анализа НДС и температурного поля заготовки, контактных напряжений на инструменте.

Были проведены исследования, оценивающие схему деформации. В качестве критерия оценки схемы деформации был использован коэффициент Лоде-Надаи, который был рассчитан по формуле (1):

$$\mu_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа, для трех последовательных очагов сдвиговой деформации. Главные напряжения были взяты из результатов компьютерного моделирования.

Схема исследований и распределение величины коэффициента Лоде-Надаи по средней линии тока заготовки представлены на рисунке 4.

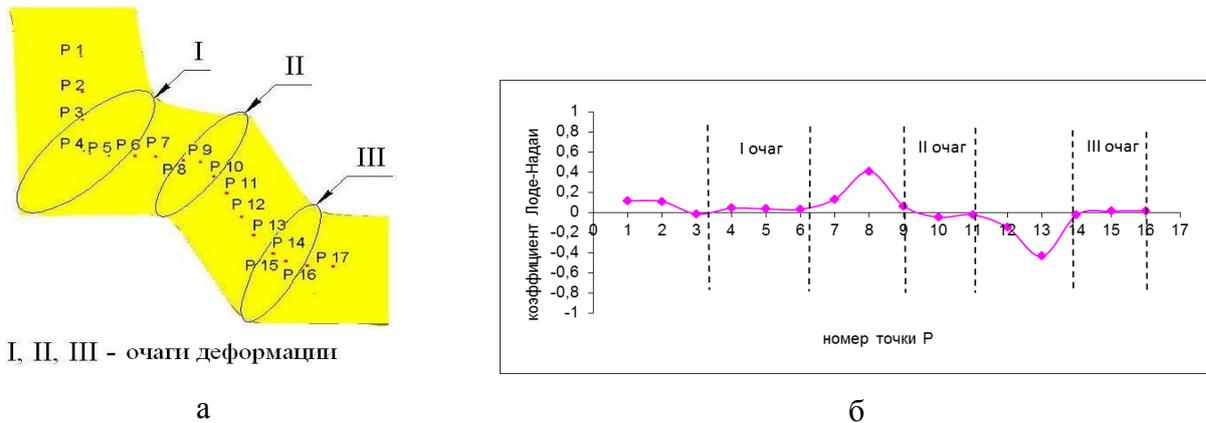


Рисунок 4 – Оценка схемы деформации: а – схема исследования; б – распределение величины коэффициента Лоде-Надаи по средней линии тока

Как видно из рисунка 4, в центральной области очагов деформации (I,II,III) преобладает схема сдвига, о чем свидетельствуют полученные значения коэффициента Лоде – Надаи близкие к 0. В областях между очагами (P1-P2) и (P6-P8) преобладает схема сжатия, а в (P11-P13) – схема растяжения.

Анализ НДС по результатам моделирования показал, что в осесимметричной области деформируемой заготовки преобладают сжимающие напряжения. Схемы сжатия, как правило, способствуют получению бездефектных полуфабрикатов. В горизонтальном канале формируется область с незначительными растягивающими напряжениями до  $\sim 10$  МПа (рисунок 5), что значительно меньше напряжения течения ( $\sim 150$  МПа) сплава при температуре деформации. Следовательно, при обработке методом Мульти-РКУП-К преобладает «мягкая» схема напряженного состояния.

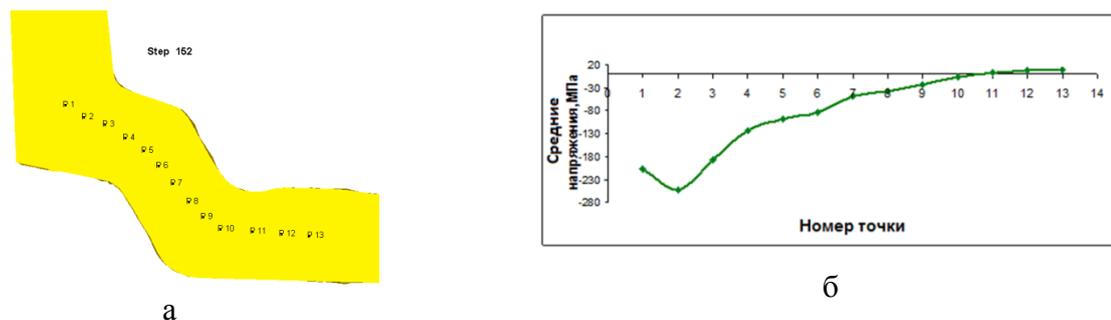
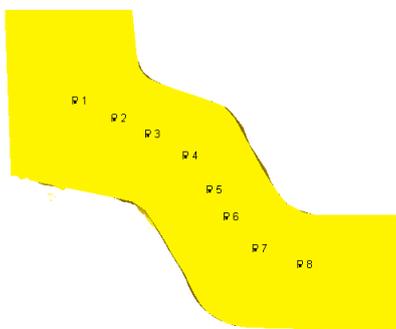
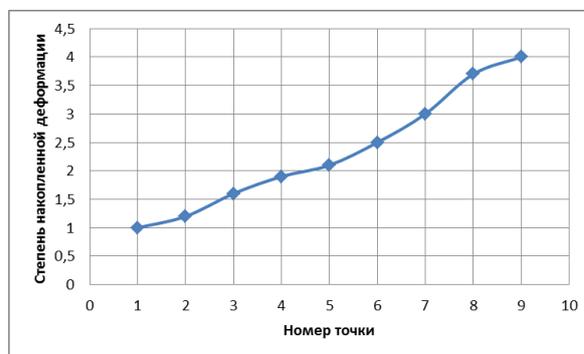


Рисунок 5 – Анализ напряженного состояния: а – схема исследования заготовки; б – график распределения напряжений по линии тока в продольном сечении образца

Из анализа деформационной картины (рисунок б) следует, что в продольном сечении заготовки накопленная деформация после прохождения каждого очага деформации увеличивается и в выходной части канала составляет  $e = 3,5 \dots 4$  единиц. Поэтому можно утверждать, что сдвиговой характер в очагах деформации и высокий уровень накопленной деформации за один цикл обработки являются значимой предпосылкой для формирования УМЗ структуры.



а



б

Рисунок 6 – Анализ деформированного состояния: а – картина распределения степени деформации; б – график распределения степени деформации в продольном сечении образца

По результатам моделирования выявлено, что максимальные контактные напряжения составляют 930 МПа и образуются при прохождении первого очага деформации. Исходя из данных, был выбран материал штамповой оснастки – высококачественная износостойкая инструментальная штамповая сталь 4Х4ВМФС (ДИ-22).

На рисунке 7 показано изменение температуры во время деформации: после прохождения I очага деформации металл нагревается до 120 °С, после прохождения II очага деформации – до 217°С, и после III очага деформации – до 258 °С.

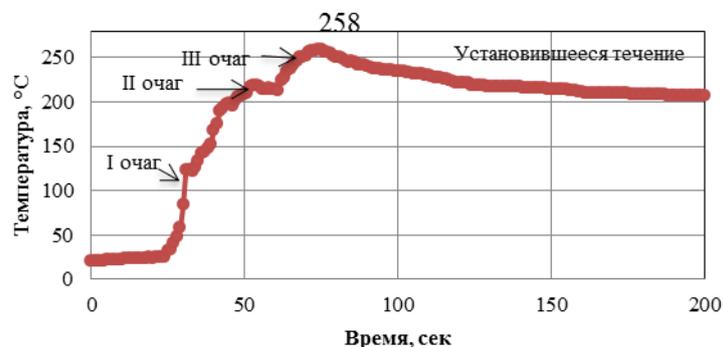


Рисунок 7 – Деформационный разогрев в процессе деформации

Следовательно, заготовка разогревается с  $\sim 20$  до  $\sim 260$  °С, что может неблагоприятно отразиться на формировании повышенных свойств в алюминиевом сплаве, поэтому рекомендуется при практической реализации метода Мульти-РКУП-К проводить охлаждение матрицы и заготовки.

**Третья глава** посвящена теоретическим расчетам исследуемого процесса Мульти-РКУП-К, в частности, разработана аналитическая формула для расчета силовых параметров, с помощью которой построена зависимость величины крутящего момента от таких параметров, как угол пересечения каналов и коэффициент трения. С помощью разработанной формулы рассчитана зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения. Также в данной главе представлены результаты исследований деформированного состояния заготовки методом делительной сетки.

На рисунке 8 показана система сил, действующих на заготовку и инструмент в процессе Мульти-РКУП-К. Простые сдвиги в этом процессе осуществляются за счет воздействия касательных сил  $T$  вдоль линий сдвигов. На линиях сдвига действует равнодействующая гидростатических давлений  $N$ . Начальная величина осевой силы в первом канале, необходимая для деформирования заготовки через первый очаг деформации, равна  $P_{z0}$ . На нижних стенках каналов действует нормальная сила  $F_N$  и сила трения  $\mu F_N$ , где  $\mu$  – коэффициент трения.

Принято, что первый угол пересечения каналов равен  $2\varphi_1$  ( $45^\circ \leq \varphi_1 \leq 60^\circ$ ), второй и третий равны между собой и составляют  $2\varphi_2 = 2\varphi_3$  ( $45^\circ \leq \varphi_2 = \varphi_3 \leq 60^\circ$ ).  $P_{01}, P_{02}, P_{03}$  – удельные силы противодействия, необходимые для полного заполнения каналов,  $k_i = \sigma_s$  – предел текучести материала для каждого очага деформации ( $i = 1..3$ ) соответственно уравнению реологии.

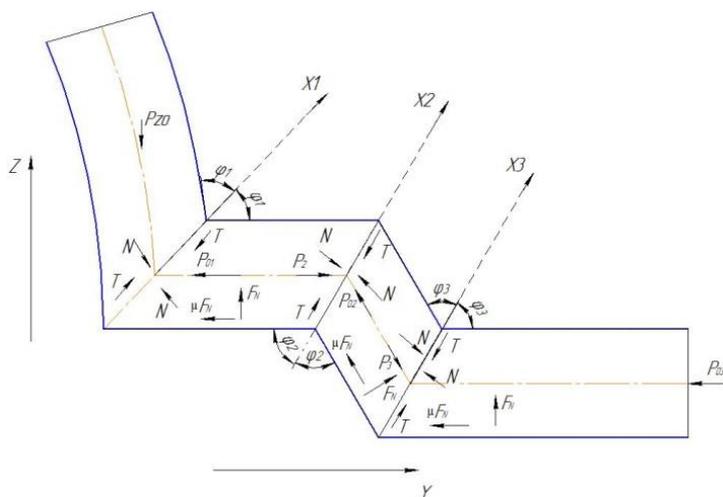


Рисунок 8 – Схема действия сил на заготовку

Выявлены аналитические зависимости удельной силы, необходимой для деформирования заготовки, от геометрии канала и трибологических условий (коэффициента трения) (2-4). Данные зависимости могут быть использованы при деформации металлических материалов.

$$P_3 = \frac{P_{03} - k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 (1 + \mu)}{(1 - \mu) \cdot \cos \varphi_3} + \frac{k_3}{\sin \varphi_3}, \quad (2)$$

$$P_2 = -\left(\frac{2k_2}{\sin 2\varphi_2} + P_{02}\right) \cdot \frac{\cos \varphi_2 + \sin 2\varphi_2}{1 - \mu} + 2k_2, \quad (3)$$

$$P_{z0} = \frac{P_{01} + k_1(\mu + \operatorname{ctg} \varphi_1)}{1 - \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1} + k_1 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1 . \quad (4)$$

При помощи разработанной методики для расчета силовых параметров, были вычислены зависимости величины крутящего момента от углов пересечения  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  (рисунок 9) и от коэффициента трения. Были рассмотрены диапазоны углов пересечения от 90 до 170 °, на графике указаны половины углов пересечения каналов. Коэффициент трения был принят по закону Кулона, поэтому интервал изменения составил от 0 до 0,5.

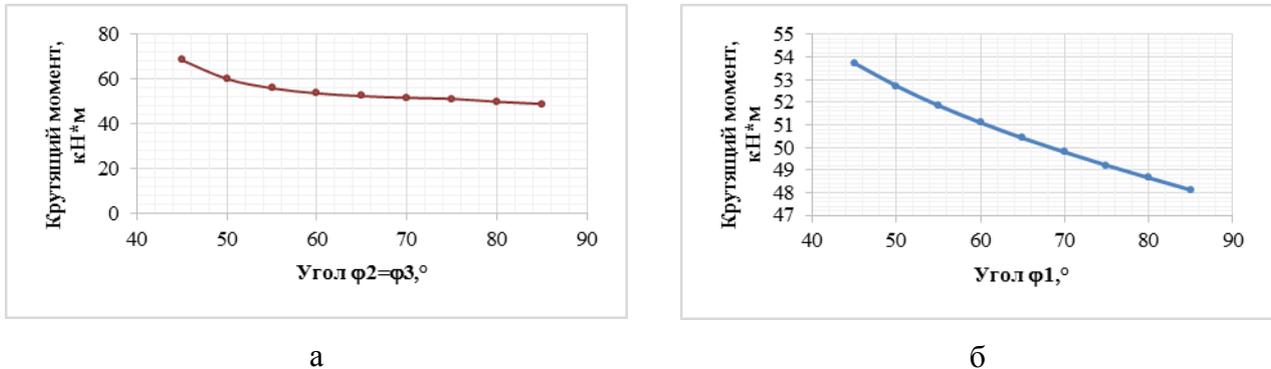


Рисунок 9 – Зависимость величины крутящего момента от величины углов:  
а – углов  $\varphi_2 = \varphi_3$  при  $\varphi_1 = 45^\circ$ ; б – угла  $\varphi_1$  при  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$

Как видно из рисунка 9 а, при увеличении углов пересечения каналов во втором и третьем очагах деформации величина крутящего момента уменьшается, при этом до достижения угла  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$  момент интенсивно падал, а после  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$  стабилизировался. Поэтому были исследованы углы в диапазоне  $90^\circ < 2\varphi_2 = 2\varphi_3 < 120^\circ$ .

Из рисунка 9 б видно, что для случая, когда  $2\varphi_2 = 2\varphi_3 = 120^\circ$ , увеличение угла пересечения  $2\varphi_1$  с 90 до 170 ° приводит к снижению величины крутящего момента на 12 %. Учитывая, что крутящий момент незначительно снижается с увеличением угла  $2\varphi_1$ , а интенсивность воздействия очень существенна, наиболее целесообразно использовать угол  $2\varphi_1$  равный 90 °.

Также выявлено, что с увеличением коэффициента трения крутящий момент на рабочем колесе линейно возрастает.

Одним из важных факторов при разработке новых методов, основанных на процессе Конформ, является угол захвата. Для расчета длины дуги захвата при Мульти-РКУП-К была применена формула (5):

$$l = \frac{2 \cdot P_{\text{ДЕФОРМ}}}{\tau_{\text{СД}} \cdot \mu \cdot a} , \quad (5)$$

где  $l$  – длина дуги захвата;  $P_{ДЕФОРМ}$  – сила деформирования, рассчитанная с помощью методики силовых параметров, описанной выше;  $a$  – ширина канала оснастки;  $\tau_{СД}$  – напряжение сдвига алюминиевого сплава, получено с помощью компьютерного моделирования;  $\mu$  – коэффициент трения.

Построены зависимости длины дуги и угла захвата от коэффициента трения, которые показаны на рисунке 10. Угол захвата был рассчитан с помощью традиционных формул, применяемых при прокатке.

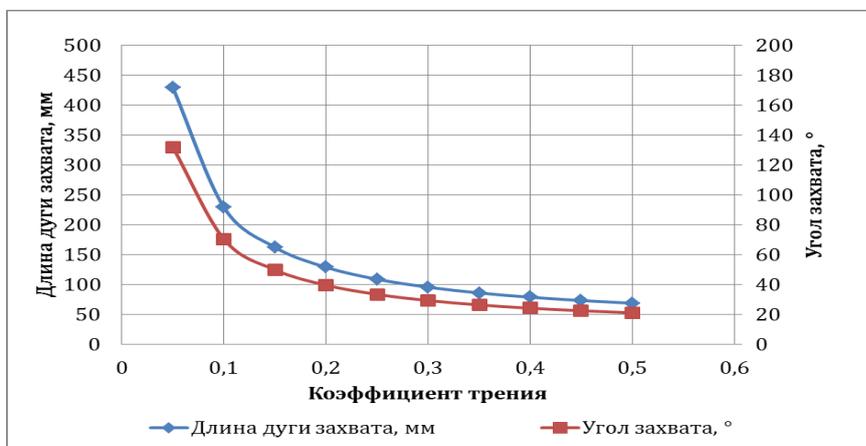
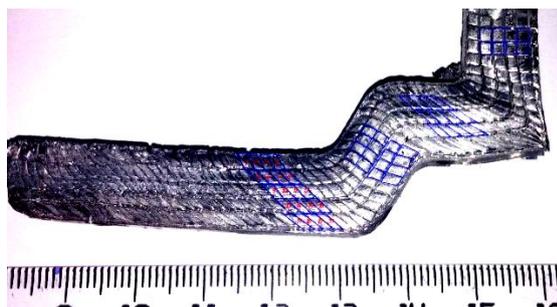


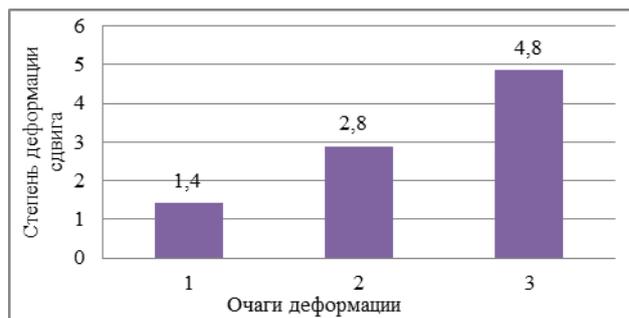
Рисунок 10 – Зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения

Как видно из рисунка 10, с увеличением коэффициента трения уменьшается длина дуги и, соответственно, угол захвата.

Деформированное состояние металлов во многом отвечает за структурное состояние и уровень механических свойств деформируемых металлов. Экспериментальное изучение распределения деформаций было проведено с помощью метода делительных сеток. Материал образца – алюминиевый сплав Al 6101. Общий вид образца после деформации методом Мульти-РКУП-К и характер искажения координатной сетки в диаметральном продольном сечении образца после трех актов сдвига показаны на рисунке 11.



а



б

Рисунок 11 – Исследование деформированного состояния:

а – параметры ячеек ; б – диаграмма величины накопленной степени деформации сдвига при прохождении трех очагов деформации

На рисунке 11 а показано изменение сетки во время деформации Мульти-РКУП-К, ячейки, выбранные для расчета, выделены синим цветом. Ячейки металла меняют геометрическую конфигурацию три раза соответственно трем очагам деформации. Квадратная ячейка после прохождения первого очага становится параллелограммом, после прохождения второго очага идет возврат близкий к исходной геометрии, после третьего – снова параллелограмм, что характерно для схемы РКУП. Видно, что наблюдается некоторая неоднородность деформированного состояния между центральными и периферийными частями заготовки. По результатам проведенных вычислений параметров ячейки представлена диаграмма (рисунок 11 б), где показана динамика накопления деформации в каждом очаге деформации. Видно, что после деформации методом Мульти-РКУП-К накопленная степень деформации составляет 4,8 единиц, что, как правило, приводит к формированию УМЗ структуры с повышенными механическими свойствами.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований метода Мульти-РКУП-К на лабораторном и опытно-промышленном оборудовании. Исследованы технологические параметры, характер течения, особенности формируемой структуры, механические и функциональные свойства полученных алюминиевых образцов (полуфабрикатов).

Первым этапом практической реализации является апробация нового метода на лабораторной установке. Было проведено исследование влияния температуры обработки, смазочного материала и качества поверхности на механические характеристики заготовок, полученных методом Мульти-РКУП-К.

Размеры исходных заготовок: 11 x 11 мм, длина 150 мм. Скорость вращения рабочего колеса 2 об/мин.

В экспериментах было использовано два вида заготовок: с рисками и без рисков. Были выбраны температуры обработки равными 150 и 170 °С и использовано два вида смазочных материалов: быстросохнущая смазка +  $\text{MoS}_2$ +BN и краска + смесь из  $\text{MoS}_2$ +BN.

Для оценки влияния температуры обработки на свойства полученных алюминиевых полуфабрикатов были проведены механические испытания.

Так, при температуре обработки 150 °С на образце №2 было получено высокое значение прочности (253,3 МПа) при применении смазочного слоя, состоящего из быстросохнущей смазки в сочетании со смесью из  $\text{MoS}_2$  и BN. Но на поверхностях образцов (с накаткой и без накатки), полученных при 150 °С, присутствуют дефекты в виде задиров и трещин в отличие от образцов, полученных при 170 °С. Установлено, что подготовка поверхности путем нанесения накатки положительно влияет на качество поверхности и прочность образцов, а увеличение температуры обработки приводит к снижению прочности, но к улучшению качества полуфабрикатов. Стоит отметить, что отсутствие смазочного

материала приводит к формированию на поверхности образца большого количества дефектов. Для дальнейших исследований был выбран образец № 6, полученный при температуре обработки 170 °С и применении смазочного материала, состоящего из быстросохнущей смазки в сочетании со смесью из графита, MoS<sub>2</sub> и BN, в котором наблюдалось сочетание качества поверхности (без дефектов) и достаточно высокого предела прочности 250 МПа.

Электронно-микроскопический анализ показал, что в результате одного цикла Мульти-РКУП-К формируется структура смешанного типа, образованная преимущественно вытянутыми в направлении сдвига субзерен (рисунок 12 а). В структуре также отмечено формирование отдельных участков, содержащих равноосные зерна со средним размером 460 нм. Показано, что измельчение алюминиевой матрицы сопровождается образованием наноразмерных частиц вторичной упрочняющей фазы Mg<sub>2</sub>Si (рисунок 12 б).

Установлено, что в результате обработки заготовок алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si методом Мульти-РКУП-К условный предел текучести ( $\sigma_{0.2}$ ) и предел прочности ( $\sigma_B$ ) увеличились с 120 и 170 МПа до 221 и 243 МПа, соответственно, а электропроводимость (IACS) повысилась с 49,2 до 54,3 % по сравнению с состоянием поставки (Т1).

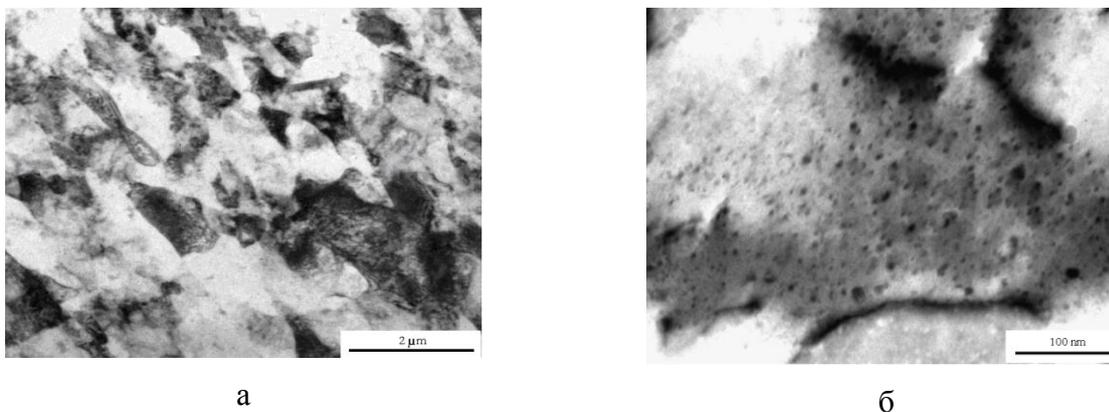


Рисунок 12 – Исследование микроструктуры алюминиевого сплава Al-Mg-Si после обработки Мульти-РКУП-К: а – структура смешанного типа; б – наноразмерные частицы вторичной упрочняющей фазы Mg<sub>2</sub>Si

Проведенные исследования на лабораторной установке позволили установить технологические параметры, которые необходимо учитывать при деформации методом Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании. При проектировании оснастки для практической реализации процесса Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании было последовательно разработано три варианта матриц (рисунок 13). Главные отличия исследуемых вариантов матриц заключаются в следующем:

– первый вариант по профилю гравюры в рабочем колесе больше соответствует используемому профилю гравюры колеса в промышленных экструдерах, реализующих Конформ-процесс;

– второй вариант приближен к геометрии лабораторной конструкции, обеспечивающей получение наиболее максимальных механических свойств методом Мульти-РКУП-К;

– третий вариант отвечает наиболее рациональной геометрии оснастки, учитывающей преимущества первого и второго вариантов.

Исследование было проведено компьютерным моделированием и физическим экспериментом. Выявлено, что при использовании оснастки № 3 были получены максимальная прочность образцов (220 МПа) и на длине заготовки поверхность не имела задиров и заусенцев (рисунок 14). Таким образом, для дальнейших исследований был выбран вариант геометрии матрицы № 3, как наиболее рациональная модификация оснастки.

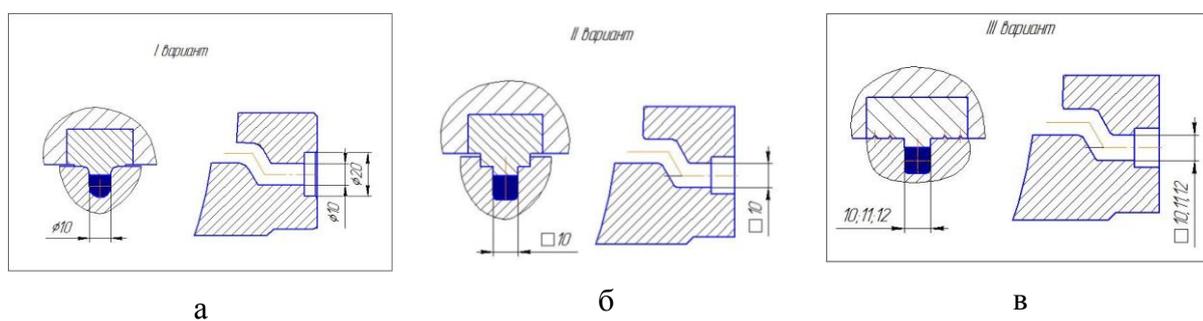


Рисунок 13 – Эскизы вариантов матриц: а – №1; б – №2; в – №3



Рисунок 14 – Типичный вид образца алюминиевого полуфабриката после Мульти-РКУП-К

При обработке были замерены такие параметры, как величина крутящего момента, температура в оснастке, скорость обработки. Величина максимального крутящего момента при скорости обработки 10 об/мин составила 52 кН·м, что не превышает номинальный момент для промышленного оборудования (60 кН·м). Максимальная температура в оснастке составила ~ 103 °С. Учитывая, что на выходе заготовка охлаждается водой, деформационный разогрев находится в пределах допустимых температур.

Также было проведено сравнение значений максимального крутящего момента на рабочем колесе, полученных расчетным методом (формулы 2-4), компьютерным моделированием и экспериментальным путем. Погрешность значений крутящего момента между расчетом и моделированием составила ~ 8 %, между моделированием и экспериментом

~ 4 %, между расчетом и экспериментом ~ 4 %. Следовательно, использование виртуальных методик и расчетной модели для исследования процесса, в частности, крутящего момента на колесе, обеспечивающего силовые характеристики, показывает большую сходимость с реальным физическим экспериментом.

Результаты многочисленных испытаний алюминиевых полуфабрикатов (таблица 1), полученных на опытно-промышленном оборудовании, показали, что временное сопротивление разрыву возросло с  $170 \pm 4$  до  $268 \pm 10$  МПа, то есть на 57 %, а удельная электропроводимость – на 4,9 %, по сравнению с состоянием поставки (Т1).

Таблица 1 – Физико-механические свойства алюминиевых образцов после обработки Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании

Режим обработки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Удельная электропроводимость IACS**, %
Состояние поставки (Т1) *	170±4	120±3	23,0±1	49,2±0,5
Мульти РКУП-Конформ	210 ± 11	160±34	11,5±1	50,1±0,5
Мульти РКУП-Конформ + волочение (Ø 9,5 мм)	268±10	243±9	11,5±1	54,1±0,5
* Данные из сертификата ТУ 16-705.493-2006 ** IACS – «Международный стандарт по отожженной меди»				

Следовательно, метод Мульти-РКУП-К является весьма эффективным для создания улучшенного комплекса физико-механических свойств в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si в опытно-промышленных условиях.

Вариант опытно-промышленной реализации технологической линии по производству катанки с УМЗ структурой методом Мульти-РКУП-К включает в себя последовательное соединение следующих устройств: разматывающее устройство, приемное устройство, установка для правки, установка для мойки, установка для Мульти-РКУП-К, установка для охлаждения и формирования круглого профиля, установка для намотки Деформирующим оборудованием служит промышленный экструдер с модифицированным формообразующим узлом. Представленный подход не содержит специального оборудования, что обеспечивает эксплуатационную надежность линии.

**В заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено компьютерное моделирование разработанного процесса Мульти-РКУП-К в программном комплексе Deform-3D и установлено, что геометрические параметры формообразующей оснастки оказывают большое влияние на напряженное и деформированное состояние заготовки, силовые и контактные условия. В процессе исследований выявлены следующие закономерности: увеличение углов пересечения каналов приводит к снижению однородности деформированного состояния, увеличению напряжений и силовых условий обработки, обратная закономерность наблюдается при увеличении радиусов сопряжения ступенчатого канала прессования.

2. Разработана наиболее рациональная конструкция канала для прессования алюминиевого сплава Al 6101, включающая следующее сочетание углов –  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$  при  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$ .

При этом по сравнению с вариантом  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$  при  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$  наблюдается:

- снижение неоднородности накопленной деформации в три раза;
- снижение крутящего момента на рабочем колесе почти в два раза;
- снижение уровня растягивающих напряжений в очаге деформации до 10-20 МПа;
- снижение разности скоростей деформации в очаге деформации в 1,5 раза.

3. В результате исследования напряженно-деформированного состояния при Мульти-РКУП-К выявлено, что:

- в очагах деформации преобладает схема сдвига;
- накопленная степень деформации достигает  $e = 3,5 \dots 4$  единиц, что прогнозирует получение образцов с высокими механическими свойствами.
- максимальные контактные напряжения локализованы в первом очаге деформации и составляют 930 МПа.

4. Установлено, что максимальный деформационный разогрев составляет около  $260^\circ\text{C}$  и при практической реализации процесса следует проводить охлаждение матрицы и заготовки на выходе из канала матрицы.

5. Дополнительная редуцирующая обработка заготовки на выходе из канала прессования увеличивает контактные напряжения на оснастке ~ в 2 раза, прирост температуры и силу деформирования ~ в 1,5 раза, поэтому редуцирование заготовки рекомендуется проводить как отдельную операцию после обработки Мульти-РКУП-К.

6. Разработана методика расчета силовых параметров с учетом силы противодействия в выходной части канала для метода Мульти-РКУП-К в зависимости от геометрических параметров каналов и трибологических условий.

7. Рассчитана зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения и показано, что с увеличением коэффициента трения длина дуги и угол дуги захвата снижаются.
8. С помощью метода делительных сеток показаны характер накопления и достигнутый уровень деформации сдвига в процессе экспериментальной обработки, при этом средняя величина деформации сдвига центральной области заготовки составляет 4,8 единиц.
9. Проведены экспериментальные исследования для определения рациональных технологических режимов для реализации метода Мульти-РКУП-К на лабораторном оборудовании и выбран образец № 6, полученный при температуре обработки 170 °С и применении смазочного покрытия, состоящего из быстросохнущей смазки, MoS<sub>2</sub> и BN, в котором наблюдалось сочетание качества поверхности (без дефектов) и достаточно высокого значения временного сопротивления разрыву 250 МПа.
10. Установлено, что метод Мульти-РКУП-К на лабораторном оборудовании позволяет сформировать в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si смешанную структуру и обеспечивающую одновременное повышение прочности и электропроводимости материала на 43 % и 5,1 %, соответственно по сравнению с состоянием поставки (Т1).
11. Разработаны и исследованы компьютерным и экспериментальным моделированием три варианта геометрического исполнения оснастки при получении катанки на опытно-промышленном оборудовании Д 400. Рациональным вариантом конструкции матрицы является вариант №3, обеспечивающий получение длинномерных полуфабрикатов с удовлетворительным качеством поверхности.
12. Установлено, что обработка алюминиевых образцов марки Al 6101 методом Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании приводит к повышению прочности материала со 170±4 до 268±10 МПа, электропроводимости с 49,2 до 54,1 % IACS по сравнению с состоянием поставки (Т1).
13. Использование виртуальных методик и расчетной модели для исследования процесса, в частности, максимального крутящего момента на колесе, обеспечивающего силовые характеристики, показывает сходимость с реальным физическим экспериментом, а именно: погрешность между расчетом и моделированием составляет ~ 8%, моделированием и экспериментом ~ 4%, расчетом и экспериментом ~ 4%.
14. Разработан комплекс технологических и технических решений, обеспечивающих повышение качества длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si в условиях сверхбольших разовых деформаций.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

## Рецензируемые издания, рекомендуемые ВАК РФ

1. **Фахретдинова, Э.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.
2. **Фахретдинова, Э.И.** Структура и свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ / Э.И. Фахретдинова, Е.В. Бобрук, Г.Ю. Сагитова, Г.И. Рааб // Письма о материалах, 2015. – Т.5. – №2(18). – С.202-206.
3. **Фахретдинова, Э.И.** Компьютерное исследование влияния геометрии оснастки на деформационные параметры пластической обработки алюминиевой катанки методом Мульти-РКУП-Конформ / Рааб Г.И., Фахретдинова Э.И., Валиев Р.З., Трифоненков Л.П., Фролов В.Ф. // Metallurg, 2015. – № 11. – С. 22-27.

Издания, входящие в международную базу цитирования «Scopus» и «Web of Science»

4. **Fakhretdinova, E.I.** Development of force parameters model for a new severe plastic deformation technique – Multi-ECAP-Conform / E.I. Fakhretdinova, G.I. Raab, M.M. Ganiev // Applied Mechanics and Materials, 2015. –Vol. 698. – P. 386-390.
5. **Fakhretdinova, E.** Processing ultrafine-grained Aluminum alloy using Multi-ECAP-Conform technique / E. Fakhretdinova, G. Raab, O. Ryzhikov, R. Valiev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2014. –Vol.63. – P. 1-8.
6. **Fakhretdinova, Elvira I.** Modeling of Metal Flow during Processing by Multi-ECAP-Conform / Elvira I. Fakhretdinova, Georgy I. Raab, Ruslan Z. Valiev // Advanced Engineering Materials, 2015. –Vol. 17 (12). – P. 1723–1727.
7. **Fakhretdinova, E.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.

## Прочие издания

8. **Fakhretdinova, E.I.** The role of severe plastic deformation in the formation of high electrical properties of aluminum alloy / Raab G.I., Fakhretdinova E.I. // Machines, Technologies, Materials. Issue 12 / 2014, – P.45-47.
9. **Фахретдинова, Э.И.** Сравнительный анализ математического и физического моделирования нового метода интенсивной пластической деформации Мульти-РКУП-Конформ / Э.И. Фахретдинова, Г.И. Рааб // Цветные металлы – 2014: сб. докладов шестого международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2014.раздел XI. – С.1210-1212.

10. **Фахретдинова, Э.И.** Влияние геометрии формообразующей оснастки на напряженно-деформированное состояние процесса Мульти-РКУП-Конформ / Фахретдинова Э.И., Рааб Г.И., Ганиев М.М., Рыжиков О.Л. // Вторая Всероссийская молодежная научно-техническая конференция с международным участием «Инновации в материаловедении»: сб. материалов / Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – М.: ООО «Ваш полиграфический партнер», 2015. – С. 402-403.
11. **Фахретдинова, Э.И.** Исследование особенностей практического применения метода Мульти-РКУП-Конформ для производства алюминиевой катанки / Фахретдинова Э.И., Рааб Г. И., Капитонов В. М., Рыжиков О. Л. // Мавлютовские чтения: материалы Российской научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения член-корр. РАН, д-ра техн.наук, профессора Р.Р. Мавлютова. В 7 т. Т.7. Новые конструкционные материалы. Объемные наноматериалы. Композиционные материалы / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн.ун-т, 2016. – С.139-143.
12. **Фахретдинова, Э.И.** Исследование новых методов ИПД для получения катанки электротехнического назначения / Рааб Г.И., Фахретдинова Э.И. // НАНО 2013: сборник материалов V Всероссийской конференции по наноматериалам. – Звенигород, 2013. – С. 249-250.
13. **Фахретдинова, Э.И.** Разработка совмещенного метода интенсивной пластической деформации для получения алюминиевой катанки высокого качества / Фахретдинова Э.И., Рааб Г.И., Валиев Р.З. // УМЗНМ-2014: сборник тезисов докладов Открытой школы-конференции стран СНГ. – Уфа, 2014. – С.213.
14. **Фахретдинова, Э.И.** Разработка модели силовых параметров нового метода интенсивной пластической деформации Мульти РКУП - КОНФОРМ / Фахретдинова Э.И., Рааб Г.И., Ганиев М.М. // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых / коллектив авторов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С.171-173.
15. **Фахретдинова, Э.И.** Практическая реализация метода Мульти-РКУП-Конформ / Фахретдинова Э.И., Рааб Г.И., Скрыбин И.В. // Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства: материалы II международной научно-практической конференции / под ред. М.В. Чукина – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016.– С.32.
16. Пат. 2560474 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/00. Способ непрерывного равноканального углового прессования металлических заготовок в виде прутка / Рааб Г.И., **Фахретдинова Э.И.**, Капитонов В.М., Валиев Р.З.; заявители и патентообладатели Общество

с ограниченной ответственностью "НаноMeT"– № 2013156136/02; заявл. 17.12.2013; опубл. 20.08.2015.

17. Пат. 2519078 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06. Способ совмещенного литья, прокатки и прессования и устройство для его реализации / Рааб Г.И., Сидельников С. Б., Довженко Н.Н., Гималтдинова Э.И. (**Фахретдинова Э.И.**); заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "НаноMeT" – № 2012143646/02, заявл. 11.10.2012; опубл. 10.06.2014.

18. Пат. 161444 Российская Федерация, МПК В 21 J 5/06, В 21 J 13/02, В 21 С 25/00, С 22 F 1/05. Устройство непрерывного углового прессования / Рааб Г.И., **Фахретдинова Э.И.**, Валиев Р.З., Трифоненков Л.П., Фролов В.Ф.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". – № 2015146630/02; заявл 28.10.2015; опубл. 20.04.2016.

Подписано в печать 13.02.17 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать лазерная. Тираж 100 экз. Заказ 036.  
Гарнитура «TimesNewRoman». Отпечатано в типографии  
«ПЕЧАТНЫЙ ДОМЪ» ИП ВЕРКО.  
Объем 1 п.л. Уфа, Карла Маркса, 12, корп. 5.