

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

На правах рукописи



Фахретдинова Эльвира Илдаровна

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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Рааб Георгий Иосифович  
доктор технических наук

Уфа - 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	10
1.1 Современное состояние производства алюминиевых полуфабрикатов для электротехнической промышленности.....	10
1.2 Оборудование для получения алюминиевой катанки.....	15
1.3 Анализ совмещенно - комбинированных методов получения алюминиевой катанки.....	19
1.4 Анализ комбинированных методов получения алюминиевой катанки.....	26
1.5 Выводы по главе.....	34
2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП-КОНФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	35
2.1 Описание метода Мульти-РКУП-Конформ.....	35
2.2 Условия и допущения, принятые при моделировании.....	36
2.3 Структура исследования.....	39
2.3.1 Критерии выбора углов пересечения каналов.....	40
2.3.2 Критерии выбора радиусов сопряжения.....	43
2.3.3 Результаты исследований углов пересечения каналов на стадии обработки по схеме РКУП-ПК.....	45
2.3.4 Результаты исследований влияния величины радиусов сопряжений в выходной части канала оснастки на напряженно-деформированное состояние.....	50
2.4 Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при деформации методом Мульти-РКУП-Конформ с рациональными геометрическими параметрами.....	58

2.4.1 Исследование схемы деформации.....	59
2.4.2 Исследование главных напряжений и деформаций.....	61
2.4.3 Расчет и выбор материала штамповой оснастки.....	65
2.4.4 Исследование температурного поля.....	66
Выводы по 2 главе.....	67
<b>3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП- КОНФОРМ.....</b>	<b>69</b>
3.1. Разработка модели расчета силовых параметров нового метода интенсивной пластической деформации Мульти РКУП- Конформ.....	69
3.2 Расчет длины дуги и угла захвата при деформации.....	75
3.3 Анализ деформированного состояния методом сеток.....	81
Выводы по главе.....	85
<b>4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП- КОНФОРМ.....</b>	<b>86</b>
4.1.Методика проведения экспериментов.....	86
4.1.1 Материалы исследования.....	86
4.1.2 Метод получения экспериментальных образцов катанки методом Мульти-РКУП-Конформ.....	87
4.1.3 Методика регистрации и записи технологических параметров.....	87
4.1.4 Методы исследования структуры алюминиевых образцов.....	89
4.1.5 Режимы термической обработки экспериментальных образцов.....	91
4.1.6 Методы определения механических характеристик экспериментальных образцов.....	91
4.1.7 Методы определения физических свойств экспериментальных	

образцов.....	92
4.2 Получение образцов обработкой Мульти-РКУП-Конформ на лабораторном оборудовании.....	93
4.2.1 Исследование влияния технологических параметров на прочностные характеристики алюминиевых полуфабрикатов.....	93
4.2.2 Структура и свойства полученных алюминиевых образцов полуфабрикатов.....	98
4.3 Апробация метода Мульти-РКУП-Конформ на опытно-промышленном оборудовании.....	101
4.3.1 Исследование геометрических параметров матрицы при реализации метода Мульти-РКУП-Конформ на опытно-промышленном оборудовании.....	103
4.3.2 Влияние скорости обработки на силовые и температурные параметры.....	112
4.3.3 Получение образцов алюминиевой катанки на опытно-промышленном оборудовании.....	115
4.3.4 Механические и функциональные свойства полученных образцов...	117
4.4 Рекомендации по созданию технологической линии с использованием Мульти-РКУП-Конформ.....	118
Выводы по главе.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	143

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из крупнейших отраслей промышленности является электроэнергетика. Для передачи электроэнергии на дальние расстояния используются высоковольтные линии электропередач мощностью 220 кВ и выше. Общая протяженность линий электропередач данного класса составляет 153,4 тыс. км, а в целом в Российской Федерации эксплуатируется 2647,8 тыс. км линий электропередач различной мощности [1].

В настоящее время провода для высоковольтных линий электропередач и самонесущие изолированные провода производят преимущественно из алюминия и сплавов на его основе [1]. Для производства алюминиевой катанки диаметром 9-19 мм в России используют в основном технически чистый алюминий электротехнического назначения марок А5Е и А7Е в соответствии с ГОСТ 13843-78. Данные сплавы обладают высокой электропроводимостью, но низкой прочностью и термостойкостью, поэтому они используются в сочетании со стальным сердечником, что утяжеляет провода и снижает их пропускную способность.

В этой связи важной характеристикой проводов становится повышенный уровень прочности и электропроводимости, что дает возможность создавать провода без стального сердечника и увеличить пропускную способность линий электропередач [2].

Повышенной прочностью и термостойкостью обладают низколегированные и сравнительно дешевые термически упрочняемые алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Si марки АВЕ, однако это не снимает проблему использования стального сердечника в проводах. Рост объемов производства катанки из сплавов АВЕ в настоящее время составляет 10-15% в год [3].

Известно, что алюминиевую катанку получают на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) методом непрерывного литья и прокатки. Однако у ЛПА есть недостатки, включающие необходимость использования больших

производственных площадей, сложной системы контроля и управления параметрами линии, а также ограничения по обработке сплавов повышенной прочности. Получение катанки повышенной прочности из алюминиевых сплавов на ЛПА ограничено температурными условиями обработки. В связи с отмеченным выше актуальными становятся исследования в области создания новых технологий получения алюминиевых полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и удельного электросопротивления.

Обеспечение условий для одновременного увеличения указанных характеристик алюминиевых сплавов является важной задачей, которая, как было показано, например, в работах [5-7], может быть решена за счет создания 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) [8,9]. 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 [10], не исключает необходимости применения многоциклового обработки, что обуславливает повышенную трудоемкость процесса и увеличивает издержки на энергозатраты.

В связи с этим **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.

При решении поставленной задачи был использован научно-технический потенциал, созданный известными учеными, такими как В.М. Сегал, В.Л. Колмогоров., 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.Н. Шеркунов, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, В.Н. Щерба, Е.Н. Сосенушкин, Ю.В. Горохов, Ф.С. Гилевич, А.Р. Фастыковский, Р.З. Валиев и др.

Результаты исследований используются при чтении курса лекций по дисциплине «Деформационно-термическая обработка материалов» и «Термическая и химико-термическая обработка материалов» по специальности 28.03.02 «Наноинженерия». Также результаты были использованы при написании учебных пособий, представленных в Приложении А.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Моделирование процесса Мульти-РКУП-Конформ в среде программного комплекса Deform-3D с целью выявления особенностей течения металла в зависимости от геометрических параметров оснастки.
2. Теоретические исследования процесса Мульти-РКУП-Конформ для определения энергосиловых параметров и обоснования технологических режимов получения длинномерных полуфабрикатов.
3. Изучение микроструктуры, механических свойств и удельного электросопротивления длинномерных полуфабрикатов из сплава Al 6101 после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ.
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 ультрамелкозернистой 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».

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В первой главе приведена оценка современного состояния производства алюминиевых полуфабрикатов для электротехнической промышленности, обзор свойств сплавов системы АВЕ, выполнен анализ оборудования и методов получения полуфабрикатов электротехнического назначения. Во второй главе приведены результаты исследований, направленных на рационализацию геометрических параметров оснастки, и анализ напряженно-деформированного состояния металла в процессе Мульти-РКУП-Конформ с использованием компьютерного моделирования. Моделирование проводилось в прикладном программном комплексе Deform-3D. В третьей главе показаны теоретические расчеты



исследуемого процесса Мульти-РКУП-Конформ, в частности, разработана методика расчета силовых параметров, с помощью которой построена зависимость величины крутящего момента от таких параметров, как угол пересечения каналов и коэффициент трения. С помощью разработанной методики рассчитана зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения. Также представлены результаты исследований деформированного состояния заготовки методом делительной сетки. Четвертая глава посвящена исследованиям метода Мульти-РКУП-Конформ на лабораторном и опытно-промышленном оборудовании. Исследованы технологические параметры, характер течения, особенности формируемой структуры, механические и функциональные свойства полученных алюминиевых образцов (полуфабрикатов).

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

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.

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 Современное состояние производства алюминиевых полуфабрикатов для электротехнической промышленности

Электроэнергетика является основополагающей отраслью высокоразвитых стран, в которых показатель энерговооруженности промышленности является важной характеристикой. В России установленная мощность электростанций составляет 242,8 ГВт, однако, в силу объективных причин, имеется удаленность части мощностей от основных промышленных центров, поэтому на эффективность передачи энергии влияет пропускная способность линий электропередач. Следовательно, снижение потерь при передаче электроэнергии является важной народнохозяйственной задачей и в масштабах страны приводит к значительной экономии энергоресурсов [10].

Для линий электропередач используются алюминиевые и медные провода. Один килограмм алюминия передает вдвое больше электроэнергии, чем один килограмм меди, а по массе алюминий составляет треть от массы меди. Это значительно облегчает конструкции линий электропередач и делает алюминий более привлекательным для такого использования [11]. К тому же алюминий обладает достаточно высокой коррозионной стойкостью. Этот металл успешно заменяет медь в высоковольтных линиях передач и на сегодняшний день считается наиболее экономически выгодным в использовании для передачи электроэнергии. Производители проводов применяют электротехнический алюминий и его сплавы в виде катанки, которую далее, как правило, подвергают волочению и получают проволоку довольно широкой номенклатуры для изготовления проводов. Поэтому получение качественной катанки с высокими прочностными характеристиками и проводимости является весьма актуальным вопросом.

В производстве алюминиевой катанки на отечественных предприятиях наблюдается положительная динамика объемов переработки за период 1990-2013 гг. (рисунок 1.1) [12-15].

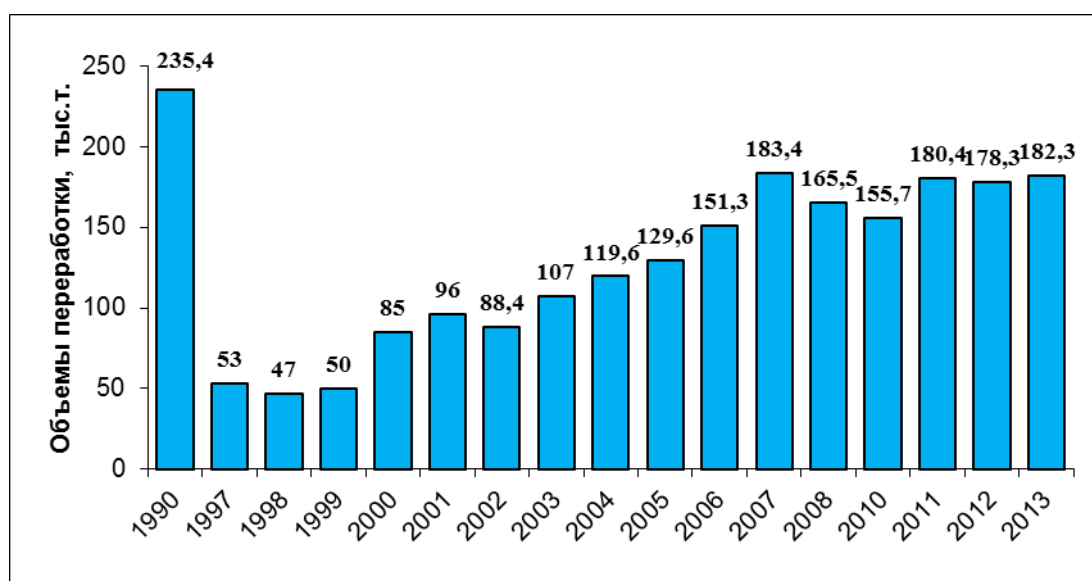


Рисунок 1.1 – Объемы переработки алюминия на предприятиях Ассоциации «Электрокабель» в 1990-2013 гг.

Как видно из рисунка 1.1, максимальный объем переработки алюминия за 1990-2013 гг. наблюдается в 1990 г. и составляет 235,4 тыс.т. На дальнейшее развитие производства повлиял кризис, связанный с распадом СССР. Положительная тенденция роста объемов переработки заметна после дефолта 1998 г., но по причине экономического кризиса (2009 г.) только с 2010 г. отслеживается значительный рост, приближающийся к максимальной цифре, достигнутой в 1990 г.

Как правило, алюминиевую катанку получают на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) методом непрерывного литья и прокатки (НЛП), при этом в настоящее время объем мирового производства таким способом составляет около 3,5 млн. т/год [3].

Для производства алюминиевой катанки в России используют, в основном, алюминиевые сплавы марок А5Е и А7Е в соответствии с ГОСТ 13843-78

диаметром 9-19 мм. Данные сплавы обладают высокой электропроводимостью, но низкой прочностью и термостойкостью, поэтому они используются в сочетании со стальным сердечником, что утяжеляет провода и снижает их пропускную способность. Использование более прочных сплавов для проводов, как правило, не обеспечивает высокие показатели проводимости. Учитывая, что длина распределительных сетей, состоящих из неизолированных проводов, в России составляет порядка 1,32 млн. км, по ним передается около 3/4 потребляемой в стране электроэнергии [11]. Поиск решений упрочнения алюминиевых сплавов при сохранении высокой удельной электропроводимости является в данное время актуальной задачей.

Проблема частично решается при получении катанки не только из чистого алюминия, но и из других электротехнических и конструкционных сплавов (Таблица 1.1). Рост объемов производства катанки из таких сплавов прогнозируется на уровне 10–15 % в год [16,17]. Одной из таких групп алюминиевых сплавов являются сплавы марки АВЕ - легированные кремнием и магнием. Данные сплавы обладают повышенной прочностью и термостойкостью.

Таблица 1.1 – Сортамент электротехнических и конструкционных сплавов, используемых для производства катанки методом НЛП

№ п/п	Марка сплава	Химический состав											Другие		Al, %	Вид термо-обработки	Прочность на разрыв, МПа
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Каждый	Всего			
1	1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	...	...	0,05	0,03	...	0,05	0,03	...	оставш. часть	Т	82,70–124,10
2	1080	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	...	...	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	...	оставш. часть	Т	117,21–137,90
3	1100	0,95 Si+Fe	...	0,05–0,20	0,05	...	...	...	0,10	...	...	...	0,05	0,15	оставш. часть	Т	110,32–124,11
4	1180	0,09	0,09	0,01	0,02	0,02	...	...	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02	...	оставш. часть	Т	113,76–134,45
5	1188	0,06	0,06	0,005	0,01	0,01	...	...	0,03	0,01	0,03	0,05	0,01	...	оставш. часть	Т	113,76–134,45
6	1350	0,10	0,40	0,05	0,01	...	0,01	...	0,05	...	0,03	...	0,03	0,10	оставш. часть	Н0, Н1, Н19	89,63–151,68
7	5005	0,30	0,7	0,20	0,20	0,50–1,1	0,01	...	0,25	...	...	...	0,05	0,15	оставш. часть	Т	137,90–206,84
8	6101	0,30–0,7	0,50	0,10	0,03	0,35–0,8	0,03	...	0,10	...	...	...	0,03	0,10	оставш. часть	Т1, Т4	124,11–179,26
9	6201	0,50–0,9	0,50	0,10	0,03	0,6–0,9	0,03	...	0,10	...	...	...	0,03	0,10	оставш. часть	Т1, Т4, О, Т81	124,11–179,26
10	8176 (EEE)	0,03–0,15	0,40–1,0	...	...	...	...	...	0,10	...	0,03	...	0,05	0,15	оставш. часть	Т	103,42–137,90
11	АВЕ	0,45–0,60	0,35–0,70	0,05	...	0,45–0,60	...	...	0,05	Титан, ванадий, хром, марганец – 0,015			...	0,05	оставш. часть	Т1, Т4	132–170
12	АКЛП-5Т	0,10	0,35	0,02	...	...	...	...	0,04	0,015	...	...	...	0,02	оставш. часть	Т	

Известно что, используя современные ЛПА, компания NPA Skawina (Польша) производит производционную электротехническую катанку из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si, таких марок как 6101 и 6201 [18]. Физико-механические свойства данных сплавов показаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Физико-механические свойства производционной катанки сплавов Al-Mg-Si, производимой компанией NPA Skawina [18]

Сплав	Состояние поставки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Удельная электропроводимость IACS*, %
6101	T1	170	17	49.2
	T4	150	20	49.2
6201	T1	205	17	47.8
	T4	160	20	47.8
* IACS – «Международный стандарт по отожженной меди»				

В России изготовление алюминиевой катанки из сплава АВЕ методом НЛП производится в ограниченном количестве на заводе «Цветлит» (г. Саранск). Ввиду маленького объема производства цена такой катанки намного дороже катанки, полученной из традиционного сплава.

Также сплавы АВЕ изготавливают методом прокатки на полунепрерывном прокатном стане на заводе «Кирскабель» (г. Кирс, Кировская обл.). В свою очередь, на московском заводе «Москабельмет» и в Самарской кабельной компании применяется метод прессования слитков в незначительных объемах [3]. Но данные способы не обеспечивают требуемых характеристик по причине неоднородности химического состава и засоренности металла газовыми и неметаллическими включениями.

ЛПА различных изготовителей включают в себя одинаковый состав основного технологического оборудования: шахтные плавильные печи, миксеры,

литейные машины, прокатные станы и моталки, но отличительными особенностями каждого ЛПА являются технические и эксплуатационные характеристики оборудования.

В Российской Федерации используется всего 14 ЛПА, суммарная мощность которых составляет более 300 тыс. т катанки в год (таблица 1.3) [3].

Таблица 1.3 – Заводы в России, выпускающие алюминиевую катанку [3]

Завод	Год пуска	Количество ЛПА, шт.	Производительность ЛПА, т/ч	Годовое производство, тыс.т.
Иркутский алюминиевый завод	1966	6	5,0	150
Братский алюминиевый завод	1971	4	5,0	100
Кандалакшский алюминиевый завод	1972	1	3,0	15
Красноярский алюминиевый завод	2006	1	5,0	10-15
ВМС, г.Подольск	2005	1	2,0	8-10
Цветлит, г.Саранск	2006	1	2,0	8-10

Зарубежными производителями современных ЛПА являются фирмы SOUTHWIRE (США), CONTINUUS-PROPERZI (Италия) и SMS-MEER (Германия) [17,19-20], а также аналоги в Китае. Посредством этих ЛПА производится не только электротехническая алюминиевая катанка, но и катанка из электротехнических и конструкционных сплавов. ЛПА по составу прокатного оборудования подразделяются на агрегаты с двухвалковыми станами (агрегаты фирм SOUTHWIRE и SMS) и агрегаты с трехвалковыми прокатными станами (отечественные агрегаты и агрегаты фирмы PROPERZI). Итальянская фирма PROPERZI в последнее время также использует комбинированные станы, в которых черновые клетки – двухвалковые, промежуточные и чистовые – трехвалковые [20].

Поэтому в настоящее время на большинстве отечественных предприятий стоит проблема не только создания новых сплавов для электротехнической промышленности, но и разработки новых технологий получения высококачественной катанки, которая будет отвечать требованиям зарубежных и международных стандартов ASTM, IEC, CENELEC, и будет способна конкурировать с продукцией мировых производителей катанки.

В последнее время наметилась тенденция получения алюминиевых сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Такая структура способствует повышению прочности и электропроводимости с удовлетворительной пластичностью [21-24]. Для получения УМЗ структуры в металлических материалах в основном применяется обработка методами ИПД, такими как равноканальное угловое прессование (РКУП), РКУП в параллельных каналах, РКУП по схеме Конформ и др. Известно, что российскими и зарубежными учеными были получены экспериментальные образцы катанки с повышенными свойствами и УМЗ-структурой из алюминиевых сплавов с переходными металлами различных составов и алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si [25-27].

## **1.2 Оборудование для получения алюминиевой катанки**

Самым распространенным методом получения алюминиевой катанки в России является НЛП. Технологии непрерывного литья, появившиеся в XIX веке, повлекли за собой развитие непрерывных процессов, совмещающих плавку, литье и обработку металлов давлением или резание [28]. Первым совмещенным способом считается процесс введения непрерывнолитой заготовки в прокатный стан, в котором происходит уменьшение поперечного сечения и формообразование до требуемых размеров. Так как металл находится в горячем состоянии, есть возможность применять большие обжатия за один проход, при

этом меньшую скорость прокатки компенсировать более интенсивной деформацией.

Первые линии НЛП алюминиевой катанки были разработаны компанией «Continuus-Propenzi» (Италия) и в 1949-1950 годах установлены на заводах Франции и Англии. В настоящее время свыше 80% алюминиевой катанки во всем мире производится на итальянском оборудовании с производительностью ЛПА от 1,6 до 15 т/ч [20]. Общая схема ЛПА показана на рисунке 1.2

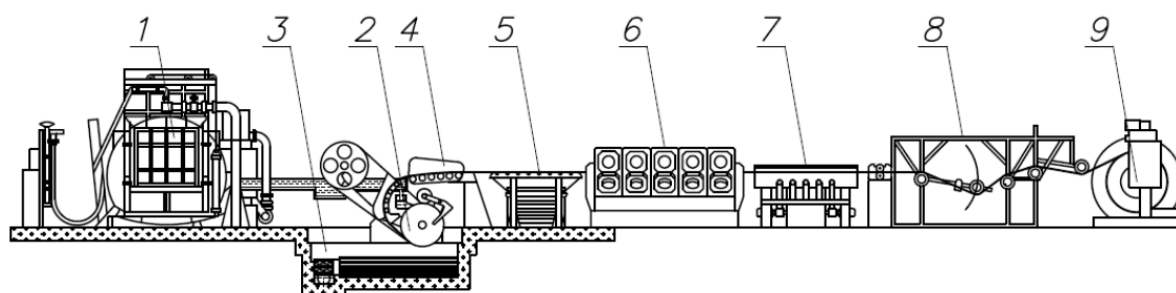


Рисунок 1.2 – Общая схема линий Properzi:

1- печь-миксер; 2-кристаллизатор; 3- литейная яма; 4- датчик автоматической разливки металла (АМР); 5- рольганг; 6- прокатный стан; 7- устройство для охлаждения; 8-натяжное устройство; 9- моталка [20]

Одним из известных производителей ЛПА и крупнейшим в мире изготовителем ЛПА для медной катанки является фирма Southwire (США), которая является. Отличие агрегатов Southwire от линий Properzi состоит в том, что в линии Southwire используется двухвалковый стан [19]. Схема показана на рисунке 1.3.

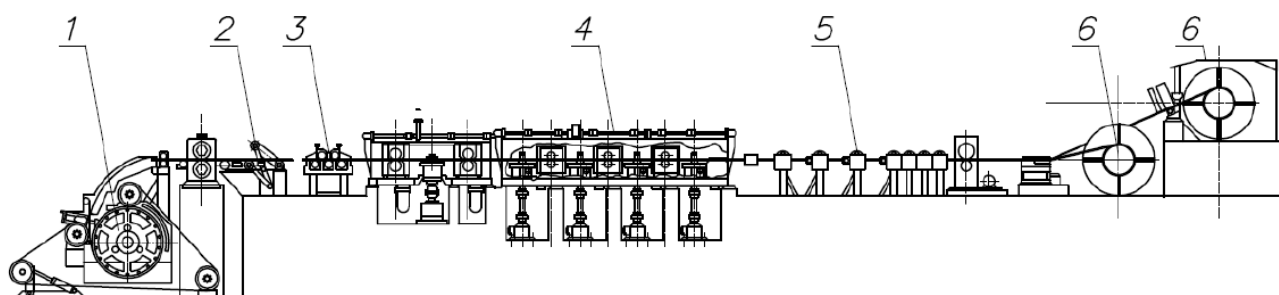


Рисунок 1.3 – Общая схема линий Southwire:

1- печь-миксер с кристаллизатором; 2- автоматические ножницы; 3 – машина подготовки полосы; 4 - прокатный стан; 5 – система спиртового освещения катанки; 6 – моталки [19]



В СССР аналогичное оборудование впервые было разработано Всероссийским научно исследовательским и проектно-конструкторским институтом металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ) и внедрено в 1961 году на заводе в г. Запорожье [29-30]. С середины 50-х годов до настоящего времени во ВНИИМЕТМАШ разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию 21 агрегат. В настоящее время предприятие владеет большим ассортиментом литейно-прокатных агрегатов для производства катанки диаметрами 9, 12, 16 мм из алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов. Техническая характеристика и схема ЛПА приведены в таблице 1.4 и на рисунке 1.4.

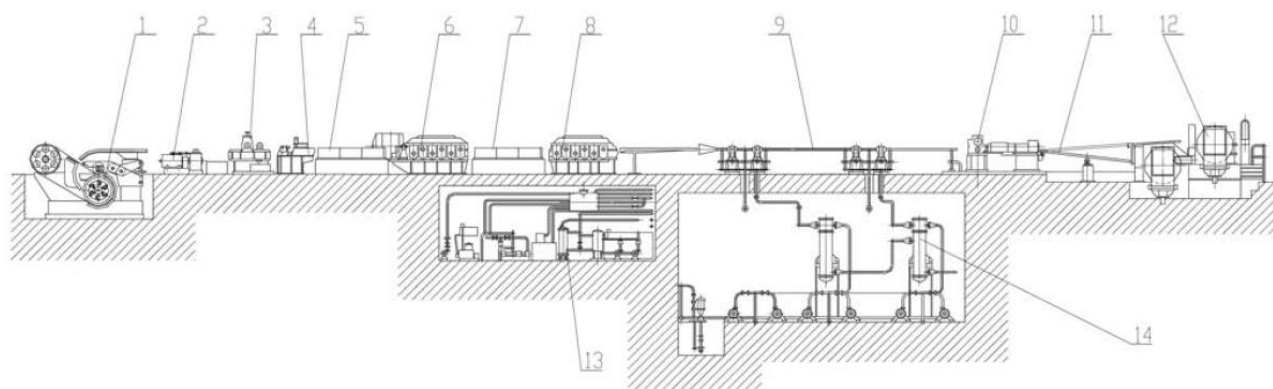


Рисунок 1.4 – Схема агрегата литья и прокатки алюминиевой катанки:

1- литейная машина роторного типа, 2- ножницы барабанные; 3-правильно-тянущая машина; 4- зачистная машина; 5-индуктор подогрева слитка; 6-черновая группа прокатного стана; 7-индуктор подогрева промежуточный; 8-чистовая группа прокатного стана; 9- линия охлаждения; 10- ножницы делительные; 11- проводка моталки; 12-моталка; 13-масло-эмульсионный подвал; 14- подвал линии охлаждения

Таблица 1.4 – Техническая характеристика агрегата алюминиевой катанки [30]

1.	Производительность, т/ч	2...6
2.	Площадь сечения отливаемого слитка, мм <sup>2</sup>	1000...3500
3.	Диаметр прокатываемой катанки, мм	9,0±0,3; 12± 0,4; 16±0,5
4.	Скорость выхода катанки из стана, м/с	до 12
5.	Размеры бунта: наружный диаметр, мм внутренний диаметр, мм высота, мм масса, кг	1300 550/800 850 от 400 до 1300
6.	Габариты агрегата (без плавильных печей и миксеров): длина, м ширина, м высота, м	30...36 8...11 2,1

Таким образом, в настоящее время литейно-прокатное оборудование отечественного и импортного производства отвечает современным требованиям. Однако у ЛПА есть недостатки, включающие необходимость использования больших производственных площадей, сложной системы контроля и управления параметрами линии, а также ограничения по обработке сплавов повышенной прочности. Улучшение качества продукции возможно за счет внедрения совмещенных процессов, либо проведения отдельных операций высокопроизводительными методами, так как получение катанки повышенной прочности из алюминиевых сплавов на ЛПА ограничено температурными условиями обработки.

Согласно классификации процессов обработки цветных металлов и сплавов, предложенной авторами [31], комбинированными процессами считаются такие методы, как прессование-прессование, непрерывное прессование и прокатка-прессование, а совмещенно-комбинированными процессами – методы литье-

прокатка-прессование, литье-прокатка-волочение и компактирование-прокатка-прессование.

### **1.3 Анализ совмещенно - комбинированных методов получения алюминиевой катанки**

Одной из последних тенденций при производстве алюминиевой катанки является объединение процессов литья и обработки металлов давлением в одном агрегате. Это приводит к созданию новых процессов, повышающих эффективность производства изделий различного назначения. Такой подход позволяет повысить производительность труда за счет исключения из технологического цикла некоторых трудоемких и малопродуктивных операций, сократить производственные площади и межоперационные перевозки, использовать энергию, выделяющуюся при кристаллизации и деформации металла заготовки, на последующих этапах обработки [31].

Одним из первых процессов совмещенного процесса литья, прокатки и прессования является способ Кастэкс. Процесс Кастэкс был разработан в 1986 году фирмой Alform Alloys (Великобритания) для получения алюминиевых профилей высокого качества на основе метода Конформ и карусельной литейной машины. Схема процесса показана на рисунке 1.5.

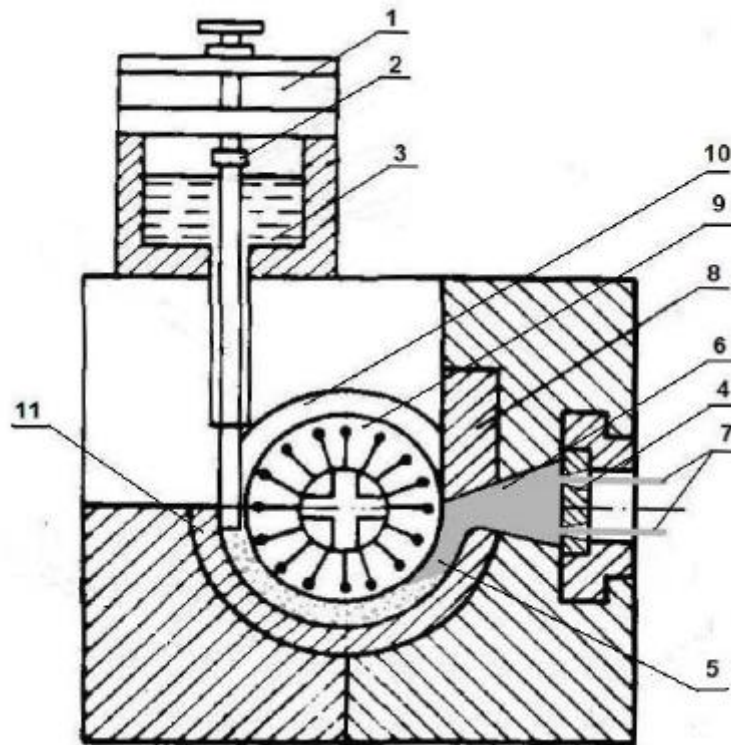


Рисунок 1.5 – Схема процесса непрерывного прессования Конформ-Кастэкс полых профилей из жидкого металла: 1 – дозатор; 2 – устройство регулирования расхода жидкого металла; 3 – жидкий металл; 4 – матрица; 5 – фронт кристаллизации; 6 – камера сварки; 7 – полые профили; 8 – упор; 9 – колесо; 10 – кольцевая канавка; 11 – кольцевая вставка

Процесс заключается в прессовании затвердевшего металла методом Конформ. В начале работы металл в жидком состоянии поступает в камеру прессового башмака, затвердевает в ней и под высоким давлением выпрессовывается через матрицу 4. Необходимо убедиться, что затвердевание металла не происходит в зоне прессования. За счет высокой скорости затвердевания можно получить высококачественные полуфабрикаты.

Вышеуказанные методы непрерывного прессования имеют потенциал и развиваются нашими соотечественниками, в частности, сотрудниками кафедры обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета, результаты исследований которых приведены в работах [32-34].

Так, например, модификацией установки Конформ-Кастэкс является установка непрерывного литья-прессования с вертикальной осью вращения

колеса [35-37]. На рисунке 1.6 показана схема установки, выполненная на базе карусельного кристаллизатора.

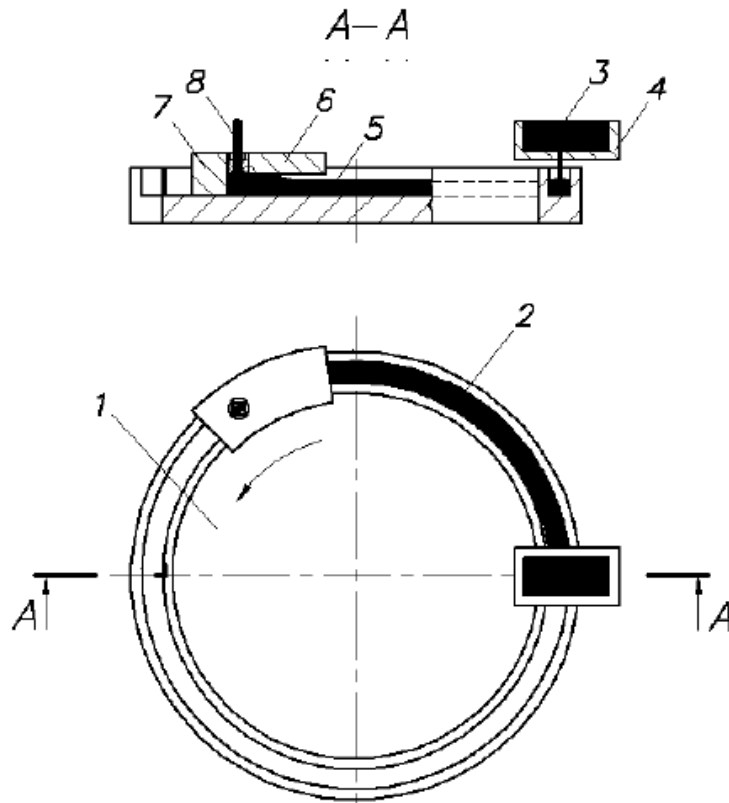


Рисунок 1.6 – Схема установки непрерывного литья - прессования с вертикальной осью вращения колеса: 1 - колесо-кристаллизатор; 2 – ручей; 3 – жидкий металл; 4 – литниковая коробка; 5 – слиток; 6 – матрицедержатель; 7 – матрица; 8 – пресс-изделие

Через дозатор 4 заливается металл 3 в жидком состоянии в ручей 2 вращающегося колеса 1 и кристаллизуется до входа в камеру прессования. Камера прессования представляет собой участок сопряжения ручья 2 с матрицедержателем 6. Слиток 5 поступает в камеру прессования и выдавливается в отверстие матрицы 7 в виде пресс-изделия. Данный процесс происходит непрерывно.

Теоретические и экспериментальные исследования данной схемы приведены в работах [35-36,38]. Установка непрерывного литья-прессования с вертикальной осью вращения колеса не нашла промышленного применения в России.

Группой ученых под руководством Н.Н. Довженко были предложены новые способы непрерывного прессования и совмещенной обработки, которые

называются совмещенная прокатка-прессование (СПП) и совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛиПП).

Способ совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛиПП) представлен на рисунке 1.7.

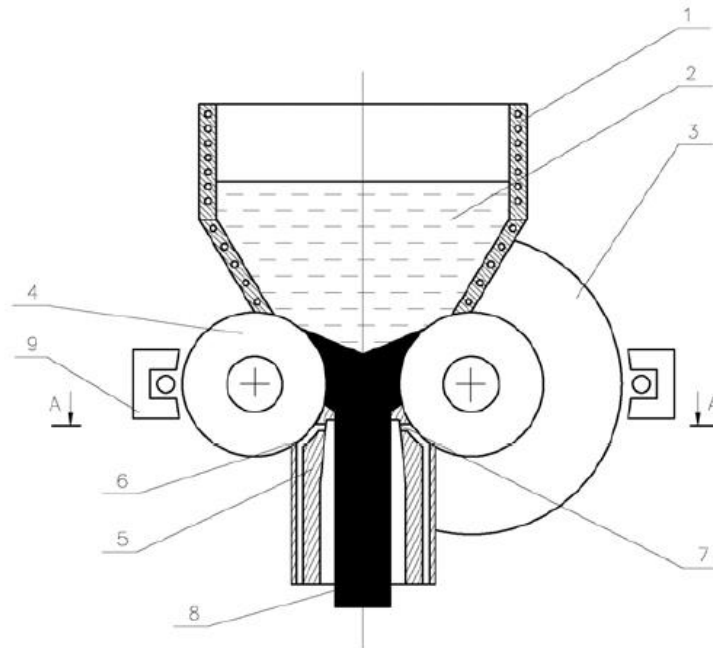


Рисунок 1.7 – Схема процесса совмещенного процесса литья, прокатки и прессования: 1 - печь-миксер; 2 – расплав; 3 - валок с ручьем; 4 - валок с выступом; 5 - матрица; 6 и 7 - каналы для охлаждения матрицы; 8 - пресс-изделие; 9 – индуктор

Устройство для проведения СЛиПП включает в себя печь-миксер, валок с ручьем и валок с выступом, имеющие охлаждаемые полости и образующие рабочий калибр. Матрица расположена на выходе из калибра, на ее наружной поверхности, находящейся в контакте с валками; выполнены охлаждаемые каналы. Вместе с тем матрица на выходе из ее канала снабжена охлаждаемыми каналами для подвода хладагента к прессуемому изделию, а валки снабжены индукторами для их нагрева, расположенными по разные стороны от валков [39].

Недостатком данного устройства и метода является то, что контактная с прессуемым материалом поверхность матрицы выполнена плоской, что приводит к повышению сил прессования и возникновению застойных зон в очаге деформации. В этой связи данный метод имеет ограниченные функциональные возможности, обусловленные тем, что он не обеспечивает однородное

деформированное состояние и структуру изделий и, следовательно, не обеспечивает однородные механические свойства.

С целью устранения вышеуказанных недостатков разработано устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования алюминиевых сплавов с применением метода ИПД [40]. Данное устройство включает печь-миксер 1 с регулятором 2 подачи расплава в калибр валков, валок 3 с ручьем и валок 4 с выступом, расположенные в станине 5, имеющие полости 6 для охлаждения и образующие закрытый калибр, перекрытый на выходе форкамерой 7 с охлаждающими каналами 8 и матрицей 9 с клиновидными полостями для охлаждения 10. Для поджима матрицы и форкамеры к валкам имеется гидравлический прижим 11, а для смотки готового пресс-изделия в бухту - моталка 12 (рисунок 1.8).

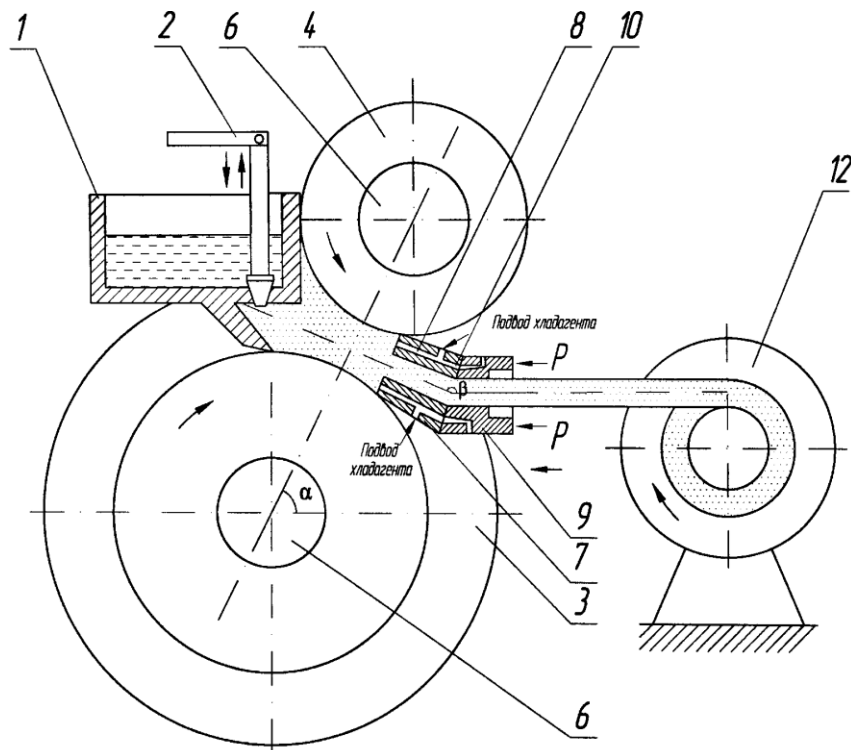


Рисунок 1.8 – Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования

Регулируемый угол между матрицей и осями форкамеры позволяет реализовать метод равноканального углового прессования (РКУП), с помощью

которого возможно получение однородной мелкозернистой структуры и, следовательно, повышение механических свойств изделия.

Для получения высококачественной алюминиевой катанки перспективными представляются методы, совмещающие процесс литья и прокатки с методами ИПД, так как методы ИПД обеспечивают, как правило, накопление больших однородных деформаций, что приводит к заметному повышению однородности структуры и свойств [41-44].

Одним из перспективных методов получения алюминиевой катанки с повышенными свойствами является метод СЛиПП-РКУП [41]. Схема течения материала при таком методе показана на рисунке 1.9.

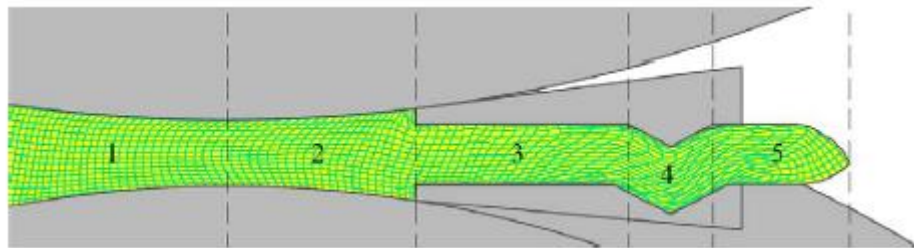


Рисунок 1.9 – Характер течения металла при обработке способом СЛиПП-РКУП



Рисунок 1.10 – Экспериментальный образец после СЛиПП-РКУП [48]

Результаты эксперимента (рисунок 1.10) на установке СПП-200 показали, что за счет применения метода РКУП происходит измельчение зерна, что



приводит к повышению прочности на 33 % и снижению пластичности на 5-6 % [35]. Однако стойкость матрицы в эксперименте оказалась невысокой, что повлияло на стабильность процесса. Поэтому практическая реализация данного способа деформации требует дальнейших исследований.

Авторами [43-44] был разработан новый метод совмещенного литья, прокатки и прессования по схеме ИПД (СЛиПП-ИПД) (рисунок 1.11). Основной особенностью данной разработки является использование разновидности метода РКУП в параллельных каналах [45,46], приводящего к значительному изменению схемы деформации на этапе прессования по сравнению с известным процессом СЛиПП. Расчеты по известным эмпирическим формулам показывают, что предложенный метод позволяет накапливать суммарную деформацию сдвига порядка  $e = 2...3$ , а общую накопленную истинную деформацию порядка  $e = 4...5$ . Для случая, когда обеспечивается интенсивный отбор тепла с деформирующих валков ( $T < 100^\circ\text{C}$ ), можно реализовать условия, приводящие к формированию УМЗ структурных состояний в конечных изделиях при таких уровнях накопленной деформации. Для случая с более высокой температурой прессования ( $T \sim 300^\circ\text{C}$ ) схема ИПД позволяет получать более изотропные состояния по механическим свойствам за счет обеспечения однородного деформированного состояния сдвигом [47].

Реализация метода рассмотрена на примере деформирования образца из алюминиевого сплава (рисунок 1.11). Расплавленный металл 2 заливают в печь-миксер 1, при этом начинается его кристаллизация на поверхностях валков 3 и 4. Далее закристаллизовавшийся металл захватывают валки 3 и 4, прокатывают, распрессовывают и деформируют в канале матрицы 6 за четыре последовательных непрерывных этапа. На первом этапе осуществляется прямое прессование с истинной степенью деформации  $e \geq 1,6$ . На втором и третьем этапах происходит угловое прессование, что приводит, как правило, к повышению однородности структуры металла. И на четвертом этапе выполняется калибрующая операция прямым прессованием через круглую калибрующую часть 10 канала 7 матрицы 6 [43].

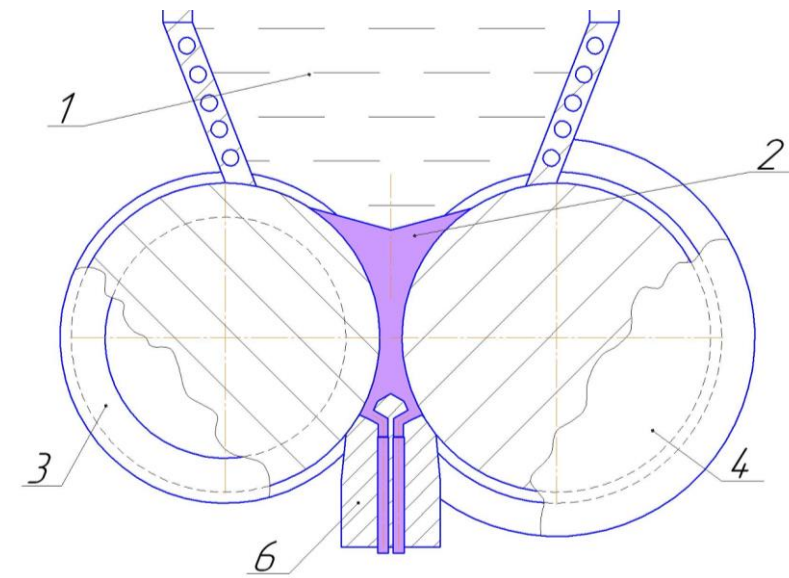


Рисунок 1.11 – Схема СЛиПП-ИПД

Проведенные исследования [44] позволили сравнить преимущества предлагаемого метода СЛиПП-ИПД с традиционным и оценить его потенциальные возможности на базе полученных экспериментальных результатов в направлении улучшения качества продукции. Данная технология не нашла промышленного применения ввиду сложности реализации на производстве.

Таким образом, совмещенные процессы непрерывного литья, прокатки и прессования являются в настоящее время перспективными методами получения алюминиевой катанки. Модернизация указанных методов может дать возможность использовать их преимущества с наибольшей эффективностью.

#### 1.4 Анализ комбинированных методов получения алюминиевой катанки

За рубежом при получении профилей небольшого сечения из алюминиевых и медных сплавов используются технологии нового поколения, названные технологиями непрерывного прессования (Конформ, Экстроллинг, Лайнекс) [31].

Способ Конформ предложен Д. Грином в 1970 г., схема показана на рисунке 1.12. Анализ данного способа приведен в работах [48-53]. Конформ основан на

непрерывной деформации заготовки путем подачи ее силами активного трения в рабочий канал, образованный башмаком и подвижным вращающимся колесом с ручьем в виде канавки по периферии, при этом в торце башмака установлена матрица, которая формирует распрессовочную камеру. На рисунке 1.12 а показана деформация заготовки 8, которая подается в ручей 2 в виде кольцевой канавки 3 на колесе 1. Кольцевая канавка 3 с внешней стороны прижимается башмаком 4, в котором закреплен блок инструмента с прессовыми матрицами 5.

В данном методе непрерывное прессование происходит за счет сил активного трения между рабочим колесом 1 и заготовкой 8. Выдавливание может происходить не только в направлении вращения рабочего колеса, но и в направлениях, перпендикулярных оси рабочего колеса, в том числе и радиальном.

Стоит отметить, что традиционный способ Конформ характеризуется высокой энергоемкостью и повышенной неравномерностью деформации.

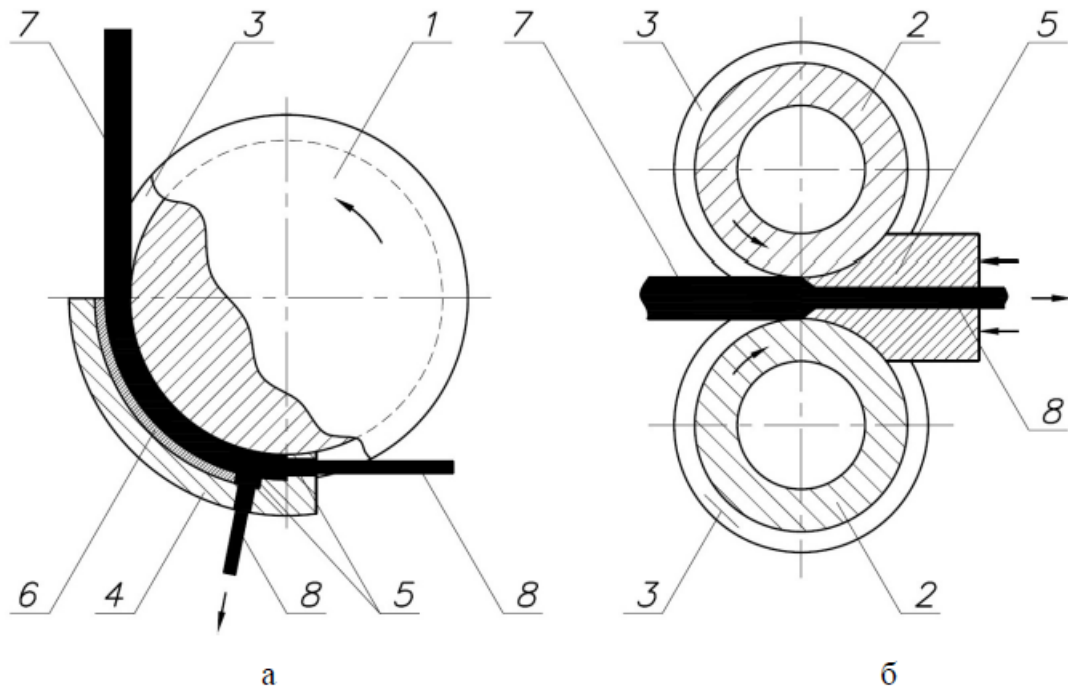


Рисунок 1.12 – Схемы непрерывного прессования: а) Конформ; б)

Экстроллинг: 1 - рабочее колесо, 2 - рабочие валки, 3 - кольцевая канавка, 4 - башмак с упором, 5 - матрицы, 6 - кольцевая канавка, 7 -заготовка, 8 - изделие

Процесс Экстроллинг был предложен в 1976 г. Б. Авитцуром [54]. Этот способ совмещает прокатку и прессование в одном очаге деформации, схема

показана на рисунке 1.12 б. За счет активных сил контактного трения между валками 2 и заготовкой 8 выдавливание осуществляется через матрицу 5. Главное отличие данного способа от Конформ состоит в более эффективном заполнении полости калибра металлом заготовки и меньших потерях мощности на трение реактивного действия. Недостатком процесса является небольшое единичное обжатие и ограниченная длина получаемого изделия. Этот способ не нашел промышленного применения, так как не обеспечивает устойчивого течения металла и создания необходимых для выдавливания металла давлений.

Способ Лайнекс предложен специалистами фирмы «Western Electric Co» (США) и показан на рисунке 1.13. Непрерывное прессование происходит за счет сил активного трения, возникающих между плоскими поверхностями звеньев цепей и верхней и нижней плоскостями заготовки, имеющей прямоугольное поперечное сечение. Величина давления прессования зависит от разности сил трения на смазанных и несмазанных плоскостях заготовки. Этот способ применяется для производства алюминиевых шин и проволоки на заводах фирмы «Venscuck» (США). Максимальная величина коэффициента вытяжки на порядок меньше, чем при реализации способа Конформ, что и является основным недостатком данного процесса.

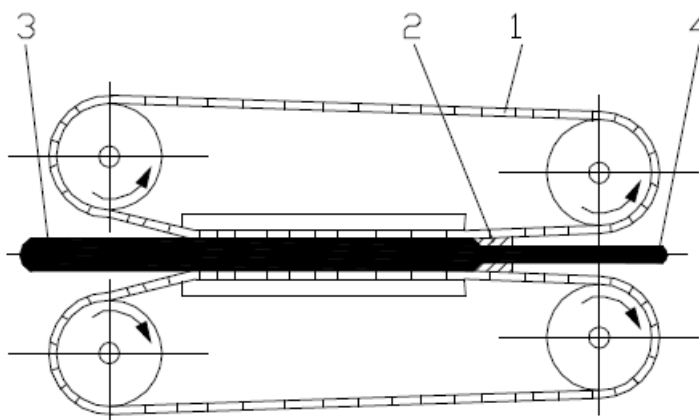


Рисунок 1.13 – Схема процесса непрерывного прессования способом Лайнекс: 1- приводные цепи; 2 – матрица; 3 – матрица; 4 – изделие

Процесс Экстроллинг был модернизирован и получил развитие в виде метода совмещенной прокатки и прессования (СПП). Схема процесса СПП показана на рисунке 1.14. Способ основан на деформации длинномерной заготовки прямоугольного поперечного сечения в двухвалковом закрытом калибре, перекрытом на выходе матрицей. Матрица смещена от плоскости, проходящей через оси валков, в направлении прокатки, и катающие диаметры валков могут быть различны. Данный метод характеризуется большими активными силами трения, создаваемые валками при контакте с заготовкой, что способствует процессу прессования и уменьшает силу необходимую для деформации металла. При процессе Экстроллинг металл проходит через три зоны (рисунок 1.14) : зона прокатки (1), зона распрессовки (2) и зона прессования (3), за счет чего могут накапливаться большие степени деформации.

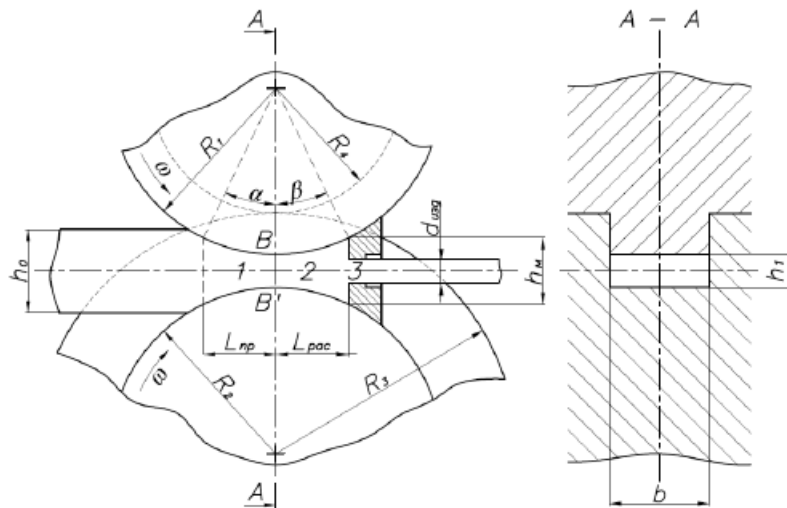


Рисунок 1.14 – Схема процесса совмещенной прокатки и прессования

Теоретические и экспериментальные исследования процесса СПП отражены в работах [31-32, 36]. Показано, что после обработки методом СПП в алюминиевых полуфабрикатах формируется рекристаллизованная дисперсная структура [36]. Недостатком данного способа является то, что при его реализации формируется высокая неоднородность деформированного состояния в очаге деформации и, соответственно, неоднородность свойств конечного продукта. В очаге деформации формируются застойные зоны, что, как известно, приводит к повышению силы прессования и, следовательно, увеличению энергозатрат.

Также следует отметить способ равноканальной угловой свободной протяжки (РКУПротяжка), приводящий к формированию УМЗ структуры в длинномерных заготовках круглого поперечного сечения (рисунок 1.15). Данный процесс заключается в многократном протягивании проволоки через специальные матрицы, в конструкции которых предусмотрены два пересекающихся под углом канала [55]. В работах [56-57] изучено влияние термической обработки и конструкции матриц на механические свойства получаемых образцов, также показано, что для получения УМЗ структуры необходимо проводить от 4 до 10 циклов обработки, что является главным недостатком данного процесса. Стоит отметить, что при РКУПротяжке в обрабатываемых заготовках наблюдается неоднородная УМЗ структура даже после 8 проходов [57].

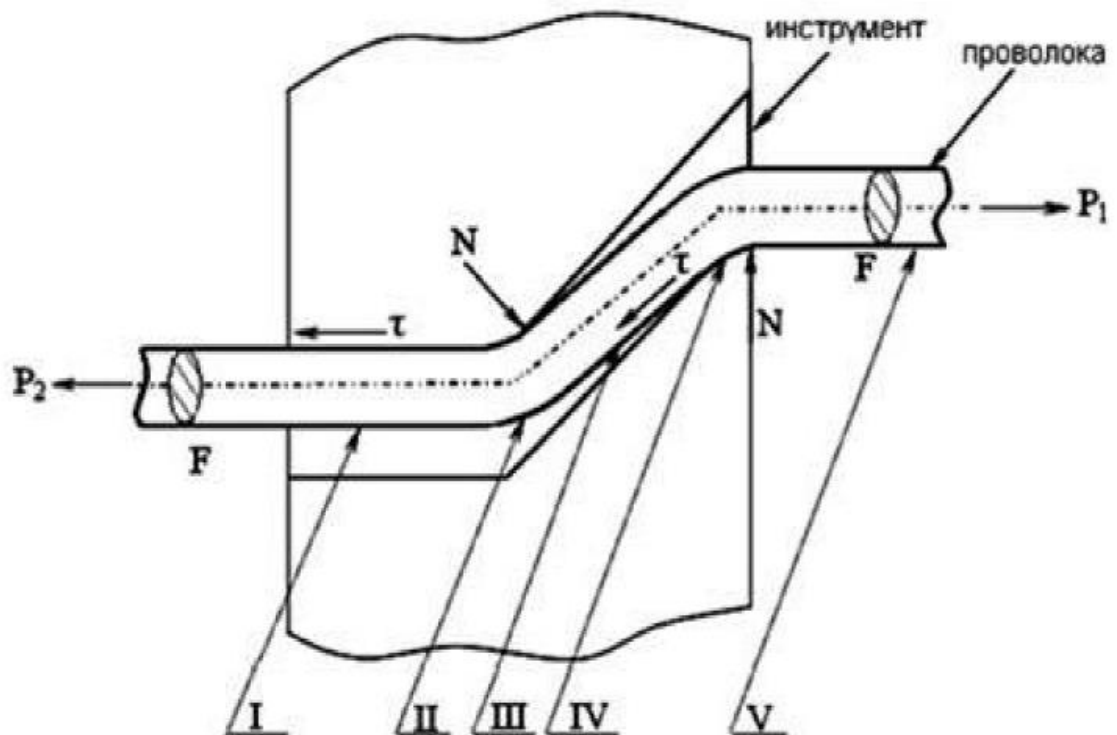


Рисунок 1.15 – Схема РКУПротяжки:  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемой заготовки;  $P_1$  – сила протяжки;  $P_2$  – сила противонапряжения;  $N$  – сила нормального давления;  $T$  – сила трения

Учеными Карагандинского государственного индустриального университета разработана новая схема совмещенного процесса «прессование-

волочение» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы и калибрующего инструмента (рисунок 1.16) [58,59]. Отличие данной схемы от волочения заключается в том, что перед волочением заготовка проходит через равноканальную ступенчатую матрицу. Как показано в работе [60], для получения УМЗ структуры в алюминиевых и медных образцах необходимо проводить не менее 3 циклов обработки, что повышает трудоемкость процесса. Данный метод является прямым прототипом РКУПротяжки и будет наследовать все его недостатки.

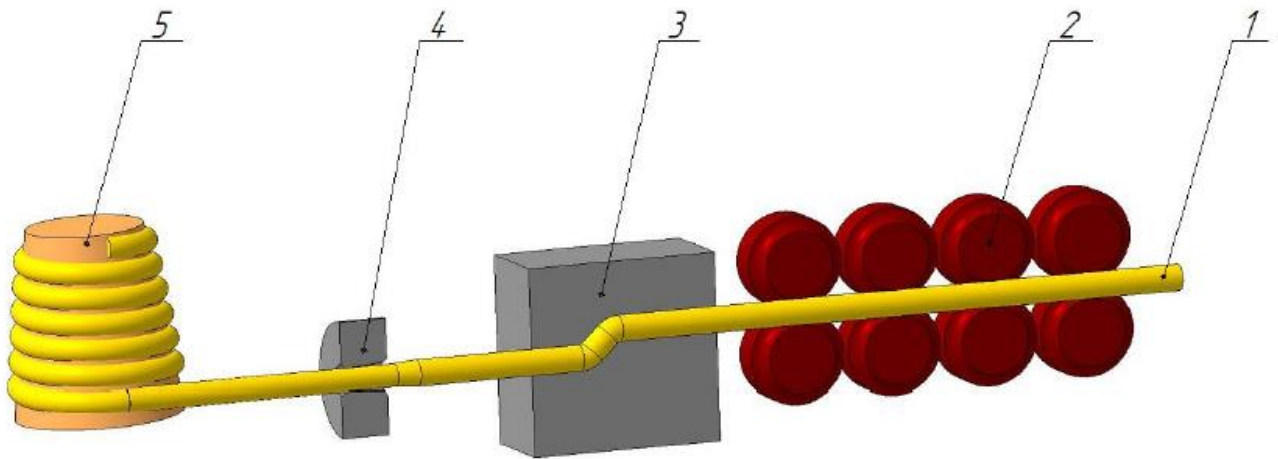


Рисунок 1.16 – Схема совмещенного процесса «прессование-волочение»:  
 1 – проволока; 2 – задающее устройство; 3 – равноканальная ступенчатая матрица; 4 – волока в волокодержателе; 5 – барабан наматывающий

В последние годы отмечается активное развитие методов ИПД с целью получения объемных УМЗ длинномерных заготовок. Основными целями, которые ставят исследователи при разработке новых способов ИПД, являются масштабирование (увеличение габаритов) получаемых изделий, получение длинномерных полуфабрикатов. Известно, что формирование УМЗ структуры в материалах электротехнического назначения приводит к качественно новому результату - одновременному повышению прочности и электропроводимости [61], что позволяет рассматривать применение методов ИПД в качестве перспективной альтернативы существующим процессам.

Для формирования таких УМЗ состояний в длинномерных полуфабрикатах используют схему «Конформ», обеспечивающую обработку заготовок простым сдвигом в непрерывном режиме [62]. Первая информация об использовании метода РКУП-Конформ при обработке меди была представлена в работе [63]. Дальнейшее развитие метод получил при получении УМЗ заготовок из алюминия, титана, нитинола и ряда других металлов [64-69].

Схема инструмента для непрерывного РКУП длинномерных заготовок показана на рисунке 1.17.

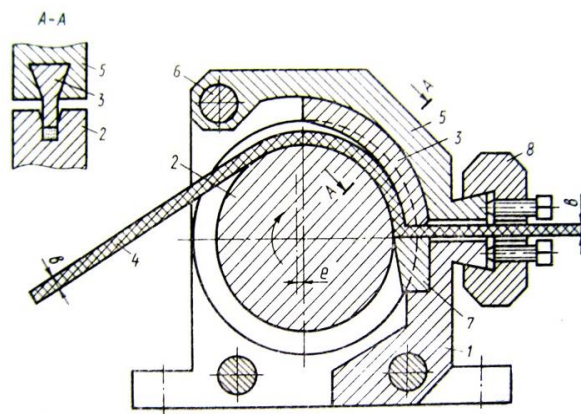


Рисунок 1.17 – Схема и пример конструктивного исполнения инструмента для непрерывного РКУП-Конформ длинномерных заготовок [62]

Инструмент состоит из корпуса 1, в котором смонтирован приводной валок 2 с П-образным калибром. С калибром валка сопряжена кольцевая секторная вставка 3, образующая неподвижную стенку рабочего канала для приема заготовки 4. Для увеличения силы прессования и улучшения условий самозатягивания заготовки в рабочий канал контактные поверхности вставки и валка расположены эксцентрично. Кольцевая вставка неподвижно закреплена в колодке 5, которая установлена на оси 6 с возможностью поворота. Нижняя стенка выходного канала образована упором 7, смонтированным в пазу корпуса инструмента. Корпус и колодка соединены клиновым зажимом 8. В исходном состоянии заготовка 4 круглого или квадратного сечения подается на вход



рабочего канала, из которого она активными силами трения со стороны П-образного калибра валка выпрессовывается в выходной канал.

Недавно коллегами из НИИ ФПМ УГАТУ были получены алюминиевые полуфабрикаты с повышенными механическими и функциональными свойствами [9]. Деформация была проведена методом РКУП-Конформ, 6 циклов, после чего образцы были подвергнуты термической обработке при 150°C. Результаты исследований приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 Механические и функциональные свойства в алюминиевой катанке Al 6101 после обработки РКУП-К

РКУП-К (6 циклов) при 150°C + Термообработка	Временное сопротивление разрыву $\sigma$ , МПа	Удельная электропроводимость IACS, %
	304 ± 3	57,1

Как видно из таблицы 1.5, после обработки методом РКУП-Конформ в алюминиевой катанке формируется однородная УМЗ структура, временное сопротивление разрыву достигает 304 ± 3 МПа, а электропроводимость – 57,1% IACS. На данный момент такой комплекс свойств катанки из сплава 6101 является наиболее высоким.

Но метод РКУП-Конформ имеет ряд недостатков: в первую очередь, это необходимость многоциклового обработки и, как следствие, повышенный уровень энергетических и трудовых затрат.

Таким образом, проведенный анализ существующих способов получения алюминиевой катанки показал, что в настоящее время существуют перспективные методы обработки материалов, но каждый метод имеет как преимущества, так и недостатки. Поэтому сочетание преимуществ традиционных методов с методами

ИПД является многообещающей идеей развития технологии получения алюминиевой катанки и других длинномерных изделий.

### 1.5 Выводы по главе

Анализ научно-технической литературы позволил сделать следующие выводы:

1. В настоящее время на большинстве отечественных предприятий существует проблема не только обновления оборудования (ЛПА), но и разработки новых технологий получения высококачественной катанки, которая будет отвечать требованиям международных стандартов ASTM, IEC, CENELEC и будет способна конкурировать с продукцией мировых производителей катанки.
2. Получение катанки повышенной прочности из алюминиевых сплавов возможно за счет внедрения совмещенных процессов, либо проведения отдельных операций высокопроизводительными методами.
3. Обзор научно-технической литературы показал, что совмещенные процессы непрерывного литья, прокатки и прессования являются перспективными методами получения алюминиевой катанки, и модернизация указанных методов может дать возможность использовать их преимущества с наибольшей эффективностью.
4. Совмещение традиционных методов получения катанки с методами ИПД приводит к формированию однородной УМЗ структуры и повышенного комплекса механических и функциональных свойств в алюминиевых сплавах электротехнического назначения, и в этой связи разработка нового комбинированного процесса, сочетающего преимущества используемых схем, является актуальной задачей.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследований, приведенные во Введении.

## 2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП-КОНФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В главе представлены результаты исследований, направленных на рационализацию геометрических параметров оснастки и анализ напряженно-деформированного состояния металла в процессе Мульти-РКУП-Конформ с использованием компьютерного моделирования. Моделирование было проведено в прикладном программном комплексе Deform-3D.

Результаты исследований приведены в работах [70-74] и патентах РФ [75, 76].

### 2.1 Описание метода Мульти-РКУП-Конформ

В настоящее время эффективными методами повышения свойств металлов без изменения поперечного сечения заготовок являются методы ИПД. Такие процессы, как РКУП-Конформ и РКУП в параллельных каналах, позволяют получать длинномерные полуфабрикаты (проволока, катанка, прутки) с УМЗ структурой и имеют высокий коэффициент использования металла. Однако данные методы имеют недостаток, связанный с многоцикловостью обработки и с тем, что для получения высокого комплекса свойств в металлических материалах, как правило, требуется проведение 3-8 циклов прессования одной заготовки [77-79]. Для решения данной проблемы авторами разработан новый метод ИПД – Мульти-РКУП-Конформ (Мульти-РКУП-К) [75], обеспечивающий высокий уровень накопленной деформации  $e$  за один цикл обработки ( $e \geq 3$ ) и интенсивное измельчение исходной структуры [20].

Процесс реализуется следующим образом (рисунок 2.1): заготовка 1 подается на вход рабочего канала, образованный прямоугольной гравюрой

вращающегося рабочего колеса 2 и неподвижным прижимом 3. Посредством вращения 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.

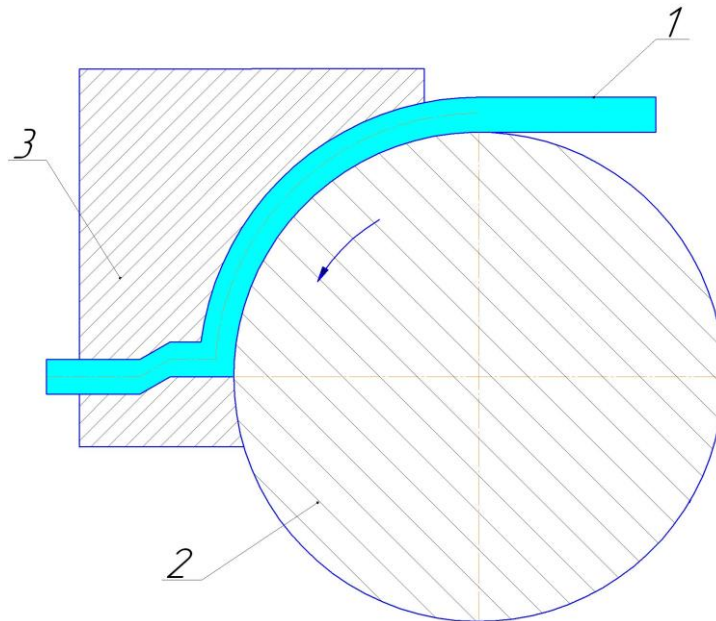


Рисунок 2.1 – Схема Мульти-РКУП-К:

1- заготовка, 2- рабочее колесо, 3 – прижим

На разработанный способ непрерывного равноканального углового прессования металлических заготовок в виде прутка был получен патент № 2560474 РФ [75].

## 2.2 Условия и допущения, принятые при моделировании

Моделирование течения металла по предложенной схеме было проведено с использованием программного комплекса Deform-3D [80], широко используемого при анализе пластических процессов [81-83].

Данный продукт основан на применении метода конечных элементов (МКЭ) – численного метода решения задач прикладной физики. МКЭ является сеточным методом и используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидро- и электродинамики.

Система Deform-2D/3D уже более двадцати лет применяется на предприятиях машиностроения, автомобилестроения и в других отраслях по всему миру. Это указывает на достоверность получаемых результатов и надежность применяемого продукта.

При помощи программного комплекса Deform-3D можно провести анализ поведения металла, температурного поля, нагрузки на инструмент в формате 3D при различных операциях обработки металлов давлением. Поэтому применение данной программы в работе является целесообразным.

Материал исходной заготовки – алюминиевый сплав системы Al-Mg-Si Al6101 (российский аналог АД31Е). Размеры квадратного поперечного сечения исходной заготовки – 12x12 мм, длина – 1000 мм. Были включены условия компенсации объема модели заготовки. При моделировании в 3D комплексе заготовку разбили на тетраэдры, количество которых составляло 52 000. Минимальный размер элемента – 0,45 мм, максимальный размер – 0,9 мм. Поперечное сечение конечной продукции профиля – 10 x 10 мм.

Заготовка – пластичное тело. Штамповый инструмент – абсолютно жесткое тело. На контактных поверхностях оснастки задано условие непроницаемости. Для случая моделирования объемной схемы деформации с высокими контактными напряжениями использован фактор трения по Зибелю.

Моделирование было выполнено для процесса деформации комнатной температуры с учетом прироста температуры металла за счет теплового эффекта деформации.

Модели заготовки и инструмента были созданы с помощью системы CAD – КОМПАС-3D и сохранены в формате «stl».

При моделировании углового прессования алюминиевых заготовок были использованы кривые упрочнения, полученные по результатам механических

испытаний на растяжение. Механические испытания проводились при температурах 20 °, 100 °, 150 °, 200 °С на установке Instron 1185 со скоростями деформации  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Характеристики прочности и пластичности были определены в соответствии с ГОСТ 1497-73 [84] по результатам испытаний образцов с размерами рабочей части Ø3 x 15 мм.

Количество шагов моделирования – 320...380, с временем между шагами – 0,5 с.

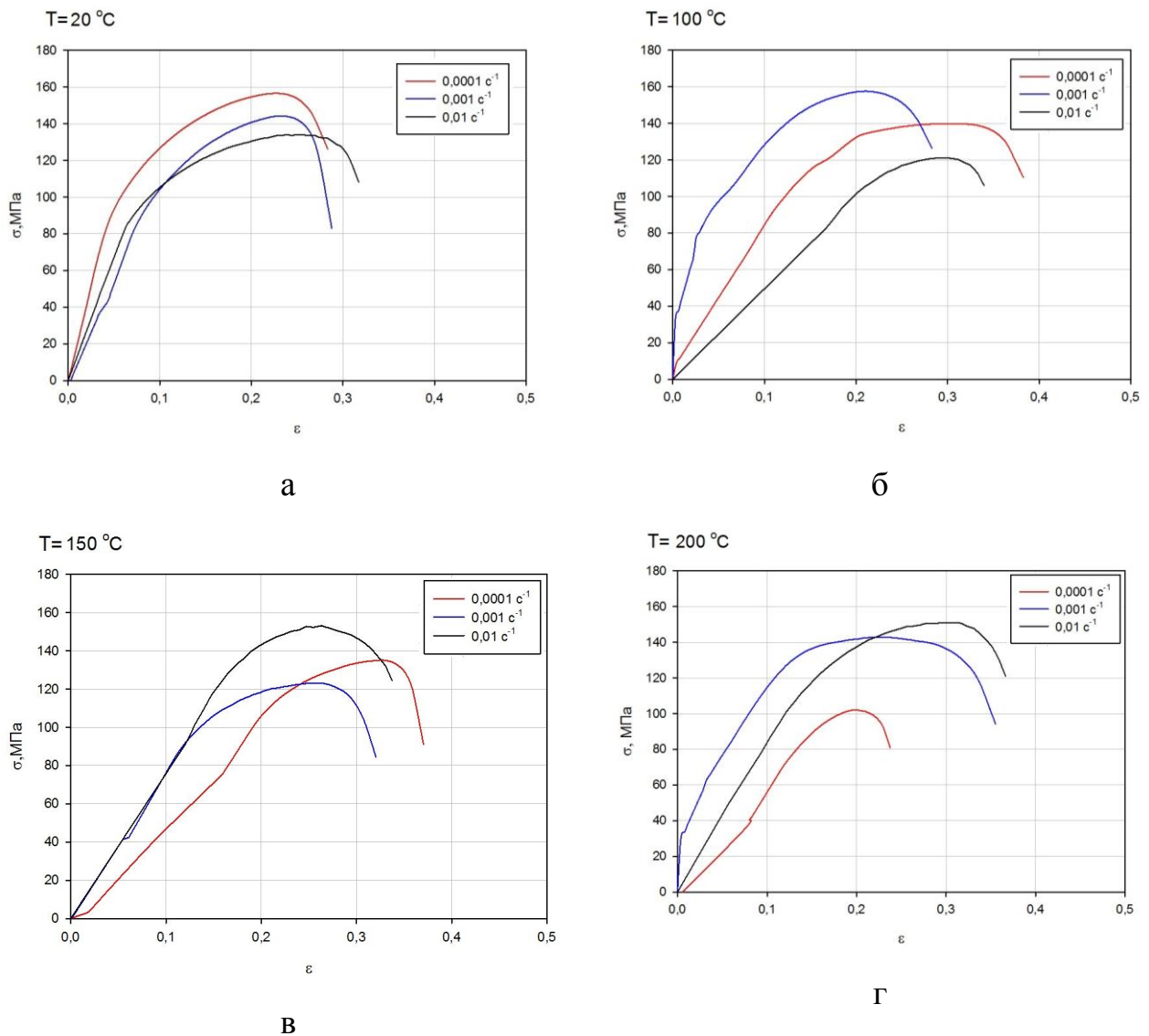


Рисунок 2.2 – Кривые деформационного упрочнения сплава Al6101 при различных скоростях деформации (0,01; 0,001; 0,0001 с<sup>-1</sup>) и температуре:

а – 20°С; б – 100°С; в – 150°С; г – 200°С

## 2.3 Структура исследования

В схеме Мульти-РКУП-К, в отличие от известного метода РКУП-Конформ, при деформировании заготовки заметно увеличиваются путь и поверхность реактивного трения, что увеличивает силовые параметры процесса, неоднородность течения, а также уровень контактных сил взаимодействия пары «материал-инструмент». Поэтому установление рациональной геометрической формы используемой оснастки является актуальной научной задачей, решение которой позволит обоснованно решать вопросы проектирования оснастки и режимов процесса Мульти-РКУП - К.

Алгоритм, по которому было проведено компьютерное моделирование процесса Мульти-РКУП-К, показан на рисунке 2.2. Данный алгоритм был выбран исходя из того, что геометрические параметры деформирующей оснастки при разработке нового процесса играют важную роль.



Рисунок 2.3 – Алгоритм действий при исследованиях

### 2.3.1 Критерии выбора углов пересечения каналов

Как было сказано ранее, 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 [78]. 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) [45-46,85] наиболее адекватно отвечает этим условиям (рисунок 2.5 а). Однако следует провести исследования по получению более рациональной конструкции рабочего канала, в частности, выбора углов пересечения каналов на стадии обработки по схеме РКУП-ПК.

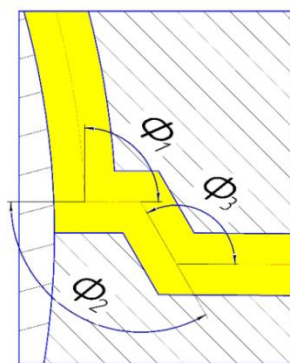


Рисунок 2.4 – Очаг деформации при Мульти-РКУП-К

Учитывая, что виртуальный подход позволяет исследовать большое количество вариантов конструкции с минимальными материальными затратами,



были выбраны следующие сочетания углов пересечения каналов (рисунок 2.4):  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 90^\circ$  и  $\Phi_3 = 90^\circ$ ;  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 90^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ ;  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 90^\circ$ ;  $\Phi_1 = 90^\circ$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ . При этом радиусы сопряжения углов были равны  $R = 0,2 \cdot h$ , расстояние между осями параллельных каналов  $K = h$ , согласно [45,86].

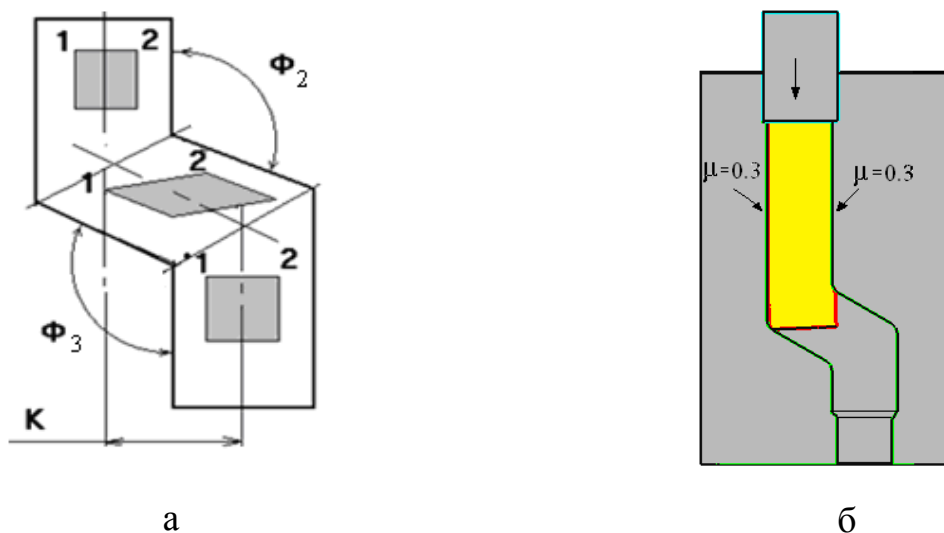


Рисунок 2.5 – Схема РКУП в оснастке с параллельными каналами:  
а –  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  – углы пересечения каналов,  $K$  – расстояние между осями каналов; б – схема процесса в комплексе Deform-3D

Фактор трения был принят равным  $\mu = 0,3$  [86], что соответствует наиболее рациональным условиям в процессе Мульти-РКУП-К (рисунок 2.5).

Скорость перемещения пуансона была задана равной 3,72 мм/с, соответствующей окружной скорости при реализации Мульти-РКУП-К.

Известно, что противодействие при процессах РКУП играет положительную роль [61,87], поэтому в данной работе было изучено также влияние противодействия, созданного за счет применения редукции на выходе заготовки из канала, на условия обработки.

На рисунке 2.6 показаны схемы деформирования при различных вариантах сочетания углов пересечения каналов с указанием средних линий тока, разделенных на равные отрезки, которые обозначены точками  $P_i$  ( $i = 1 \dots 15$ ).

Условия для представленных вариантов сочетания углов пересечения каналов были идентичными.

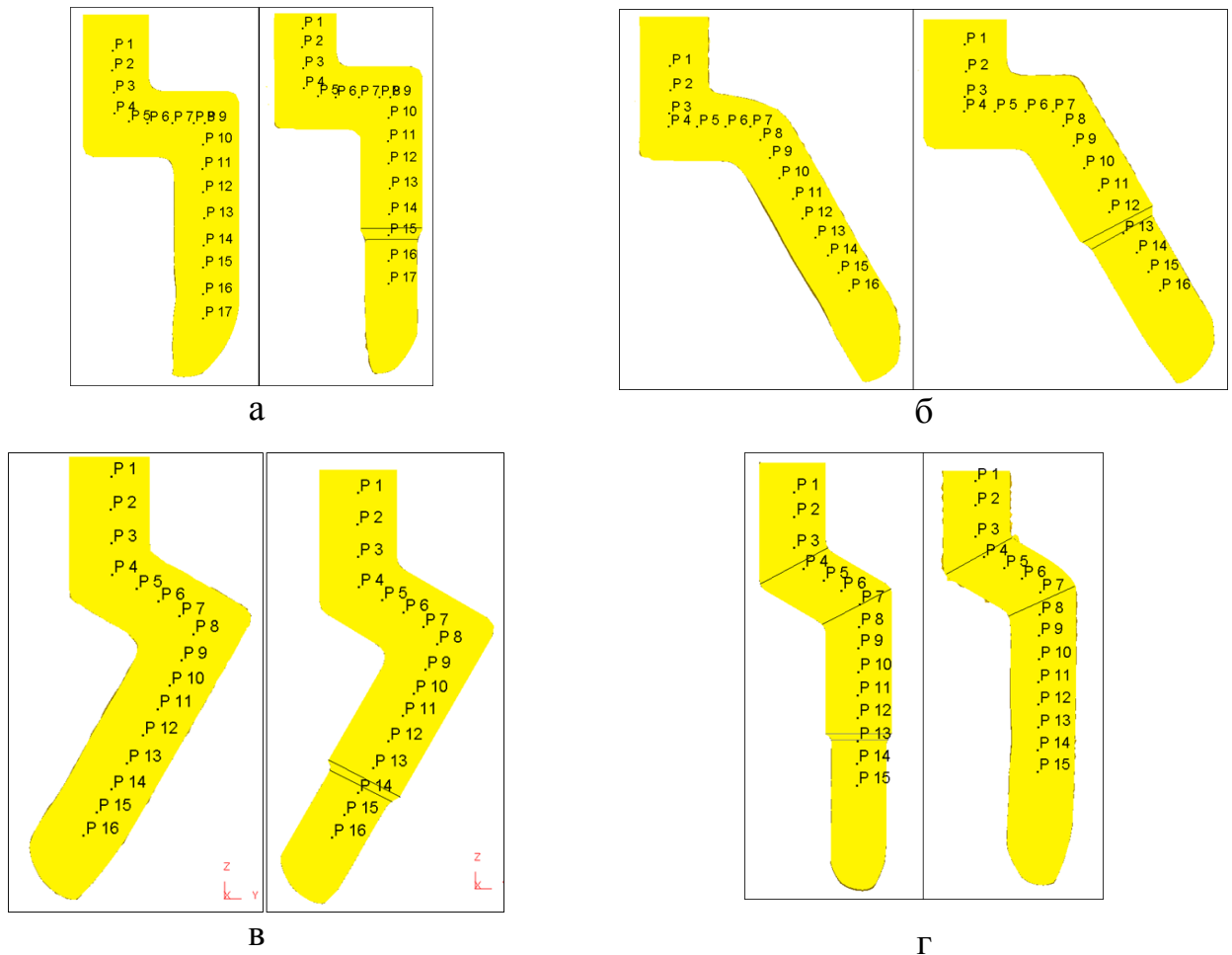


Рисунок 2.6 – Распределение точек по средней линии тока образца с редуцией и без редуции: а –  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$ ; б –  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$ ; в –  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$ ; г –  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$

Сравнение схем было проведено по следующим параметрам: распределение интенсивности деформации в поперечном и продольном сечениях заготовки, контактные напряжения, прирост температуры и максимальная осевая сила действия пуансона на заготовку.

Деформированное состояние на практике оценивается по степени деформации. Среднее значение степени деформации  $e_i$ , полученное по результатам моделирования (параметр strain-effective), было сопоставлено с

расчетным значением. Для расчета среднего значения  $e_i$  была использована формула (2.1) для РКУП [88]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (2.1)$$

где  $e_i$  – интенсивность деформации за один проход,  $\varphi$  – угол между пересекающимися каналами.

Интенсивность деформации  $e_N$  за несколько проходов РКУП-ПК была рассчитана по формуле (2.2):

$$e_N = 2 \cdot e_i. \quad (2.2)$$

Анализ деформированного состояния в поперечном сечении заготовки проводился в области расположения точки № 14, с учетом того, что в этой области наблюдается устойчивая стадия течения материала (рисунок 2.6).

Контактные напряжения и температурный фактор влияют на выбор материала оснастки и стойкость инструмента. Известно, что допустимые величины напряжений современных сталей для холодной деформации могут составлять от 1300 до 2000 МПа, в зависимости от марок используемых сталей [89], поэтому этот фактор учитывается при выборе материала штамповой оснастки.

Также важным критерием выбора углов пересечения каналов является сила деформирования, которую необходимо учитывать при выборе оборудования и проектирования оснастки.

### **2.3.2 Критерии выбора радиусов сопряжения**

После рационализации углов пересечения каналов необходимо определить радиусы сопряжений в выходной части каналов. В работах [90-92] показано, что при РКУП на однородность деформированного состояния заготовок влияют геометрические параметры канала прессования, в частности, величины углов и

радиусов сопряжения в местах пересечения формообразующих частей канала. Для снижения многовариантности экспериментов варьировали радиусами сопряжения  $R$  на выходной части канала (рисунок 2.7 а), остальные радиусы соответствовали наиболее рациональным значениям для РКУП обработки  $R = 0,2 \cdot h$  [90-92].

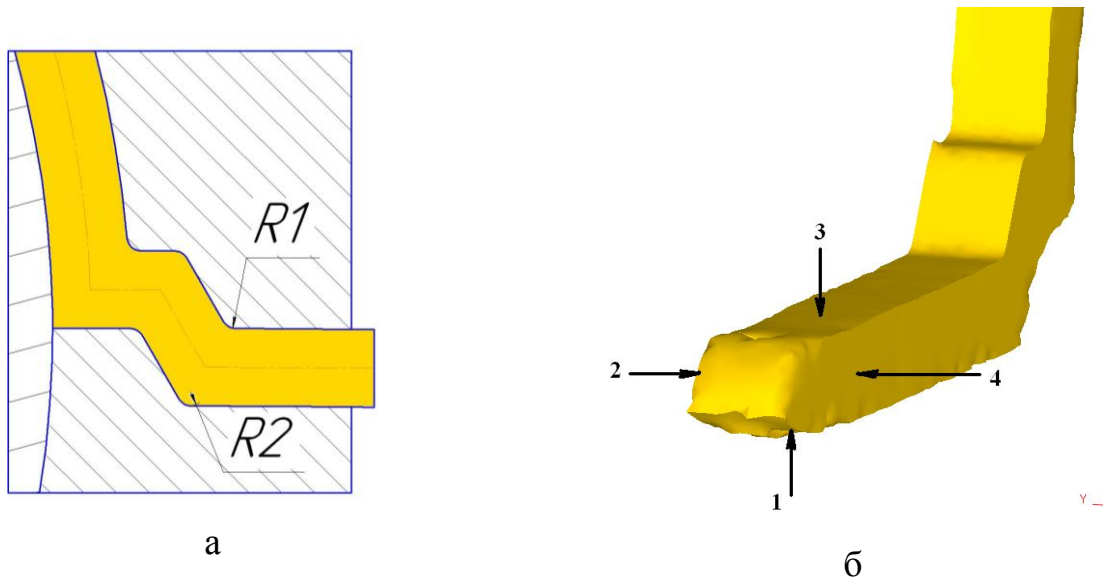


Рисунок 2.7 – Схема процесса Мульти-РКУП-К:

а –  $R1, R2$  – радиусы сопряжения на выходной части канала; б – Схема расположения поверхностей: 1 - 4 – номера поверхностей

Были получены и исследованы картины распределения интенсивности деформации в поперечном сечении заготовки для оценки однородности поля деформаций, картины (объемные) распределения величин главных напряжений для оценки реализуемой схемы (сжатие – растяжение), картины (плоские - продольное сечение) величин скоростей деформации в очагах сдвига для оценки однородности структуры и механических свойств, а также графики крутящих моментов на рабочем колесе для оценки силовых параметров процесса.

При анализе были приняты во внимание следующие обстоятельства:

– повышенные значения величин растягивающих напряжений могут приводить к появлению механических дефектов (трещин) в РКУП образцах [92];

- повышение скорости деформации активизирует скольжение дислокаций и двойникование, а также интенсифицирует процесс измельчения структуры [90];
- уровень сил и контактных напряжений важен для выбора оборудования и материала инструмента.

Однородность деформированного состояния была исследована методом сканирования поперечного сечения образца. Была проведена оценка полученной разницы накопленной деформации.

В процессе исследований было проанализировано три варианта геометрического исполнения канала прессования. Первый вариант с  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$ ; второй с  $R1 = 0,2 \cdot h$ ,  $R2 = 0,5 \cdot h$  и третий с  $R1 = 0,5 \cdot h$ ,  $R2 = 0,5 \cdot h$ , т.е. радиус сопряжения канала имеет тенденцию к увеличению. Увеличение радиуса сопряжения канала прессования, как правило, приводит к некоторому снижению интенсивности деформационного воздействия в приконтактной к радиусу сопряжения области заготовки при РКУП [93]. Поэтому в предложенных вариантах геометрический фактор, в частности, увеличение величины радиуса сопряжения, был использован как основной инструмент управления деформированным состоянием.

### **2.3.3 Результаты исследований углов пересечения каналов на стадии обработки по схеме РКУП-ПК**

На рисунке 2.8 показано распределение интенсивности деформации в поперечном сечении, проходящем через точку средней линии тока № 14 (рисунок 2.6), для этого было проанализировано около 100 точек в данном сечении.

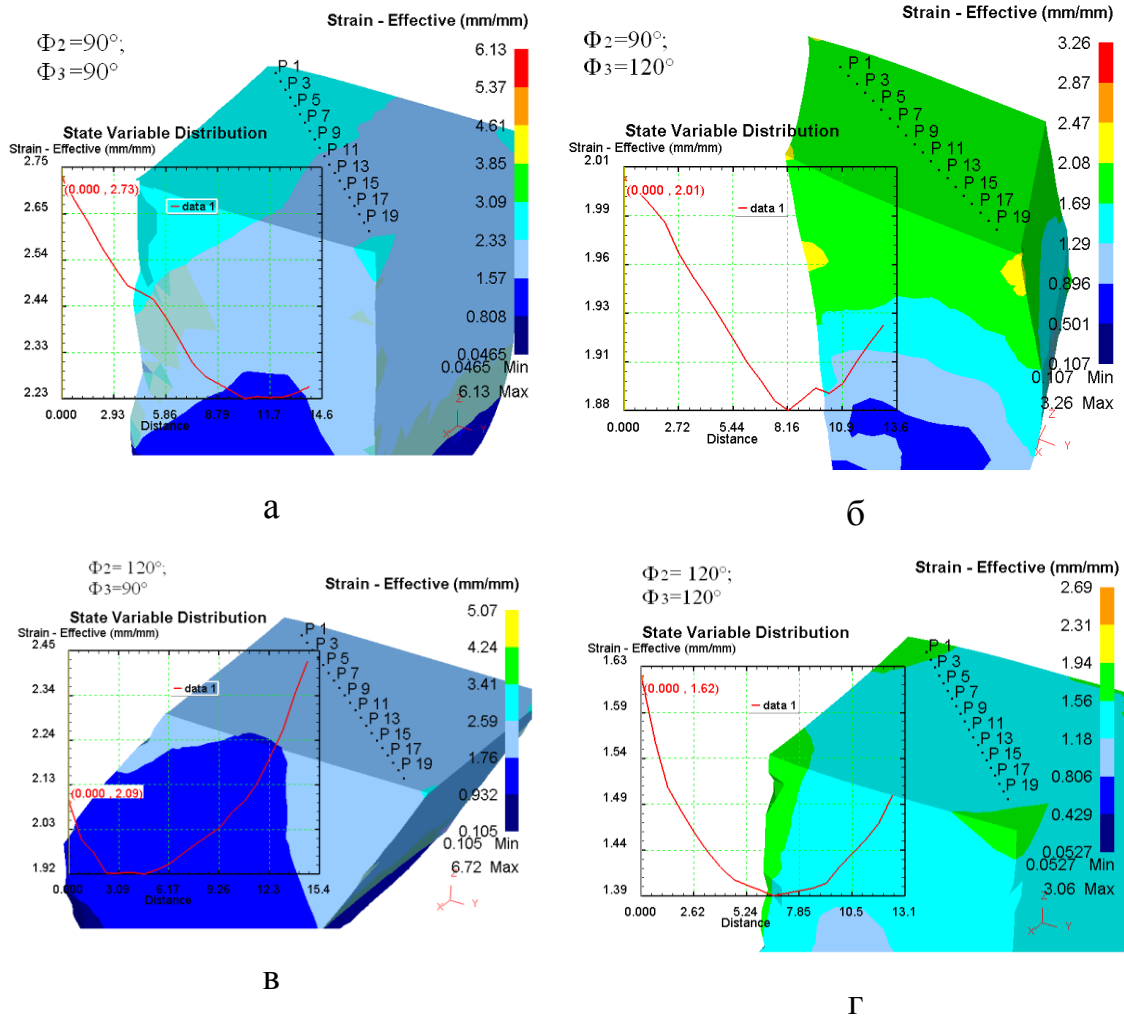


Рисунок 2.8 – Распределение интенсивности деформации в поперечном сечении образцов, проходящем через точку №14:

а –  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$ ; б –  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$ ; в –  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$ ;

г –  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$

По полученным результатам моделирования составлены гистограммы (рисунки 2.9-2.10) и таблица экспериментальных данных (таблица 2.1).

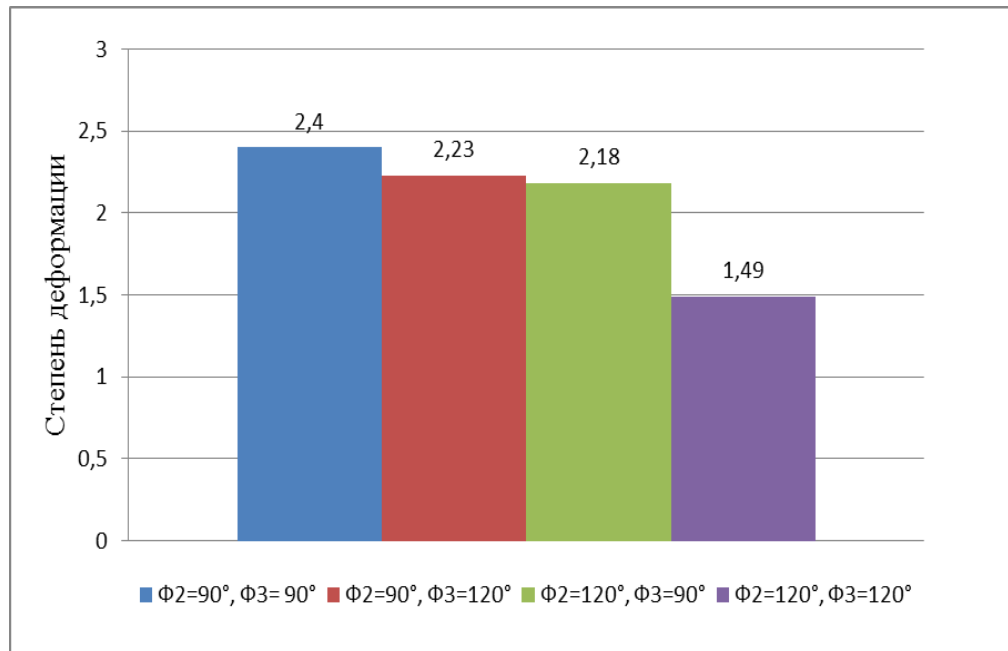


Рисунок 2.9 – Накопленная степень деформации при различных вариациях углов пересечения каналов

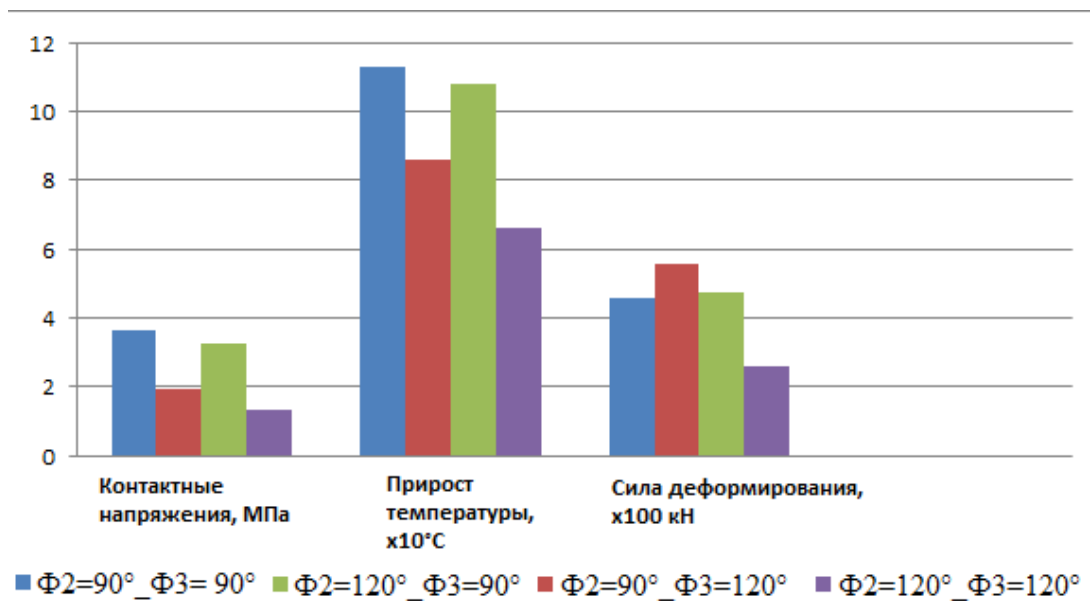


Рисунок 2.10 – Параметры сравнения при различных вариациях углов пересечения каналов

Таблица 2.1 – Таблица экспериментальных данных

Вариант сочетания углов		Степень деформации (среднее по сечению)		Максимальные контактные напряжения, $10^3$ МПа	Прирост температуры, °С	Сила деформирования, МН
		по результатам моделирования	согл. (2.1-2.2)			
$\Phi_2 = 90^\circ$ ; $\Phi_3 = 90^\circ$	без редукции	2.40	2.30	3.62	113	0.718
	с редукией	3.20	3.10	5.18	170	1.270
$\Phi_2 = 90^\circ$ ; $\Phi_3 = 120^\circ$	без редукции	2.23	1.82	1.93	86	0.367
	с редукией	2.50	2.62	3.93	144	0.369
$\Phi_2 = 120^\circ$ ; $\Phi_3 = 90^\circ$	без редукции	2.18	1.82	3.24	108	0.547
	с редукией	2.42	2.62	4.95	151	0.772
$\Phi_2 = 120^\circ$ ; $\Phi_3 = 120^\circ$	без редукции	1.49	1.34	1.31	66	0.247
	с редукией	2.06	2.14	3.56	134	0.623

Анализ табличных данных показывает, что при РКУП-ПК сила противодействия увеличивает контактные напряжения на оснастке, прирост температуры и силу деформирования. Также сила противодействия способствует более полному заполнению каналов и, соответственно, реализации схемы простого сдвига. Как положительный фактор повышенное гидростатическое давление улучшает деформируемость металла при РКУП, и, соответственно, подавляются процессы трещинообразования [94]. Поэтому редукция заготовки на выходе из канала прессования не только повышает качество продукции, но и позволяет получать круглое поперечное сечение деформированных длинномерных заготовок, как наиболее технологичное для дальнейшего передела,



например, волочения и изготовления продукции в виде электротехнической проволоки.

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 редукиции) и 5180 МПа (с редукицией), значительно превышающие предельно допустимые напряжения порядка 1300 МПа [89], поэтому РКУП-ПК с такими углами пересечения каналов нельзя реализовать на практике.

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

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

Также была проведена оценка однородности распределения степени деформации на поперечном сечении выходной части образца при деформировании без редукиции (рисунок 2.5). Выявлено, что при пересечении каналов под углами  $\Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\Phi_3 = 90^\circ$  разность 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 разность составляет 0,2...0,58. Соответственно, при  $\Phi_2 = 120^\circ$ ,  $\Phi_3 = 120^\circ$  распределение накопленной деформации более однородное, по сравнению с другими вариантами.

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

Таким образом, для практической реализации процесса Мульти-РКУП-К выбрано сочетание углов  $\Phi_1 = 90$ ,  $\Phi_2 = 120^\circ$  и  $\Phi_3 = 120^\circ$ , так как данный вариант позволит получать образцы с УМЗ структурой при однородном деформированном

состоянии и при более низких контактных напряжениях, по сравнению с другими сочетаниями углов.

### **2.3.4 Результаты исследований влияния величины радиусов сопряжений в выходной части канала оснастки на напряженно-деформированное состояние**

Исследование первого варианта конструкции с  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$

Для исследования главных напряжений были получены картины полей главных напряжений (рисунок 2.11), образующихся на поверхности заготовки в процессе обработки методом Мульти-РКУП-К. Анализ полученных данных показал, что в основном на поверхности образцов действуют сжимающие напряжения, причем наибольшие значения до 1600 МПа формируются при первом сдвиге на поверхности 3. Растягивающие напряжения в очаге деформации присутствуют на поверхности 3, их величина составляет 20-40 МПа, что заметно ниже предела текучести алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si при 20 °С. Очевидно, что такой уровень растягивающих напряжений не может повлиять на нарушение сплошности заготовок при обработке.

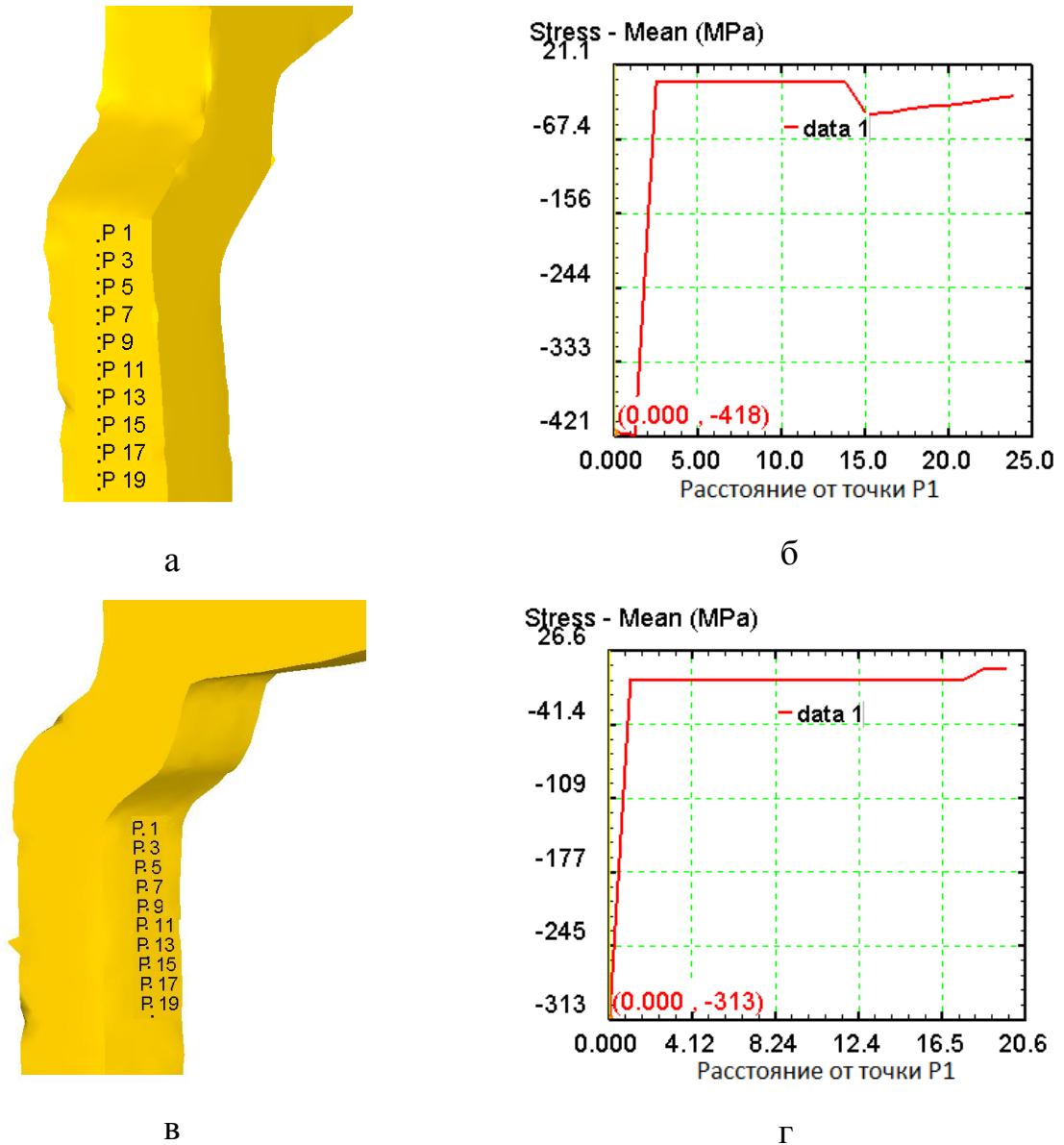


Рисунок 2.11 – Картина полей главных напряжений для варианта с радиусами сопряжения  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$  : а – схема расположения точек на поверхности 1; б – график распределения главных напряжений на поверхности 1; в – схема расположения точек на поверхности 3; г – график распределения главных напряжений на поверхности 3

Картина распределения накопленной деформации ( $e_i$ ) при обработке с радиусами  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$  показана на рисунке 2.12. Видно, что распределение деформации в сечении неоднородное, приконтактные к поверхности 3 области заготовок имеют повышенный уровень накопленной деформации, причем разница

между минимальными и максимальными значениями составляет около 1,5 единиц. График изменения накопленной деформации  $\epsilon$  имеет параболический характер, при этом в левой части графика наблюдается незначительное изменение величины  $\epsilon$ , а в правой – максимальное, до вышеуказанного значения.

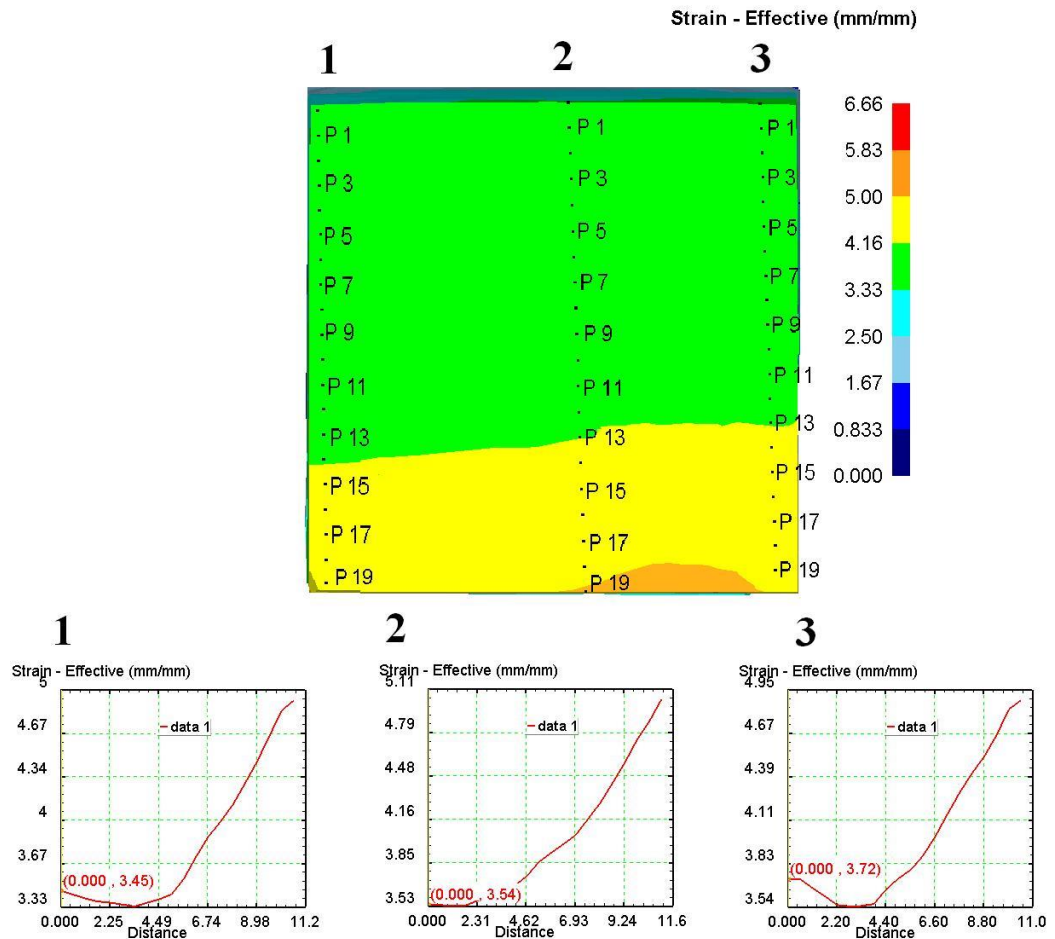
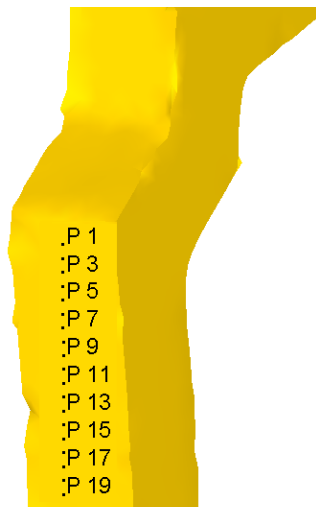


Рисунок 2.12 – Картина распределения степени деформации : 1,2,3 – графики распределения деформации на сканированных участках для варианта с радиусами сопряжения  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$

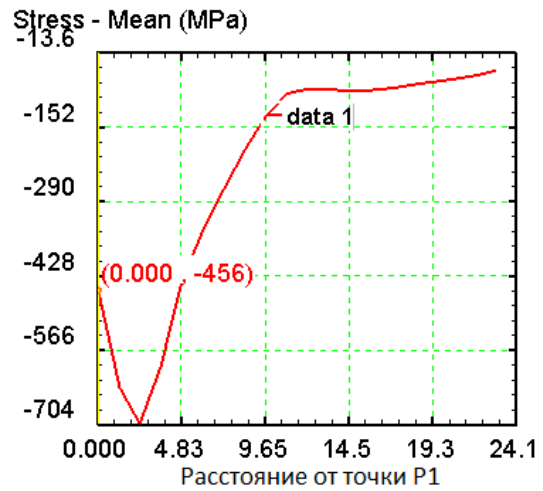
Исследование второго варианта конструкции с  $R1 = 0,2 \cdot h, R2 = 0,5 \cdot h$

При исследовании главных напряжений выявлено, что в отличие от предыдущего варианта растягивающие напряжения возникают не только на поверхности 3 заготовки, но и на поверхности 1 между вторым и третьим очагом деформации (рисунок 2.13). Величины данных напряжений также невысоки

(максимальное значение около 90 МПа), и маловероятно ожидать образование дефектов при наличии довольно высокой пластичности материала (15-20%) с учетом деформационного разогрева.



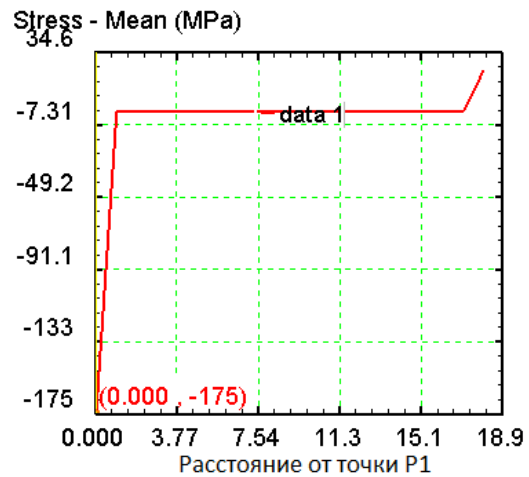
а



б



в



г

Рисунок 2.13 – Картина распределения главных напряжений с радиусами сопряжения  $R1 = 0,2 \cdot h$ ,  $R2 = 0,5 \cdot h$ : а – схема расположения точек на поверхности 1; б – график распределения главных напряжений на поверхности 1; в – схема расположения точек на поверхности 3; г – график распределения главных напряжений на поверхности 3

Картина деформированного состояния представлена на рисунке 2.14. Анализ показывает, что графики распределения накопленной деформации имеют схожий характер с вариантом №1, однако для варианта №2 наблюдается подобие только с правой частью полученного для первого варианта графика, т.е. накопленная деформация немонотонно возрастает от поверхности 3 к поверхности 1. Разница между минимальными и максимальными значениями накопленной деформации довольно высокая и составляет около 2 единиц.

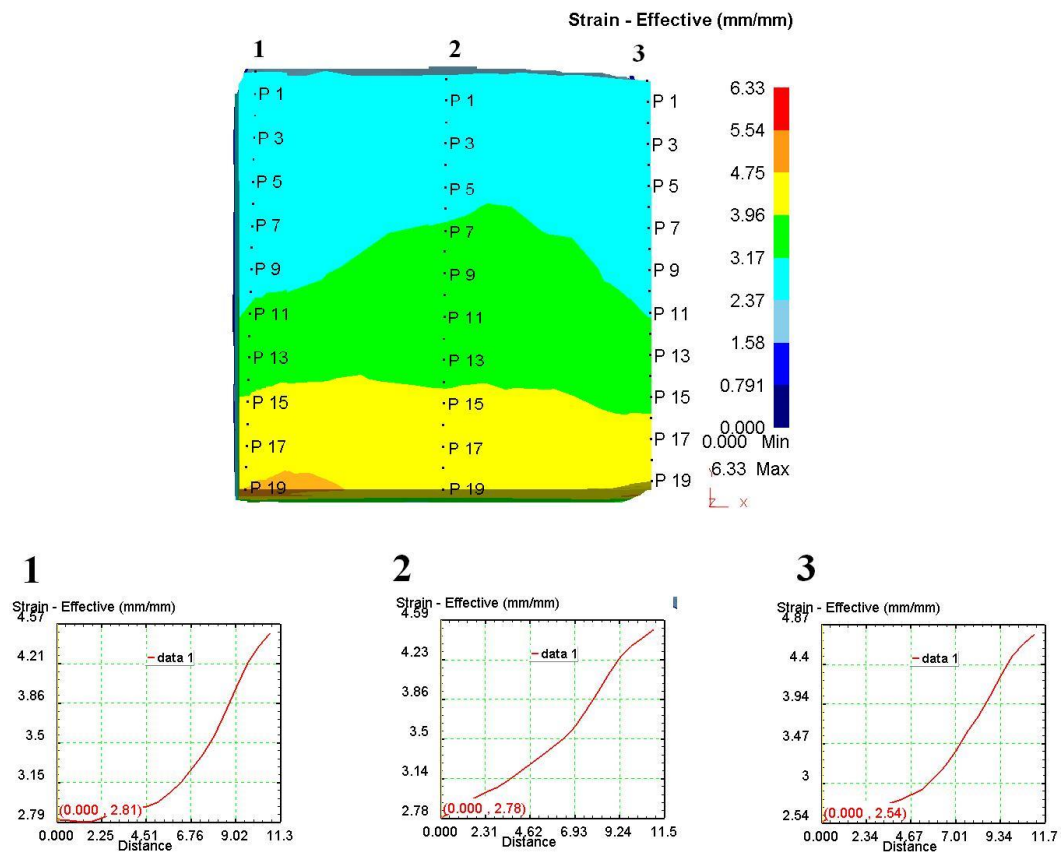


Рисунок 2.14 – Картина распределения степени деформации и 1,2,3 – графики распределения деформации на сканированных участках для варианта с радиусами сопряжения  $R1 = 0,2 \cdot h$ ,  $R2 = 0,5 \cdot h$

Исследование третьего варианта конструкции с  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$

Картина полей главных напряжений представлена на рисунке 2.15. Из анализа видно, что характер распределения растягивающих напряжений аналогичен варианту № 2. При этом значение максимальных растягивающих напряжений ниже и составляет не более 10 МПа.

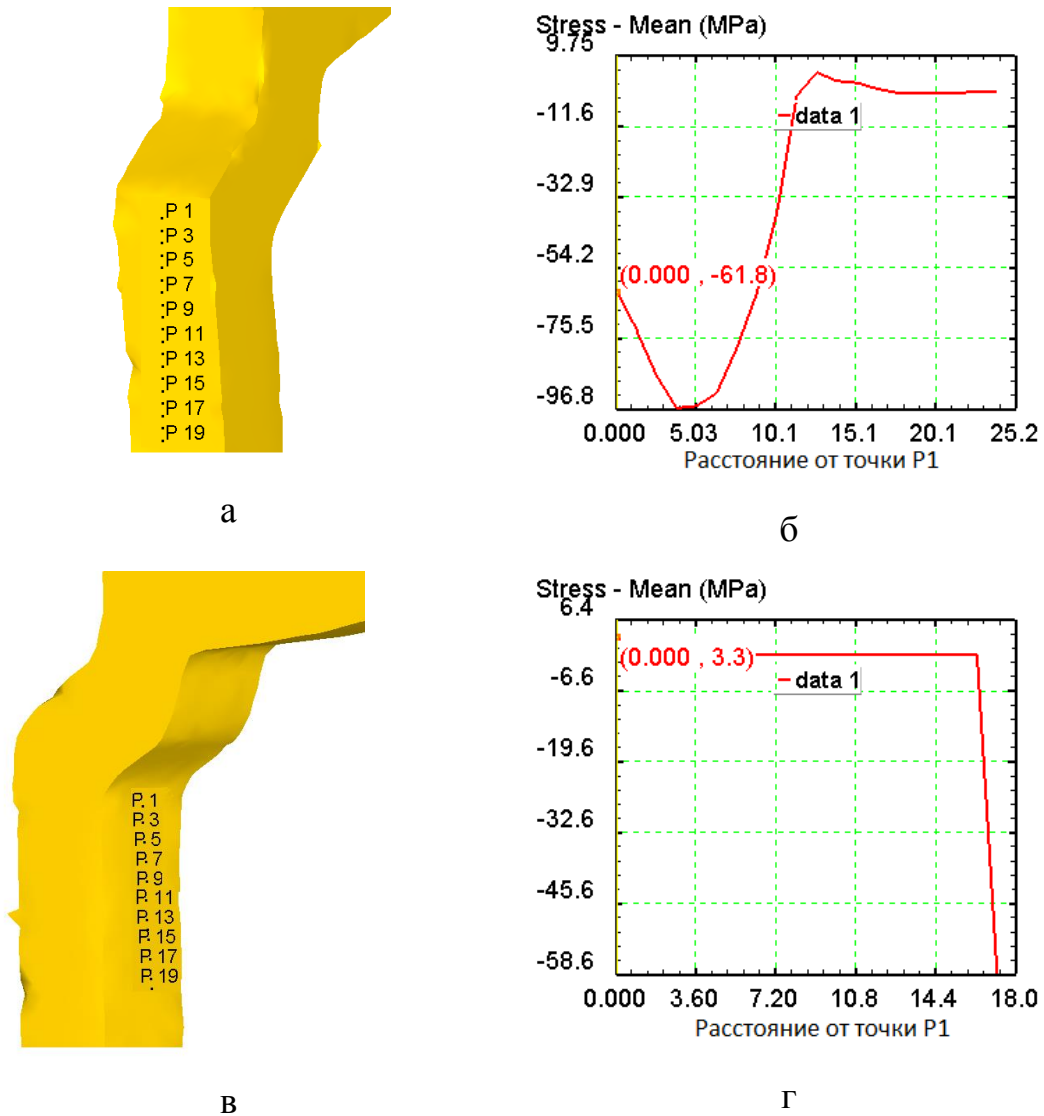


Рисунок 2.15 – Картина распределения главных напряжений с радиусами сопряжения  $R1 = 0,5 \cdot h$ ,  $R2 = 0,5 \cdot h$ : а – схема расположения точек на поверхности 1; б – график распределения главных напряжений на поверхности 1; в – схема расположения точек на поверхности 3; г – график распределения главных напряжений на поверхности 3

Картина деформированного состояния представлена на рисунке 2.16. Из полученной информации видно, что характер распределения накопленной деформации аналогичен варианту №1, однако заметно, что практически в три раза, до 0,4-0,6 единиц снизилась разница между минимальным и максимальным значениями.

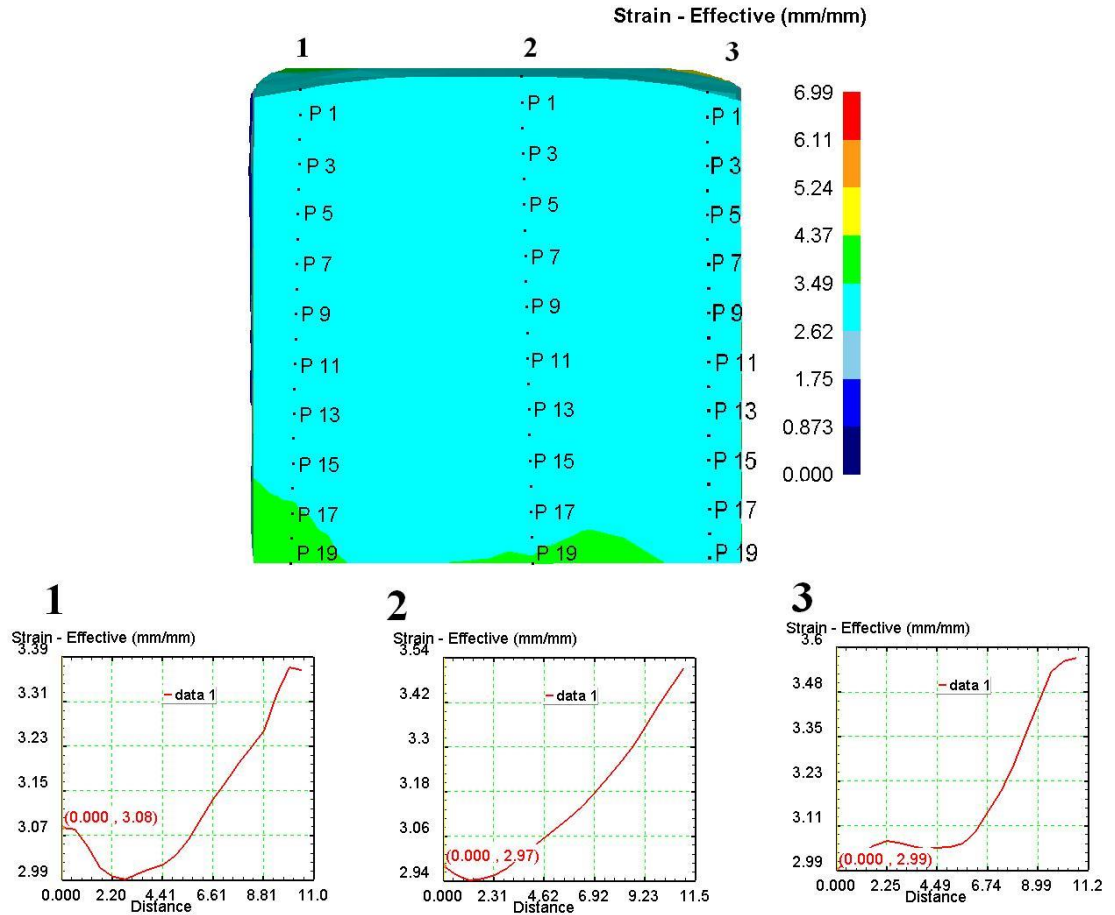


Рисунок 2.16 – Картина распределения степени деформации и 1,2,3 – графики распределения деформации на сканированных участках для варианта с радиусами сопряжения  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$

Картини распределения скоростей деформации для трех вариантов конструкции канала прессования представлены на рисунке 2.17. Из анализа полей скоростей деформации в очагах деформации видно, 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.



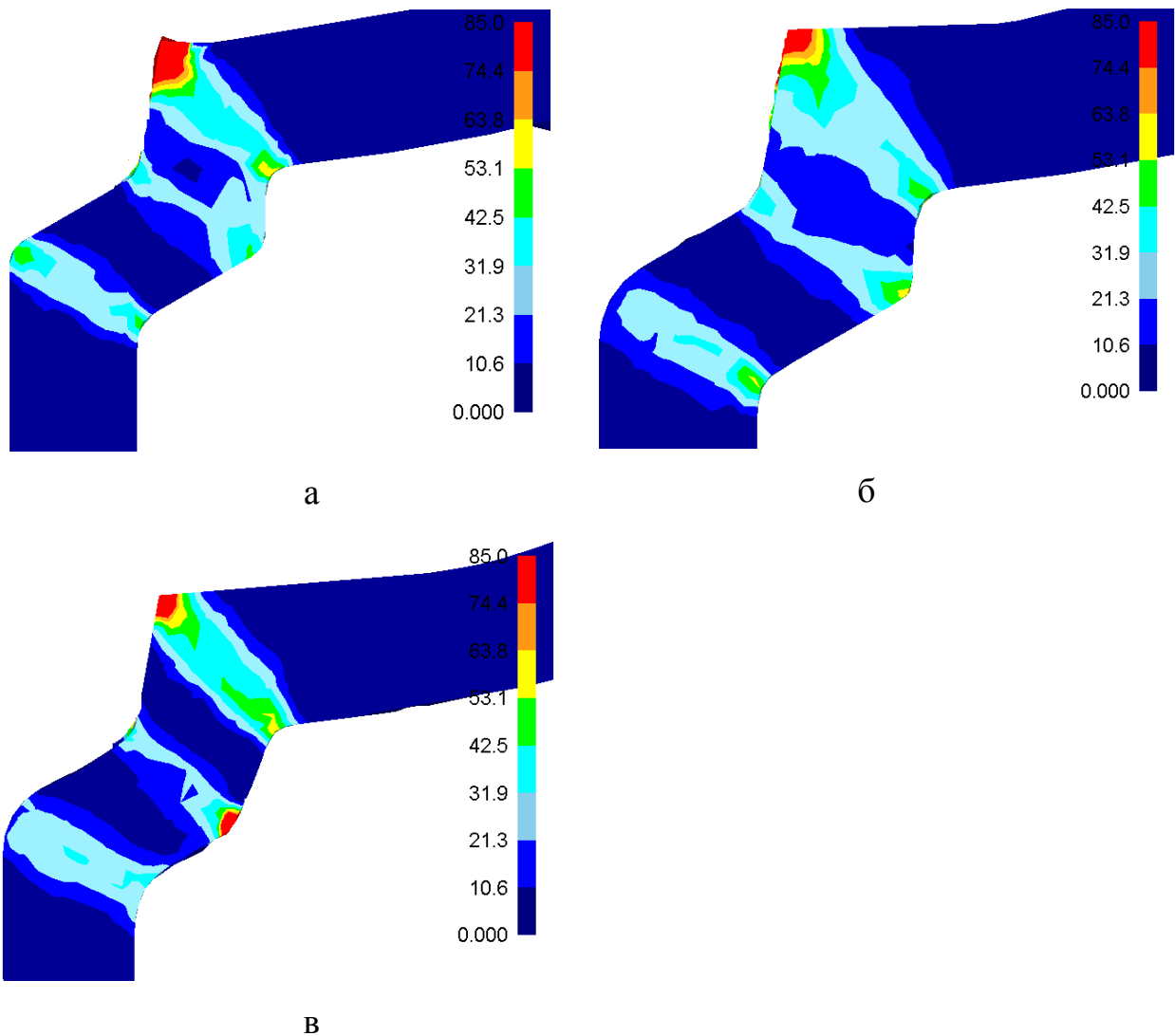


Рисунок 2.17 – Картины полей скоростей деформации:  
 а –  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$ ; б –  $R1 = 0,2 h, R2 = 0,5 \cdot h$ ; в –  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$

Исследование величины крутящего момента на рабочем колесе в зависимости от вариантов исполнения радиусов сопряжения. В работе проведена оценка максимального крутящего момента, обеспечивающего силовые условия деформирования заготовок методом Мульти-РКУП-К. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 2.18.

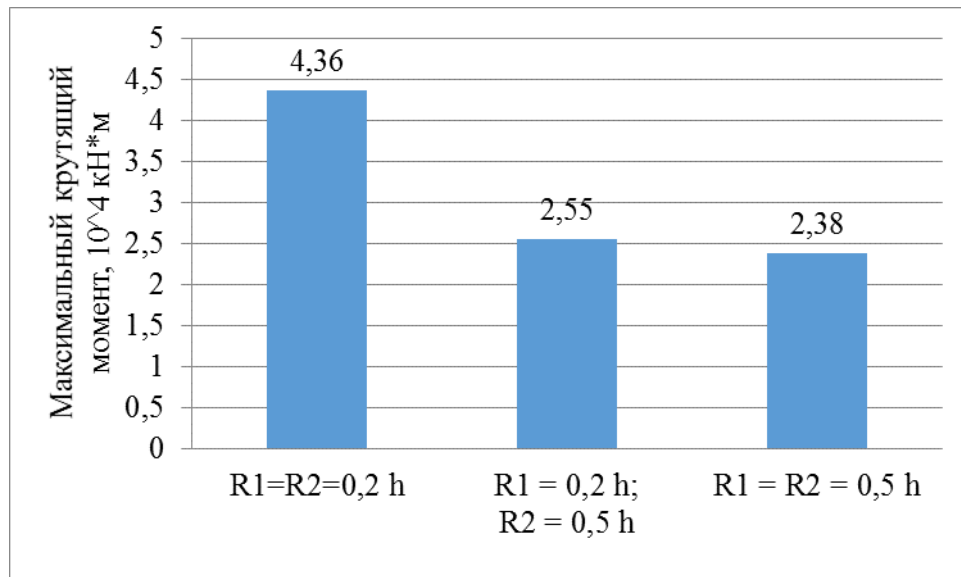


Рисунок 2.18 – Результаты исследования силовых параметров обработки при Мульти-РКУП-К

Из анализа полученных результатов видно, что увеличение радиусов сопряжения каналов приводит к снижению крутящего момента на рабочем колесе, при этом разница между вариантом  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$  и вариантом  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$  почти двукратная.

Таким образом, установлено, что изменение геометрических параметров ступенчатого канала прессования, в частности, увеличение радиусов сопряжения на выходной части канала прессования с  $R1 = R2 = 0,2 \cdot h$  до  $R1 = R2 = 0,5 \cdot h$ , оказывает большое влияние на напряженное и деформированное состояние заготовок, а также силовые условия обработки.

#### **2.4 Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при деформации методом Мульти-РКУП-Конформ с рациональными геометрическими параметрами**

Полученные результаты исследований по выбору рациональных геометрических параметров ступенчатого канала прессования позволили перейти

к компьютерному моделированию процесса деформации методом Мульти-РКУП-К в целом, с возможностью оценки схемы деформации, анализа напряженно-деформированного состояния и температурного поля заготовки, контактных напряжений на инструменте.

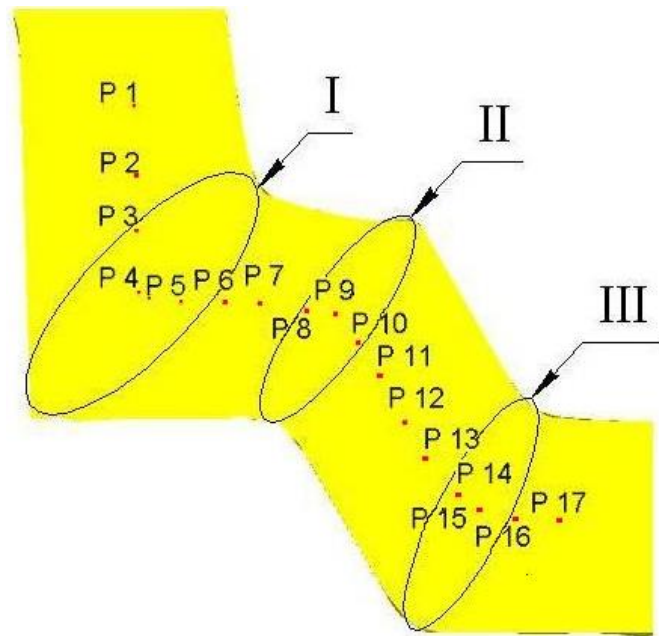
### 2.4.1 Исследование схемы деформации

С учетом того, что схема сдвига повышает интенсивность измельчения исходной структуры [95], были проведены исследования, оценивающие формирующуюся схему в очагах деформации. В качестве критерия оценки схемы деформации был использован коэффициент Лоде-Надаи [96]. Коэффициент Лоде-Надаи был рассчитан по формуле (2.3):

$$\mu = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2.3)$$

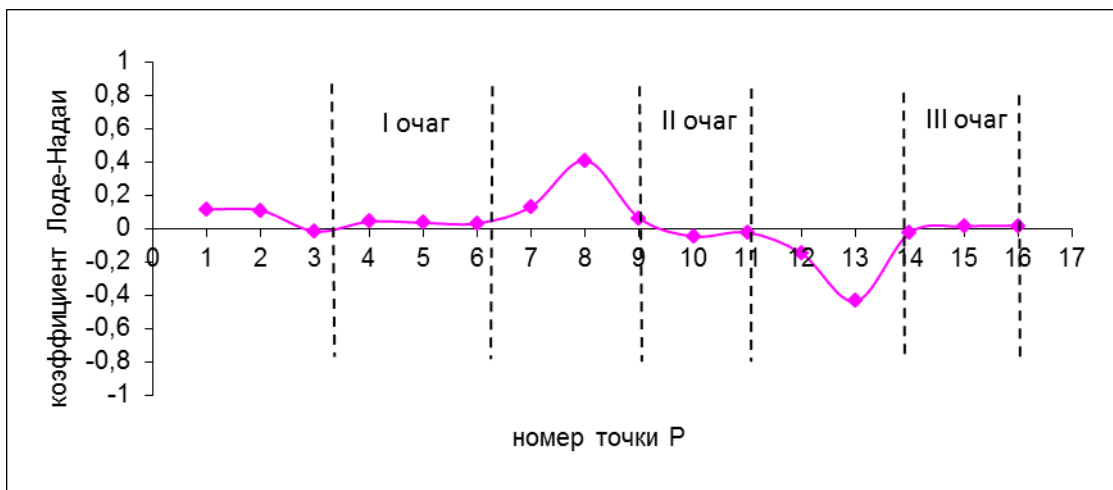
где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа, для трех последовательных очагов сдвиговой деформации. Коэффициент Лоде-Надаи характеризует форму девиатора напряжений. Тензор девиатора напряжений и шаровой тензор напряжений являются составляющими тензора напряжений, который определяет напряженное состояние в рассматриваемых точках. Известно, что в любой точке деформированного тела нормальные напряжения действуют по трем взаимно перпендикулярным направлениям, и эти напряжения называются главными. Главные напряжения были взяты из результатов компьютерного моделирования по направлениям осей координат.

Схема исследований и распределение величины коэффициента Лоде-Надаи по средней линии тока заготовки представлены на рисунке 2.19.



I, II, III - очаги деформации

а



б

Рисунок 2.19 – Исследование схемы деформации:

а – схема исследования; б – распределение величины коэффициента Лодде-Надаи по средней линии тока

Как видно из рисунка 2.19, в центральной области очагов деформации (I,II,III) преобладает схема сдвига, о чем свидетельствуют полученные значения коэффициента Лодде-Надаи близкие к 0. В областях между очагами (P1-P2) и (P6-P8) преобладает схема сжатия, а в (P11-P13) – схема растяжения. В работе [90]

показано, что простой сдвиг, для которого коэффициент Лоде-Надаи равен 0, эффективнее для измельчения структуры, чем чистый сдвиг.

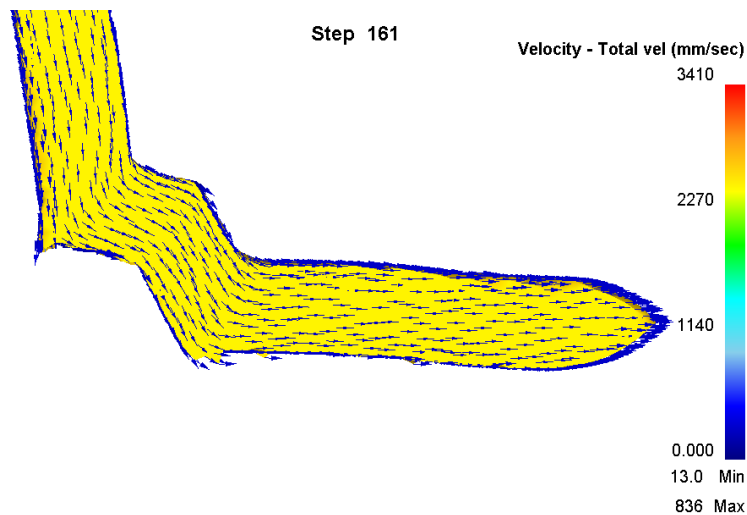


Рисунок 2.20 – Поле скоростей течения материала при Мульти-РКУП-К

Также было проанализировано поле скоростей течения металла при Мульти-РКУП-К, которое показано на рисунке 2.20. Видно, что при деформации векторы течения металла меняют направление три раза, что соответствует прохождению трех очагов деформации. При этом значение коэффициента Лоде-Надаи меняется в диапазоне от -0,5 до 0,5, что свидетельствует о немонотонном характере деформации методом Мульти-РКУП-К.

#### 2.4.2 Исследование главных напряжений и деформаций

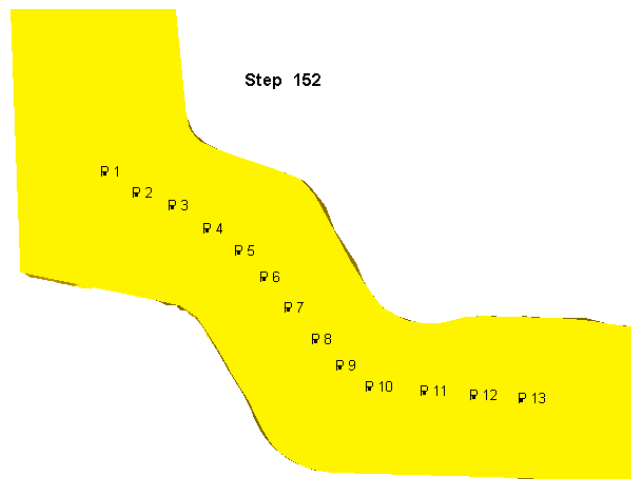
Одним из важных параметров при анализе напряженного состояния являются средние напряжения, которые вычисляются по формуле (2.4) [97]:

$$\sigma_{CP} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 3i_1, \quad (2.4)$$

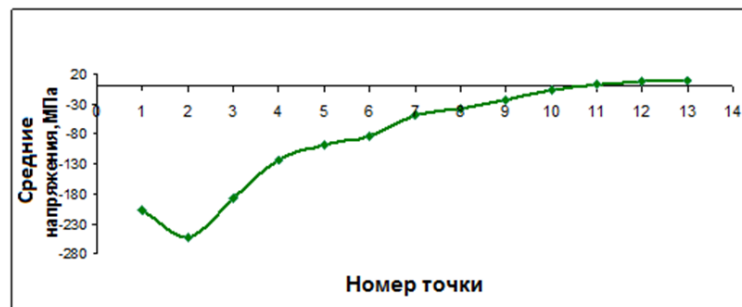
где  $\sigma_{CP}$  – среднее напряжение, МПа;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа;  $i_1$  – первый инвариант тензора напряжений.

Средние напряжения в рассматриваемой точке деформированного тела определяют жесткость схемы напряженного состояния и являются компонентами шарового тензора напряжений. Если  $\sigma_{cp} > 0$ , то в схеме напряженного состояния преобладают растягивающие напряжения, и схема считается жесткой. Если  $\sigma_{cp} < 0$ , то в схеме напряженного состояния преобладают сжимающие напряжения, и схема считается мягкой.

Анализ результатов компьютерного 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 2.21), что значительно меньше напряжения течения ( $\sim 150$  МПа) сплава при температуре деформации. Следовательно, при обработке методом Мульти-РКУП-К преобладает «мягкая» схема напряженного состояния.



а

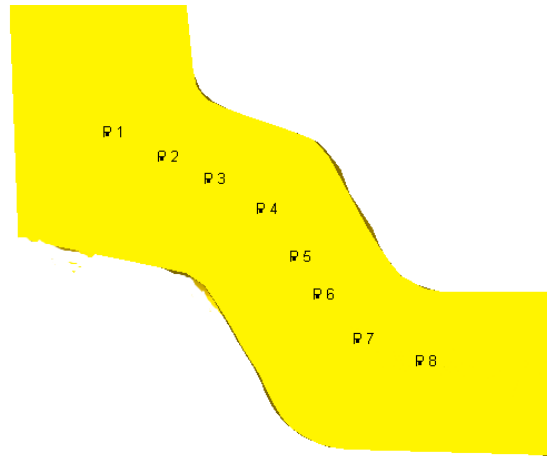


б

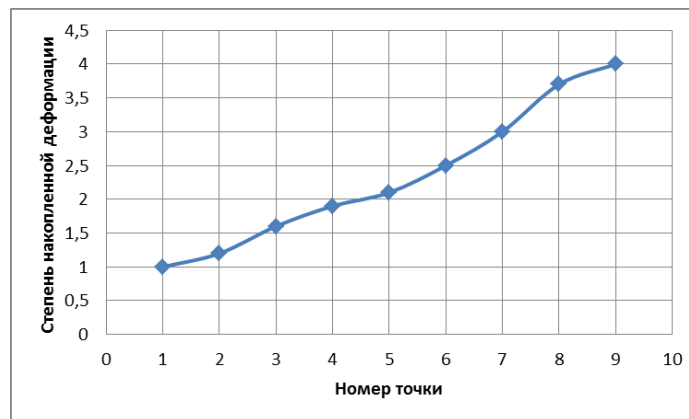
Рисунок 2.21 – Исследование главных напряжений:

а – схема исследования заготовки; б – график распределения сжимающих и растягивающих напряжений в продольном сечении образца

Из анализа деформационной картины (рисунок 2.22) следует, что в продольном сечении заготовки накопленная деформация после прохождения каждого очага деформации увеличивается и в выходной части канала составляет  $\epsilon = 3,5 \dots 4$  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 2.22 –Картина распределения степени деформации:  
а – схема исследования; б – график распределения степени деформации в  
продольном сечении образца

Таким образом, проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки и установлено, что при Мульти-РКУП-К преобладает схема сжатия, способствующая получению полуфабрикатов без нарушений сплошности. Степень деформации по результатам моделирования достигает  $\epsilon = 3,5 \dots 4$  единиц, что обеспечивает интенсивное упрочнение материала и, соответственно, получение образцов с высокими механическими свойствами.



### 2.4.3 Расчет и выбор материала штамповой оснастки

Принято, что для выбора материала штамповой оснастки необходимо знать определяющие эксплуатационные параметры рабочих элементов инструмента [98], в частности:

- 1) нормальные контактные напряжения  $\sigma_n$  в период активной деформации;
- 2) температуру в зоне контакта гравюры инструмента и деформируемой заготовки в период активной деформации на этапе температурной установившейся стадии и на этапе пауз между циклами штамповки.

Величина нормального контактного напряжения для конкретных условий деформирования  $\sigma_n^f$  и температура на контактной поверхности инструмента определяются расчетным путем, с использованием программного продукта Deform-3D, либо расчетно-аналитическим методом [98].

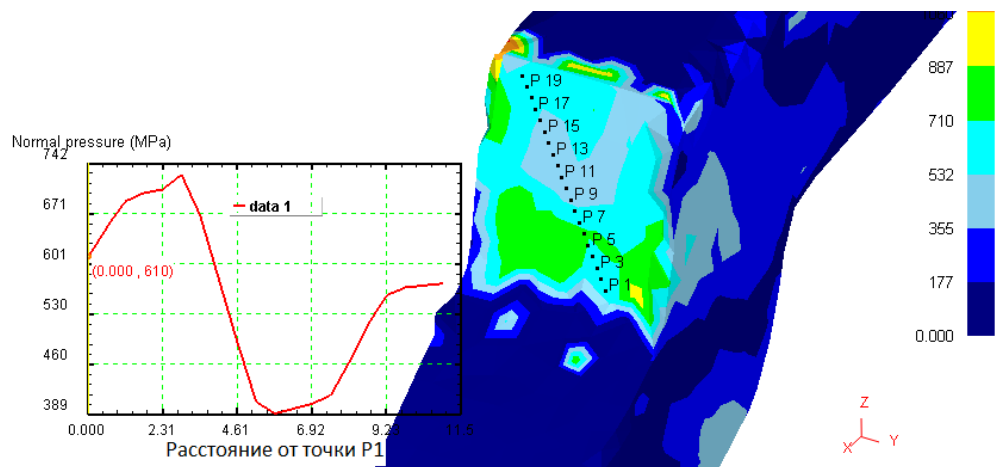


Рисунок 2.23 – Картина распределения контактных напряжений на заготовке

Как видно из рисунка 2.23, максимальные контактные напряжения составляют 750 МПа и образуются при прохождении первого очага деформации.

Допустимые величины напряжений современных сталей для холодной деформации обычно составляют до 1300 МПа [89]. Исходя из полученных

результатов контактных напряжений на заготовке и напряжениям сдвига, был выбран материал штамповой оснастки – высококачественная износостойкая инструментальная штамповая сталь 4Х4ВМФС (ДИ-22).

#### 2.4.4 Исследование температурного поля

Как известно [90], при процессах ИПД важную роль играет температура деформационного разогрева, которая оказывает влияние на структуру деформируемого материала. Рекомендуемым интервалом температур деформации является  $(0,1 \dots 0,4) T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления металла. Так для сплава Al 6101 системы Al-Mg-Si  $T_{пл}$  составляет примерно 660 °С [99].

На рисунках 2.24, 2.25 показано температурное поле заготовки в процессе Мульти-РКУП-К. Как видно, максимальный деформационный разогрев металла составляет около 240 °С и локализован в выходной части канала, то есть после прохождения всех очагов деформации.

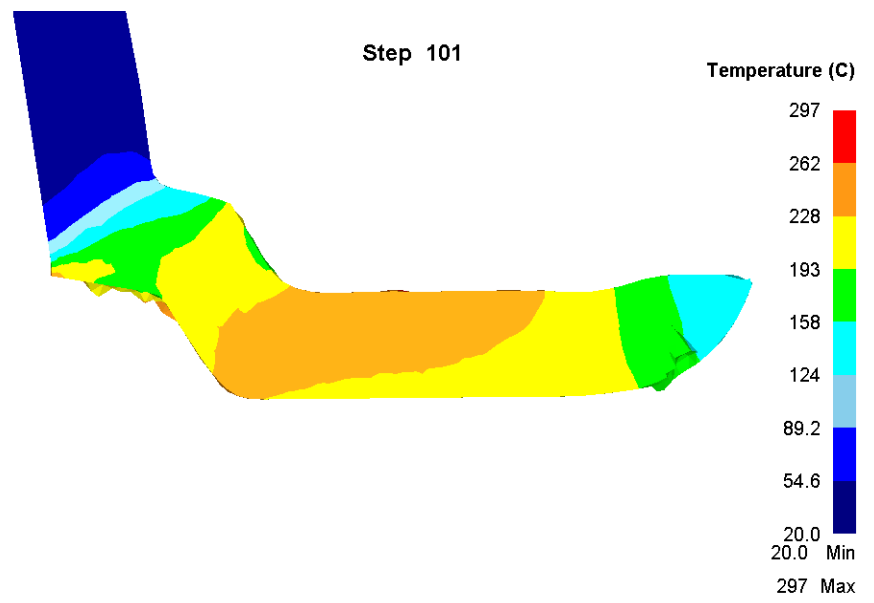


Рисунок 2.24 – Температурное поле металла при Мульти-РКУП-К

На рисунке 2.25 показано изменение температуры во время деформации: после прохождения I очага деформации металл нагревается до 120°С, после

прохождения II очага деформации – до 217°C, и после III очага деформации – до 258 °С.

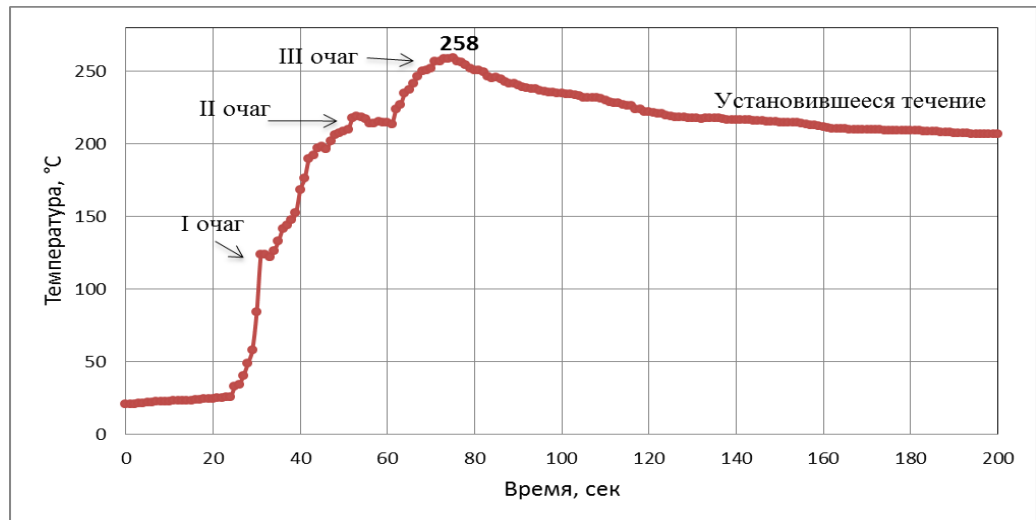


Рисунок 2.25 – Деформационный разогрев в процессе деформации

Следовательно, заготовка разогревается с 20 до ~ 260 °С, что неблагоприятно может повлиять на формирование повышенных свойств в алюминиевом сплаве, поэтому рекомендуется при практической реализации метода Мульти-РКУП-К проводить охлаждение матрицы и заготовки на выходе из канала матрицы.

### Выводы по главе

1. Проведено компьютерное моделирование разработанного процесса Мульти-РКУП-К в программном комплексе Deform-3D.
2. 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.

3. 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.

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

- в очагах деформации преобладает схема сдвига;
- накопленная степень деформации достигает  $\epsilon = 3,5 \dots 4$  единиц, что прогнозирует получение образцов с высокими механическими свойствами;
- максимальные контактные напряжения локализованы в первом очаге деформации и составляют 750 МПа.

5. 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.

6. 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.

### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП- КОНФОРМ**

В данной главе приведены теоретические расчеты исследуемого процесса Мульти-РКУП-Конформ, в частности, разработана аналитическая формула расчета силовых параметров, с помощью которой построена зависимость величины крутящего момента от таких параметров, как угол пересечения каналов и коэффициент трения. С помощью разработанной аналитической формулы рассчитана зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения. Также в данной главе представлены результаты исследований деформированного состояния заготовки методом делительной сетки.

Результаты исследований представлены в работах [100-101].

#### **3.1. Разработка аналитической формулы расчета силовых параметров нового метода интенсивной пластической деформации Мульти РКУП- Конформ**

На рисунке 3.1 показана система сил, действующих на заготовку и инструмент в процессе Мульти-РКУП-К (рисунок 3.1). Простые сдвиги в этом процессе осуществляются за счет воздействия касательных сил  $T$  вдоль линий сдвигов [47]. На линиях сдвига действует равнодействующая гидростатических давлений  $N$ . Начальная величина осевой силы в первом канале, необходимая для деформирования заготовки, 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  $2\varphi_2 = 2\varphi_3$  ( $45^\circ \leq \varphi_2 = \varphi_3 \leq 60^\circ$ ).  $P_{01}$ ,  $P_{02}$ ,  $P_{0Z}$  – силы противодействия, необходимые для полного заполнения каналов.

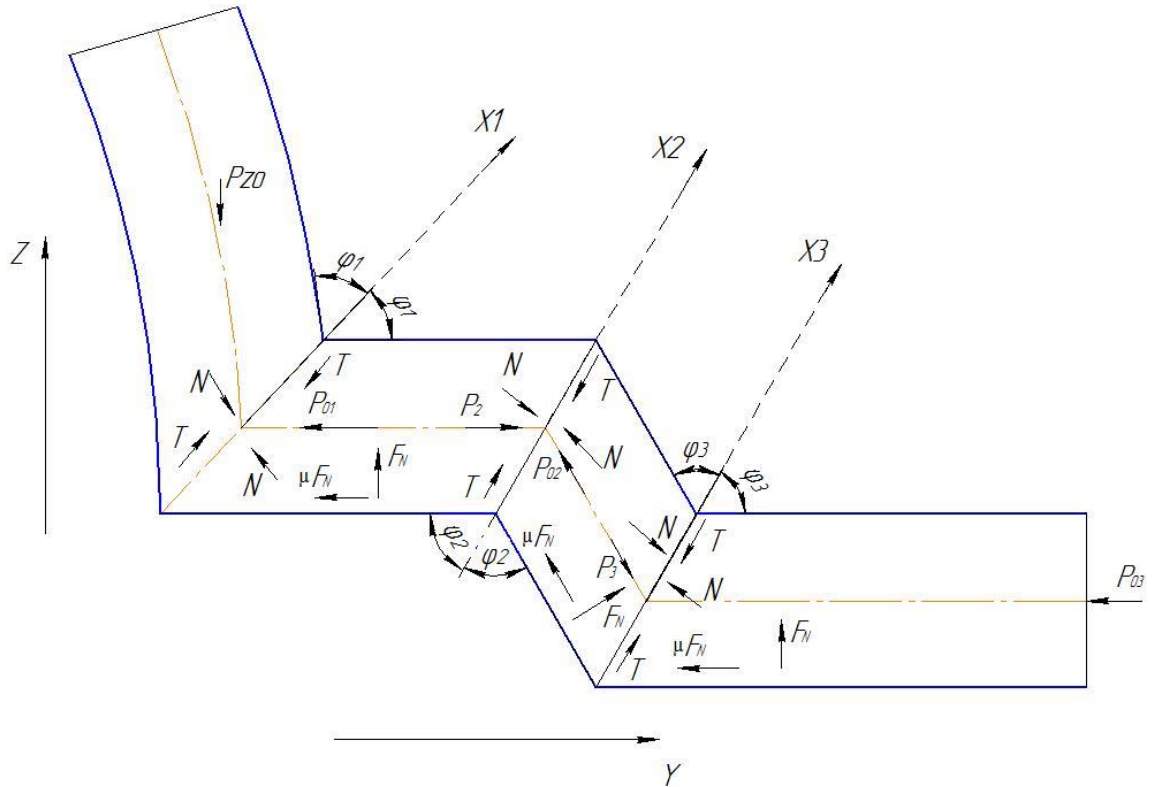


Рисунок 3.1 – Схема действия сил на заготовку

Составлены уравнения равновесия части заготовки для каждого очага деформации (рисунок 3.1).

III очаг: Примем, что  $P_{oi} = 2,57 \cdot k_i$ , где  $k_i = \sigma_s$  - предел текучести материала для каждого очага деформации ( $i = 1...3$ ) соответственно уравнению реологии, согласно методике [40].

Составлены уравнения суммы проекций сил на оси  $Ox$  и  $Oy$  (3.1-3.2):

$$\sum x = 0, T - \cos \varphi_3 \cdot \mu \cdot F_N + F_N \cdot \cos \varphi_3 - P_{o3} \cdot \cos \varphi_3 = 0, \quad (3.1)$$

$$\sum y = 0, -\mu \cdot F_N + T \cdot \cos \varphi_3 + N \cdot \cos(90 - \varphi_3) - P_{o3} = 0. \quad (3.2)$$

После несложных преобразований получено (3.3):

$$F_N = \frac{N \cdot \sin \varphi_3 \cdot \cos \varphi_3 - T \cdot \sin^2 \varphi_3}{\cos \varphi_3}. \quad (3.3)$$

С учетом (3.4):

$$N = \frac{P}{\sin \varphi}, \quad T = \frac{k}{\sin \varphi}, \quad (3.4)$$

Можно записать (3.3) в виде (3.5):

$$F_N = \frac{\frac{P_{III}}{\sin \varphi_3} \cdot \cos \varphi_3 \cdot \sin \varphi_3 - \frac{k_3}{\sin \varphi_3} \cdot \sin^2 \varphi_3}{\cos \varphi_3} = P_{III} - k_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi_3. \quad (3.5)$$

С учетом соотношения (3.5) найдено выражение для величины осевого противодействия со стороны выходного канала:

$$P_{03} = P_{III} \cdot (1 - \mu) + k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 \cdot (1 + \mu). \quad (3.6)$$

При отсутствии трения на нижней стенке выходного канала получено (3.7):

$$P_{03} = P_{III} + k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 \quad (3.7)$$

С другой стороны, при известном противодействии  $P_{03}$ , можно определить гидростатическое давление на линии сдвига  $P_{III}$  по формуле (3.8):

$$P_{III} = \frac{P_{03} - k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 (1 + \mu)}{1 - \mu}. \quad (3.8)$$

Уравнения равновесия на ось  $Oz$  части заготовки, расположенной в рабочем канале III очага, записано как (3.9):

$$\sum z = 0, N \cdot \cos(90 - \varphi_3) + T \cdot \cos \varphi_3 - P_3 \cdot \cos \varphi_3 = 0, \quad (3.9)$$

или с учетом выражения (3.4) получено выражение (3.10):

$$P_3 = \frac{N \cdot \sin \varphi_3 + T \cdot \cos \varphi_3}{\cos \varphi_3} = \frac{P_{III} + k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3}{\cos \varphi_3} = \frac{P_{03} - k_3 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 (1 + \mu)}{(1 - \mu) \cdot \cos \varphi_3} + \frac{k_3}{\sin \varphi_3}. \quad (3.10)$$

Аналогично был рассчитан II очаг: составлены уравнения равновесия на ось  $Ox$  и  $Oy$  (3.11-3.12):

$$\sum x = 0, -T - \cos \varphi_2 \cdot \mu \cdot F_N + F_N \cdot \cos \varphi_2 - P_{02} \cdot \cos \varphi_2 = 0, \quad (3.11)$$

$$\sum y = 0, N \cdot \cos(90 - \varphi_2) + T \cdot \cos \varphi_2 + \mu \cdot F_N \cdot \cos(2\varphi_2 - 90) + F_N \cdot \cos \varphi_2 + P_{02} \cdot \cos(2\varphi_2 - 90) = 0. \quad (3.12)$$

После несложных преобразований с учетом (3.4) получено (3.13):

$$F_N = \frac{N \cdot \sin \varphi_2 + T \cdot (\cos \varphi_2 + 2 \cdot \sin \varphi_2)}{\cos \varphi_2 + \sin 2\varphi_2} = \frac{P_{II} + k_2 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 + 2 \cdot k_2}{\cos \varphi_2 + \sin 2\varphi_2}. \quad (3.13)$$

Следовательно, можно определить гидростатическое давление на

линии сдвига  $P_{II}$  по формуле (3.14):

$$P_{II} = \left( \frac{2k_2}{\sin 2\varphi_2} + P_{02} \right) \cdot \frac{\cos \varphi_2 + \sin 2\varphi_2}{1 - \mu} - k_2(\operatorname{ctg} \varphi_2 + 2) \quad (3.14)$$

С учетом соотношения (3.11) найдено выражение для величины осевого противодействия со стороны выходного канала  $P_2$  по формулам (3.15-3.17):

$$\sum z = 0, P_2 + N \cdot \cos(90 - \varphi_2) + T \cdot \cos \varphi_2 = 0, \quad (3.15)$$

$$P_2 = -N \cdot \sin \varphi_2 - T \cdot \cos \varphi_2 = -P_{II} - k_2 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2, \quad (3.16)$$

$$P_2 = -\left( \frac{2k_2}{\sin 2\varphi_2} + P_{02} \right) \cdot \frac{\cos \varphi_2 + \sin 2\varphi_2}{1 - \mu} + 2k_2 \quad (3.17)$$

Аналогично были рассчитаны уравнения равновесия для I очага (3.18-3.19):

$$\sum x = 0, -T - \cos \varphi_1 \cdot \mu \cdot F_N + F_N \cdot \cos \varphi_1 - P_{01} \cdot \cos \varphi_1 = 0, \quad (3.18)$$

$$\sum y = 0, -T \cdot \cos \varphi_1 - \mu \cdot F_N + N \cdot \cos(90 - \varphi_1) - P_{01} = 0. \quad (3.19)$$

После несложных преобразований и с учетом соотношения (3.4) получено (3.20):

$$F_N = N \cdot \cos \varphi_1 + T \cdot \sin \varphi_1. \quad (3.20)$$

С учетом соотношения (3.15) было найдено выражение для величины осевого противодействия со стороны выходного канала  $P_{01}$  по формуле (3.21):

$$P_{01} = P_I \cdot (1 - \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1) - k_1 \cdot (\mu + \operatorname{ctg} \varphi_1). \quad (3.21)$$

С другой стороны, с учетом противодействия  $P_{01}$ , можно определить гидростатическое давление на линии сдвига на II очаге (3.22):

$$P_I = \frac{P_{01} + k_1(\mu + \operatorname{ctg} \varphi_1)}{1 - \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1} \quad (3.22)$$

Уравнения равновесия на ось  $Oz$  части заготовки, расположенной в рабочем канале, запишем следующим образом (3.22):

$$\sum z = 0, -P_{z0} + N \cdot \cos(90 - \varphi_1) + T \cdot \cos \varphi_1 = 0. \quad (3.22)$$

С учетом соотношения (3.4) выражение для  $P_{z0}$  записано следующим образом (3.23):

$$P_{z0} = \frac{P_{01} + k_1(\mu + \operatorname{ctg} \varphi_1)}{1 - \mu \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1} + k_1 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_1. \quad (3.23)$$



Уравнения (3.10), (3.17) и (3.23) определяют основные силовые параметры сдвиговых процессов при Мульти-РКУП-К. Зная предел текучести материала, коэффициент трения и угол пересечения каналов, можно рассчитать удельную силу, необходимую для осуществления деформации. Таким образом, выявлены аналитические зависимости удельной силы, необходимой для деформирования заготовки, от геометрических параметров канала и трибологических условий (коэффициента трения). Данная зависимость может быть использована при деформации металлических материалов.

При помощи разработанной методики расчета силовых параметров были вычислены зависимости величины крутящего момента от углов пересечения  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  (рисунок 3.2, 3.4) и от коэффициента трения (рисунок 3.3). 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 составляет от 0 до 0,5.

Как видно из рисунка 3.2, при увеличении углов пересечения каналов во втором и третьем очагах деформации величина силы деформирования уменьшается, при этом до достижения угла  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$  сила интенсивно падала, а после  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$  стабилизировалась. Поэтому были исследованы углы в диапазоне  $90^\circ < 2\varphi_i < 120^\circ$ .

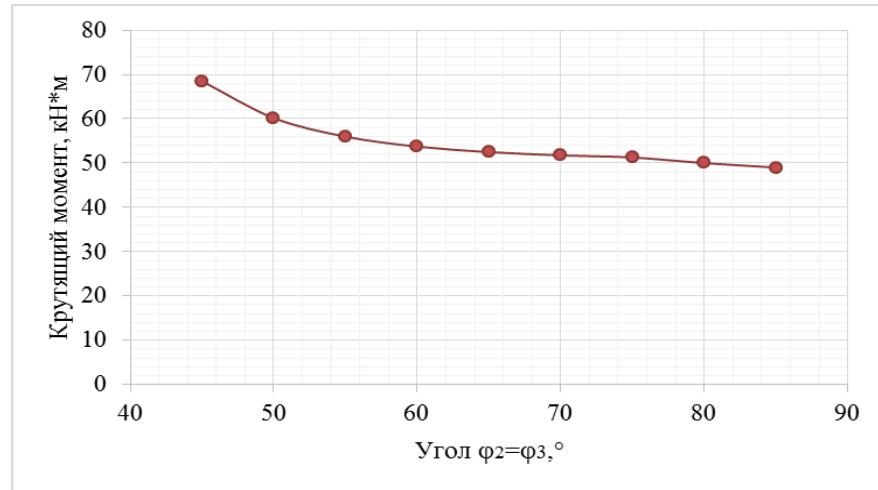


Рисунок 3.2 – Зависимость величины крутящего момента от величины углов

$$\varphi_2 = \varphi_3 \text{ при } \varphi_1 = 45^\circ$$

Как известно из работ [102-103], с увеличением коэффициента трения возрастает нагрузка на инструмент, что подтверждается данными, представленными на рисунке 3.3.

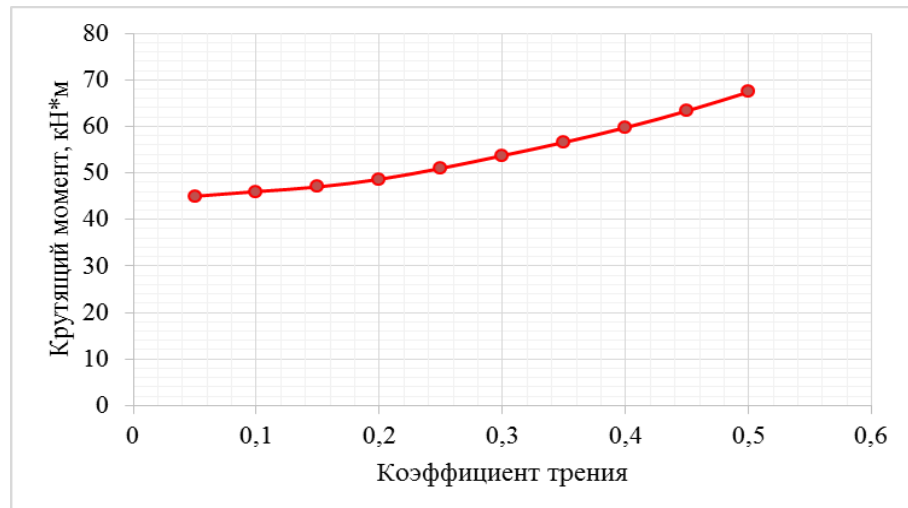


Рисунок 3.3 – Зависимость величины крутящего момента от величины коэффициента трения при  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$

Из рисунка 3.4 видно, что для случая, когда  $2\varphi_2 = 2\varphi_3 = 120^\circ$ , увеличение угла пересечения  $2\varphi_1$  с  $90$  до  $170^\circ$  приводит к снижению величины силы деформирования на 12 %. С учетом того, что крутящий момент незначительно

снижается с увеличением угла  $2\varphi_1$ , а интенсивность воздействия очень существенна [28], наиболее целесообразно использовать угол  $2\varphi_1$ , равный  $90^\circ$ .

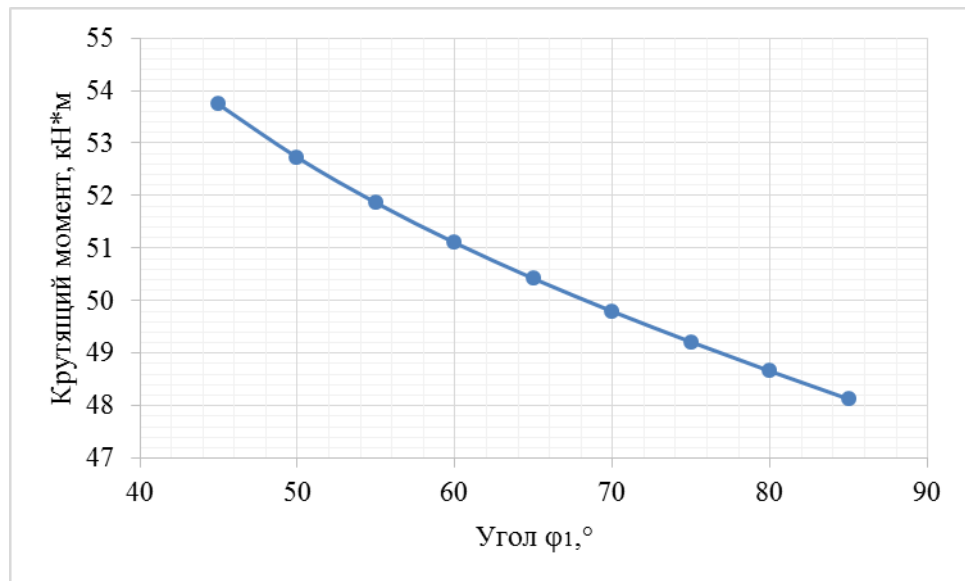


Рисунок 3.4 – Зависимость величины крутящего момента от угла  $\varphi_1$  при  $\varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$

### 3.2 Расчет длины дуги и угла захвата при деформации

Одним из важных факторов при разработке новых методов, основанных на процессе Конформ, является угол захвата. В работе [104] приводятся расчетные формулы углов захвата для таких процессов как РКУП, РКУП-ПК и РКУП-Конформ. Также известно [47], что рекомендованная дуга захвата заготовок круглого сечения составляет  $1/3$  диаметра рабочего колеса. Но при проектировании процесса Мульти-РКУП-К эти методики не могут быть применены ввиду сложной конфигурации канала прессования.

На рисунке 3.5 показана схема деформации Мульти-РКУП-К в начале процесса. В пункте 3.1 была рассчитана зависимость крутящего момента от коэффициента трения, и, соответственно, с использованием физических формул, можно рассчитать зависимость необходимой силы деформирования от

коэффициента трения. Также известно, что при Конформ-процессе присутствуют как активные силы трения, так и реактивные, поэтому при расчете длины дуги захвата будут учтены только две боковые поверхности заготовки, на которых формируются активные силы трения. Для этого случая силу деформирования можно рассчитать по формуле (3.24):

$$P_{ДЕФОРМ} = S \cdot \tau_{СД} \cdot \mu, \quad (3.24)$$

где  $P_{ДЕФОРМ}$  – сила деформирования, рассчитанная с помощью модели силовых параметров (п.3.1);

$S$  – площадь контакта заготовки с оснасткой в начале деформации до прохождения первого сдвига;

$\tau_{СД}$  – напряжение сдвига алюминиевого сплава, получено с помощью компьютерного моделирования;

$\mu$  – коэффициент трения.

Площадь одной поверхности контакта заготовки с оснасткой в начале деформации будет рассчитана по формуле (3.25) площади прямоугольной трапеции:

$$S = \frac{1}{2} \cdot a \cdot l, \quad (3.25)$$

где  $a$  – ширина канала оснастки;

$l$  – длина дуги захвата.

При расчетах было принято, что заготовка контактирует с рабочим колесом по двум боковым поверхностям, так как третья сила от активного трения –  $\tau_A$  – компенсируется возникающей на башмаке противоположной силой от реактивного трения –  $\tau_{II}$  (рисунок 3.5).

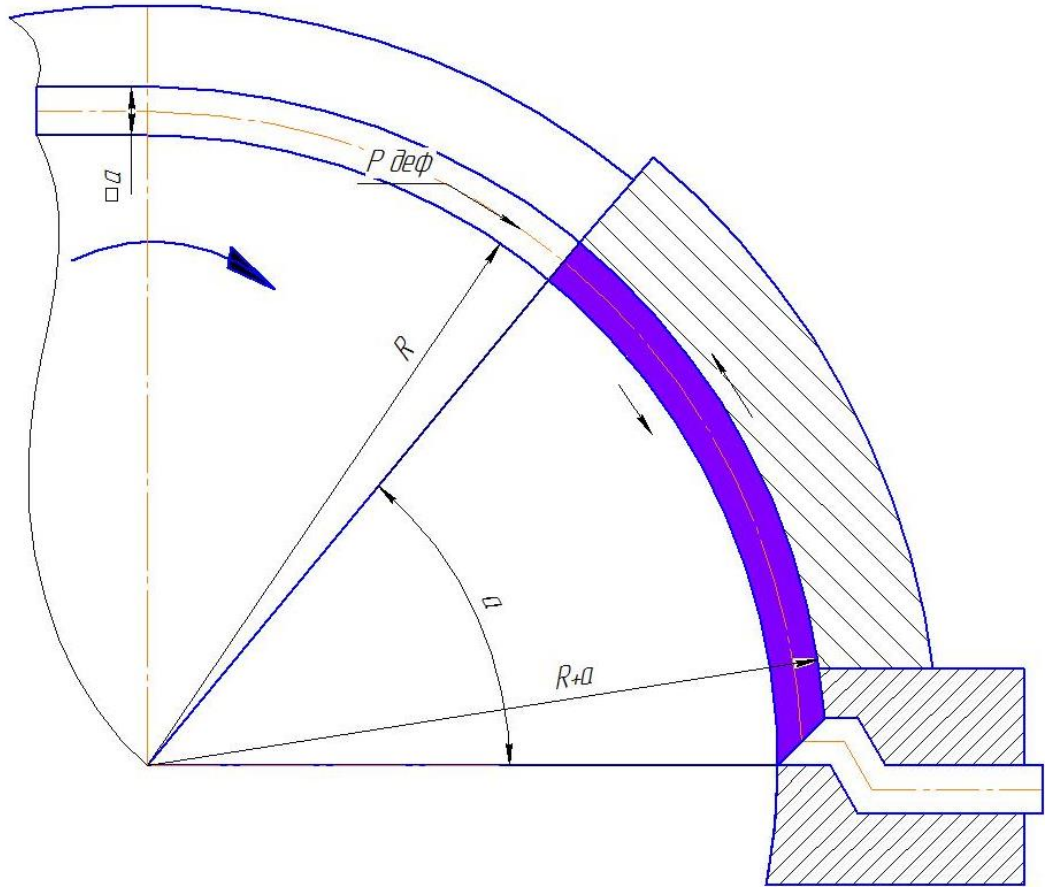


Рисунок 3.5 – Схема расчета угла захвата при Мульти-РКУП-К

Таким образом, была рассчитана длина дуги захвата при Мульти-РКУП-К по формуле (3.26):

$$l = \frac{2 \cdot R_{\text{ДЕФОРМ}}}{\tau_{\text{сд}} \cdot \mu \cdot a} \quad (3.26)$$

Была построена зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения, которые показаны на рисунке 3.6. Угол захвата был рассчитан с помощью традиционных формул, применяемых при прокатке [31].

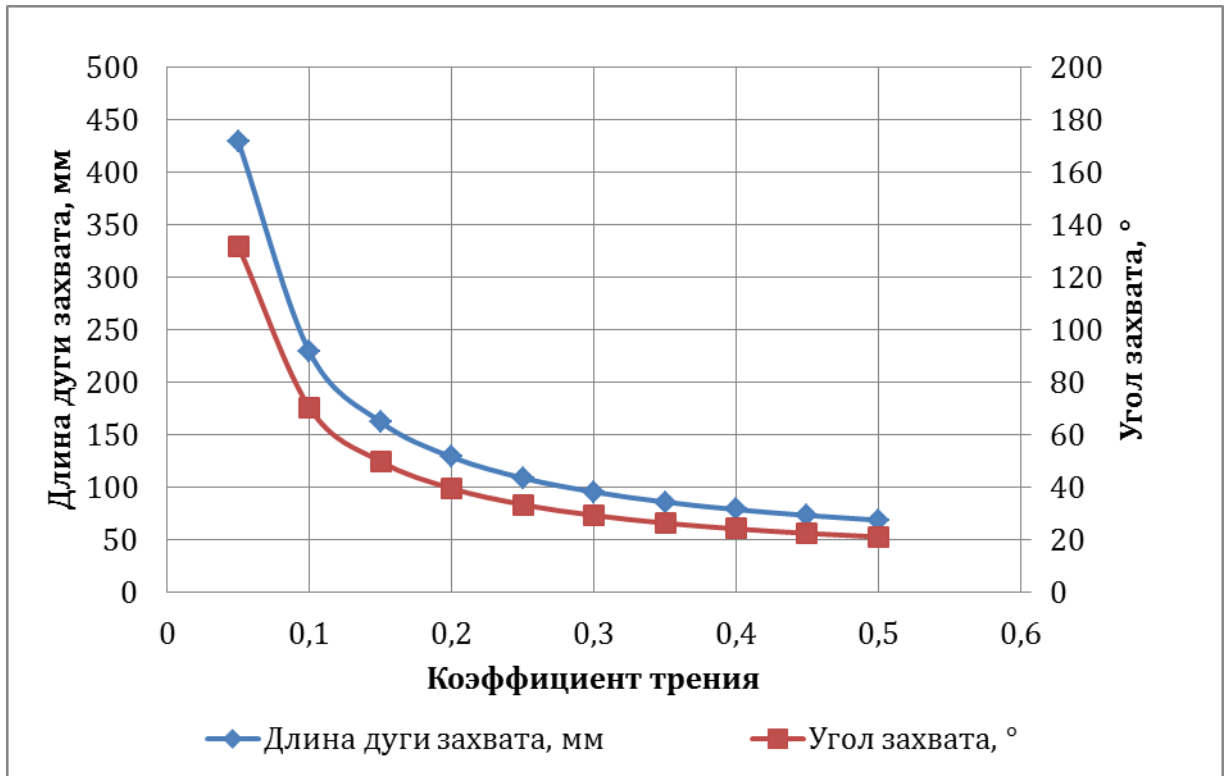


Рисунок 3.6 – Зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения

Как видно из рисунка 3.6, с увеличением коэффициента трения уменьшается длина дуги и, соответственно, угол захвата. Известно [105], что при холодной обработке металлов коэффициент трения может составлять величины близкие к 0,1 и даже ниже, поэтому дуга захвата может возрасти до значений близких к 100-150 мм. Полученные результаты доказывают достоверность этих данных.

Таким образом, с помощью расчетной модели силовых параметров установлена зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения, что является важным фактором для проектирования технологических процессов и выбора оборудования для практической реализации процесса Мульти-РКУП-К.

Выбор дуги и угла захвата также можно провести с использованием методики представленной в работе [106], где представлен анализ энергосиловых условий непрерывного прессования методом Конформ. На рисунке 3.7 показана

расчетная схема для процесса Мульти-РКУП-К, согласно методике, описанной в работе [106].

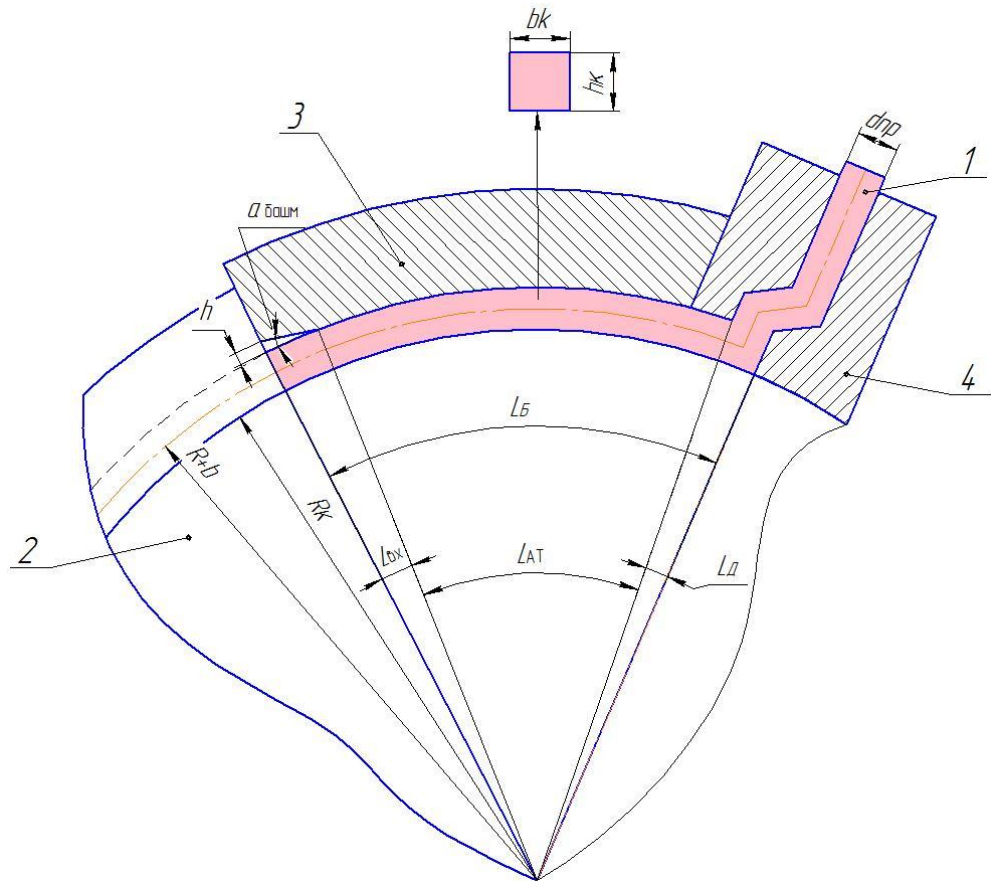


Рисунок 3.7 – Расчетная схема для Мульти-РКУП-К:

1- полуфабрикат; 2 – рабочее колесо; 3 – башмак; 4 - матрица

Длина протяженности башмака  $L_{\text{Б}}$  была рассчитана по формуле (3.27):

$$L_{\text{Б}} = L_{\text{BX}} + L_{\text{AT}} + L_{\text{Д}} = (\varphi_{\text{BX}} + \varphi_{\text{AT}} + \varphi_{\text{Д}}) \left( R_{\text{К}} + \frac{b_{\text{К}}}{2} \right), \quad (3.27)$$

где  $\varphi_{\text{BX}}$ ,  $\varphi_{\text{AT}}$ ,  $\varphi_{\text{Д}}$  – центральные углы для соответствующих областей;  $R_{\text{К}}$  – радиус удаления канавки от оси вращения рабочего колеса;  $h_{\text{к}}$ ,  $b_{\text{к}}$  – высота и ширина канавки.

$L_{\text{BX}}$  – входная область протяженностью от входа в башмак и до конца участка наклонной поверхности башмака под углом  $\alpha_{\text{Б}}$ , размер которой вычисляется по формуле (3.28):

$$L_{\text{BX}} = \frac{h}{\text{tg} \alpha_{\text{Б}}}, \quad (3.28)$$

где  $h$  – высота входной поверхности башмака, мм;

$\alpha_B$  – угол наклона входной поверхности башмака.

$L_{AT}$  - область основного активного трения протяженностью от конца участка наклонной поверхности башмака до поперечного сечения входа в очаг деформации. Центральный угол для зоны активного трения был найден по формуле (3.29):

$$\varphi_{AT} = \frac{\sigma_{ПП}}{2\mu_A \sigma_S} - \left[ 1 - \frac{b_K (1 - \cos \alpha_B)}{2h_K \cos \alpha_B} \right] \varphi_{BX}, \quad (3.29)$$

где  $\sigma_{ПП} = \sigma_S (0,8 + 1,45 \ln \lambda_{ПП})$ ,  $\bar{\sigma}_S = \sqrt{\sigma_{SO} \cdot \sigma_{SK}}$  - среднее сопротивление деформации во входной области;  $\sigma_{SO} \sim \sigma_{SO}$  – условный предел текучести металла на входе в башмак;  $\lambda_{ПП}$  – коэффициент вытяжки при прессовании.

$L_D$  - очаг деформации (ОД) протяженностью от поперечного сечения, где напряжение течения материала достигло величины достаточной для осуществления прессования и до поперечного сечения выхода профиля из рабочего канала матрицы. Протяженность очага пластической деформации при прессовании была рассчитана по формуле (3.30):

$$L_D = d_{ПП} + l_M, \quad (3.30)$$

где  $l_M = 0,382 b_K \operatorname{tg} \alpha_{ПП}$ ,  $\alpha_{ПП} = 45^\circ$  – половина угла прессования.

При расчетах были приняты следующие значения параметров:

- радиус удаления кольцевой канавки от оси вращения рабочего колеса  $R_K = 200$  мм;
- высота и ширина кольцевой канавки были равны  $h_K = b_K = 11$  мм;
- коэффициент вытяжки  $\lambda_{ПП} = 10,8$ .

Таким образом, в результате проведенных расчетов по указанным формулам, была получена зависимость длины протяженности башмака от коэффициента трения (рисунок 3.8).



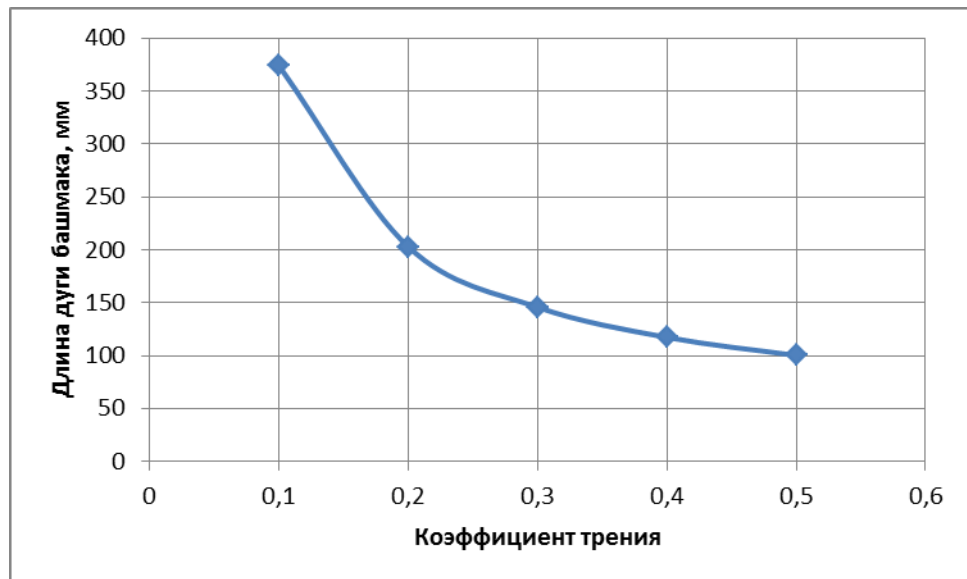


Рисунок 3.8 – Зависимость длины дуги башмака от коэффициента трения

Как видно из рисунка 3.8, при обеспечении коэффициента трения 0,1 между алюминиевой заготовкой и оснасткой из стали, т.е. при применении смазочного материала, необходимо обеспечить длину захвата заготовки – 370 мм, а при коэффициенте трения 0,5 длина дуги составляет 100 мм. Эти данные коррелируют с полученными графиками, рассчитанными в пункте 3.2.

### 3.3 Анализ деформированного состояния методом сеток

Деформированное состояние металлов во многом отвечает за структурное состояние и уровень механических свойств деформируемых металлов. Поэтому исследование деформации в процессах ОМД является важным и значимым фактором для адекватной оценки процессов. Экспериментальное изучение распределения деформаций в теории ОМД было проведено с помощью метода координатных (делительных) сеток, который широко используется при оценке процессов обработки металлов давлением [107].

Исследование было выполнено на составном образце длиной 150 мм, с размерами поперечного сечения 11 x 11 мм. Материал образца – алюминиевый

сплав Al6101. На одну из симметричных половинок внутреннего продольного (вертикального) сечения образца была нанесена сетка с размером ячейки 2 x 2 мм (рисунок 3.9) Способ нанесения – механический, с использованием точного станочного оборудования; точность нанесения –  $\pm 0,02$  мм; глубина и ширина рисок – 0,25 мм. После деформации были замерены координаты сетки на инструментальном микроскопе; погрешность измерений составила  $\pm 0,01$  мм.

Образцы были исследованы после одного прохода Мульти-РКУП-К. Сравнение двух любых соседних ячеек показывает деформацию ячейки за некоторый интервал времени. При этом предполагается, что в пределах ячейки она однородна и равна среднему значению по объему, ограниченному ячейкой.

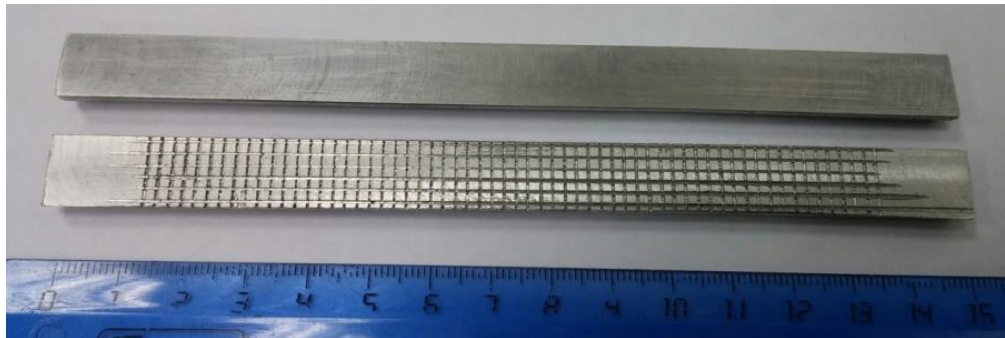


Рисунок 3.9 – Параметры ячейки исходного образца

Общий вид образца после деформации методом Мульти-РКУП-К, характер искажения координатной сетки в диаметральной продольном сечении образца после трех актов сдвига и изменение сетки во время деформации Мульти-РКУП-К показаны на рисунке 3.8. Ячейки, выбранные для расчета, выделены синим цветом. Видно, что ячейки металла меняют конфигурацию три раза в соответствии с тремя очагами деформации. Квадратная ячейка после прохождения первого очага становится параллелограммом, после прохождения второго очага идет возврат близкий к исходным геометрическим параметрам, после третьего – снова параллелограмм, что характерно для схемы РКУП [108]. На рисунке 3.10 наблюдается некоторая неоднородность деформированного состояния между центральными и периферийными частями заготовки.

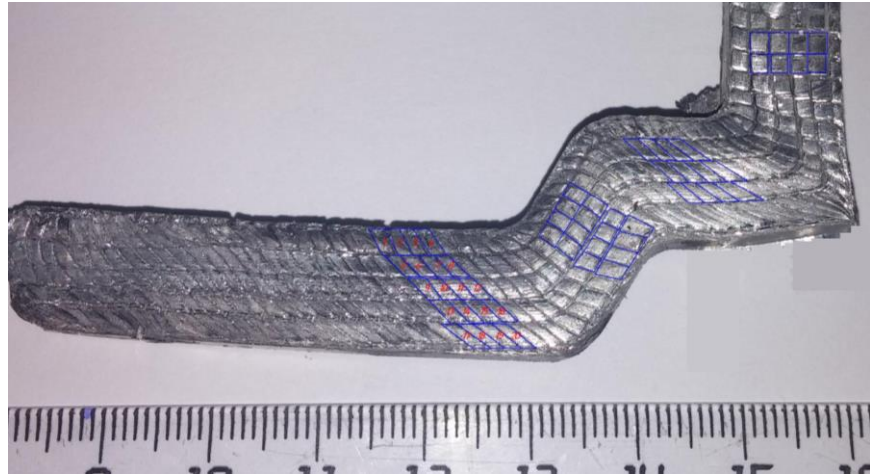


Рисунок 3.10 - Параметры ячеек после деформации методом Мульти-РКУП-К

По результатам проведенных вычислений параметров ячейки построена диаграмма (рисунок 3.9), на которой 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, и, следовательно, повышенных механических свойств.

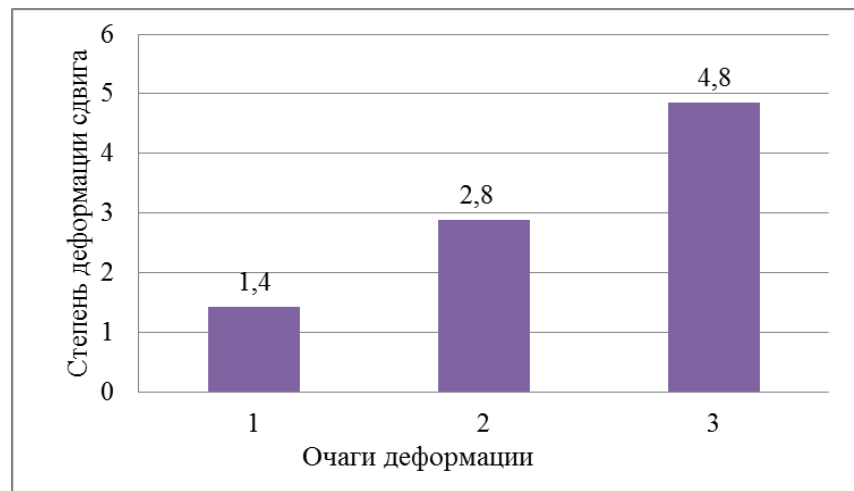


Рисунок 3.11 – Диаграмма величины накопленной степени деформации сдвига при прохождении трех очагов деформации

На рисунке 3.13 показано распределение степени деформации в выделенных ячейках (рисунок 3.12) в поперечном сечении образца после прохождения трех очагов деформации. Как видно по рисунку 3.13, расчетная степень деформации варьируется от 4 до 7, в нижних слоях заготовки она выше.

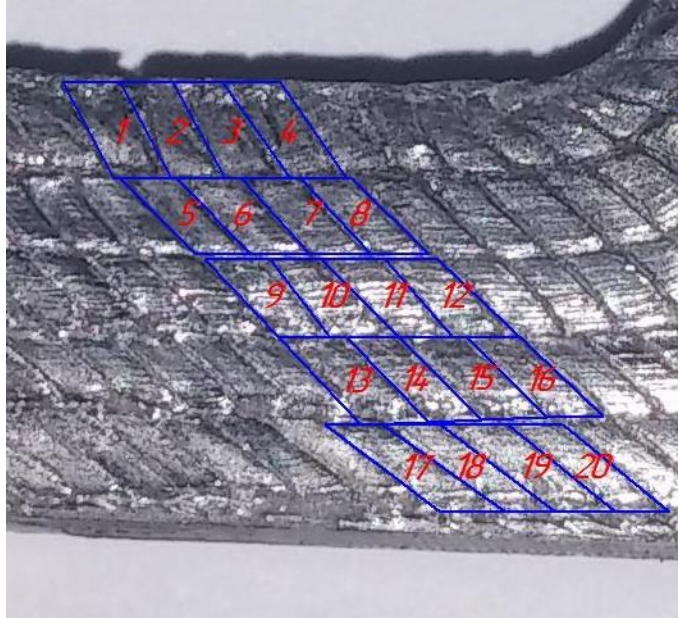


Рисунок 3.12 – Ячейки для расчета однородности деформированного состояния после Мульти-РКУП-К

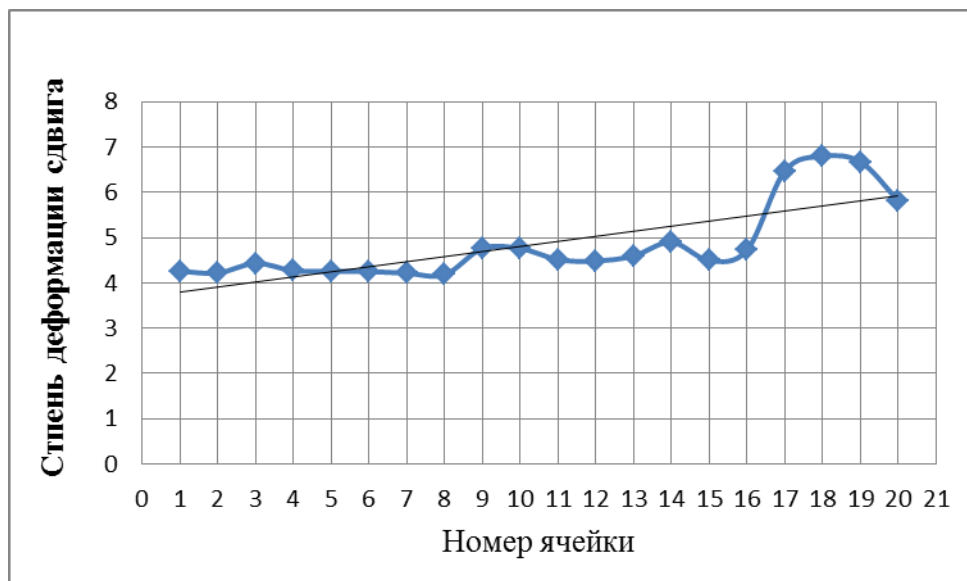


Рисунок 3.13 – Распределение степени деформации в продольном сечении образца по ячейкам

Таким образом, с помощью метода делительных сеток выявлен характер накопления и достигнутый уровень деформации сдвига в процессе экспериментальной обработки, при этом средняя величина деформации сдвига центральной области заготовки составляет 4.8 единиц. Как правило, такой уровень накопленной деформации в алюминиевых сплавах приводит к формированию структуры зеренного типа с размером зерен менее 1 микрона. Также показан характер распределения степени деформации по всему поперечному сечению образца после прохождения трех очагов деформации.

### **Выводы по главе**

1. Разработана аналитическая формула 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.

2. Рассчитана зависимость длины дуги и угла захвата от коэффициента трения и показано, что с увеличением коэффициента трения длина дуги и угол дуги захвата уменьшаются. Так при увеличении величины коэффициента трения с 0,1 до 0,5 длина дуги захвата уменьшается с 430 до 50 мм по методике [47] и с 370 до 100 мм по методике [106].

3. 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.

## 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП-КОНФОРМ

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

Результаты исследований приведены в работах [70, 109, 110].

### 4.1.Методика проведения экспериментов

#### 4.1.1 Материалы исследования

В качестве материалов исследования были использованы образцы с поперечным сечением 11x11 мм из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si марки Al 6101. Выбор данного материала обусловлен тем, что он используется в электротехнике для производства токопроводящих жил и кабелей. Химический состав исследуемых образцов представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Химический состав катанки из сплава 6101 (масс. %)

Про ба	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Mn	Ni	B	V	Al
1	0.654	0.226	0.134	0.477	0.017	0.018	0.002	< 0.01	< 0.003	< 0.003	98.39
2	0.645	0.213	0.058	0.496	0.017	0.019	0.002	< 0.01	< 0.003	< 0.003	98.47
3	0.652	0,207	0.038	0.504	0.017	0.020	0.002	< 0.01	< 0.003	< 0.003	98.47
сре дне е	0.650	0.215	0.077	0.0492	0.017	0.019	0.002	< 0.01	< 0.003	< 0.003	98.44

Сопоставление химического состава показывает, что экспериментальные образцы катанки имеют химический состав, характерный для сплава АД31Е в соответствии с ГОСТ 4784–97 [111].

#### **4.1.2 Метод получения экспериментальных образцов катанки обработкой Мульти-РКУП-Конформ**

Схема реализации процесса и принцип работы Мульти-РКУП-К описаны в главе 2. В отличие от традиционных методов ИПД, метод Мульти-РКУП-К позволяет накапливать истинную деформацию  $e \geq 3$  при трехкратном изменении направления течения материала заготовки за один цикл обработки. Такие условия обеспечиваются за счет создания ступенчатой формы канала прессования. В рассматриваемой установке углы пересечения каналов составляли 90, 120 и 120°.

Экспериментальные образцы катанки сплава длиной до 800 мм (на лабораторной установке) и до 2700 мм (на опытно-промышленной установке) были подвергнуты одному циклу обработки Мульти-РКУП-К при температуре 150 и 170 °С на лабораторной установке, при 20 °С на опытно-промышленной установке.

#### **4.1.3 Методика регистрации и записи технологических параметров**

Контроль температуры, момента и скорости вращения были произведены по схеме (рисунок 4.1). Для контроля температуры прутка были использованы пирометры ПР1 и ПР2, для контроля температуры прижимного башмака и колеса скользящие термопары ТП1 и ТП2. Аналоговые данные преобразовывались устройствами удаленного ввода данных m-7018 и m-7017 и через ETHERNET-шлюз GW-7434D передавались в локальную сеть. Также в локальную сеть

поступали данные, рассчитанные непосредственно контроллером частотного регулятора, в котором для значений момента на валу двигателя и скорости вращения были выделены специальные MODBUS-регистры. Данные момента и скорости вращения регистрировались в процентах от номинальных значений для двигателя и соответствующим образом были пересчитаны через параметры редуктора.

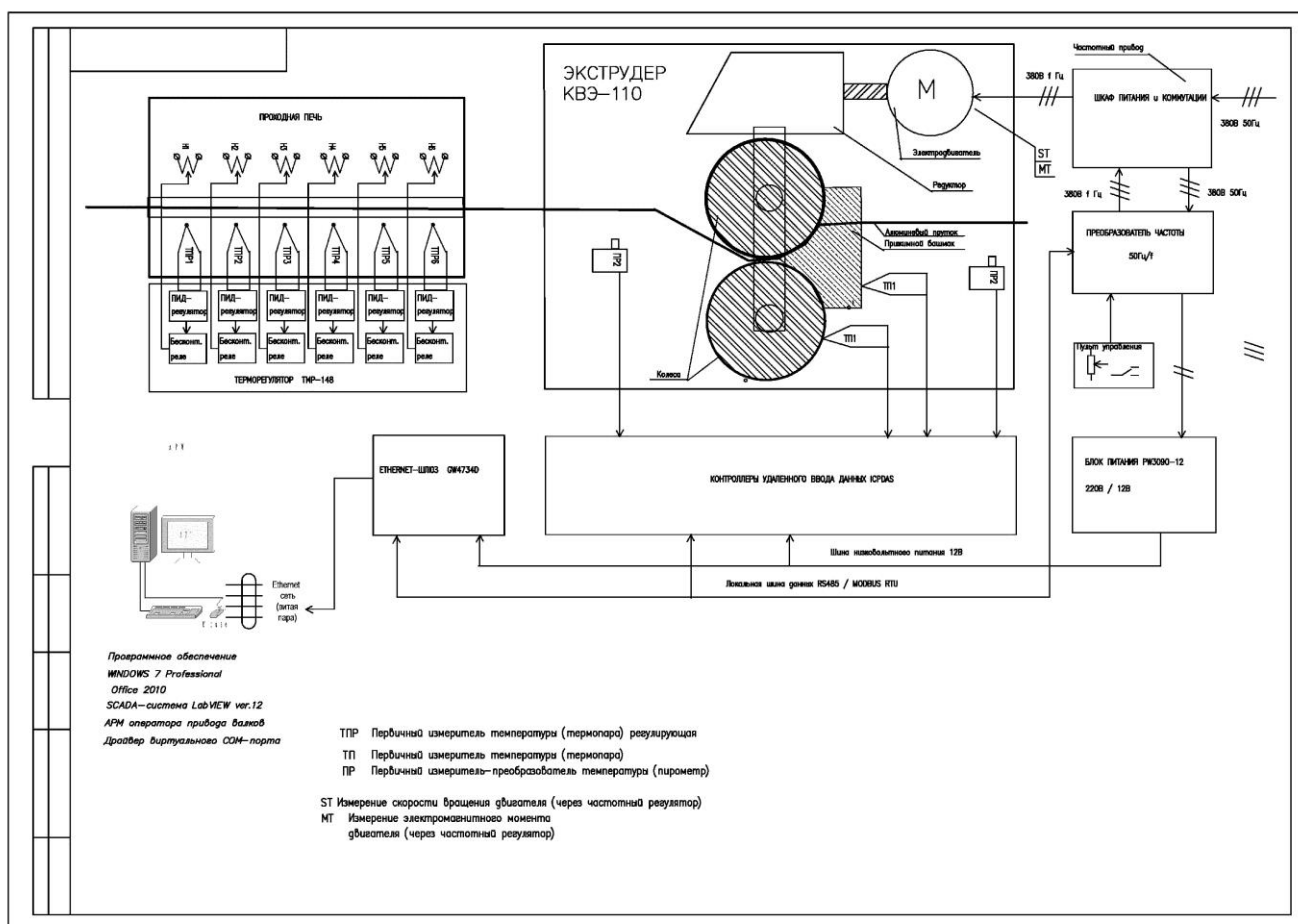


Рисунок 4.1 – Схема контроля температуры, момента и скорости вращения колеса

Передача данных в компьютер производится по сети ETHERNET через шлюз Modbus TCP/DeviseNet Master GW-7434. Это устройство может работать как виртуальный COM-порт (VxComm), что позволяет комбинировать устройства Modbus RTU с сетью Modbus TCP. Программное обеспечение персонального компьютера состоит из операционной системы Windows 7 Professional, MS Office



10, SCADA – системы LabVIEW ver. 11, драйверов устройств ввода-вывода информации.

MS Office используется для протоколирования результатов, табличного представления данных и их дальнейшей обработки. На SCADA-системе LabVIEW написан собственно виртуальный инструмент (в терминах LabVIEW) EXT\_IFPM, визуализирующий представление данных и элементов управления (рисунок 4.1). Представление данных осуществляется как в числовом формате, так и с помощью графиков (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Интерфейс регистрации параметров процесса

Таким образом, при практической реализации метода Мульти-РКУП-К были зафиксированы крутящий момент на рабочем колесе, температура в оснастке и скорость вращения колеса.

#### 4.1.4 Методы исследования структуры алюминиевых образцов

Анализ микроструктуры алюминиевых образцов был проведен методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ и ПЭМ).

Перед проведением исследований методом РЭМ исследуемая поверхность образцов, вырезанных из катанки, была подвергнута механической шлифовке и полировке на шлифовально-полировальном станке LaboPol-25 фирмы Struers. Шлифовку поверхности образцов была проведена на водостойкой шкурке, а полировка – на алмазной суспензии DiaDuo с дисперсностью абразива до 1 мкм. Финишная полировка поверхности образцов была проведена на суспензии OP-Suspension фирмы Struers.

Электронно-микроскопическое исследование образцов было выполнено на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6490 LV (вольфрамовый катод). Микроанализ был проведен на приставке к электронному микроскопу для микроанализа фирмы Oxford Instruments с контролем тока пучка электронов до и после снятия спектра. Области возбуждения микроанализа для образцов с матрицей из тяжелых элементов составили около 3 мкм, с матрицей легких элементов - около 5 мкм. Количественный расчет спектров был выполнен автоматически с использованием программы INCA фирмы Oxford Instruments. Погрешность в количественном расчете получаемых данных составляла 5 %.

Электронно-микроскопические исследования были проведены на просвечивающем микроскопе JEM-2100 EX фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 200 кВ, оснащенный приставкой INCA x-sight для проведения микроанализа элементов тонкой структуры.

Объекты для исследований тонкой структуры были изготовлены методом струйной полировки тонких фольг на установке «Tenipol-5» в растворе 20 % азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) и 80 % метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) при температуре – 25...35°C и напряжении 15...20 В.

Средний размер структурных элементов (размер субзерен, дисперсных частиц второй фазы) был получен по результатам не менее 200 измерений, осуществленных с помощью компьютерной программы для структурного анализа «Grain-Size». Для получения статистически надежных результатов анализа микроструктуры было изучено не менее 3 фольг на каждое состояние.

#### 4.1.5 Режимы термической обработки экспериментальных образцов

Перед Мульти-РКУП-К образцы из сплава Al 6101 были подвергнуты термической обработке (ТО) – отжигу при температуре 550 °С в течение 2 часов с последующим охлаждением в воде комнатной температуры.

ТО образцов проводили в электрической атмосферной печи фирмы Nabetherm объемом 321 л с контролируемой скоростью нагрева. Контроль температуры осуществлялся в трех зонах электропечи с помощью хромель-алюмелевых (ХА) термопар с погрешностью измерения  $\pm 5$  °С и универсального вольтметра В7-38 с классом точности показания вольтметра до 0.001 В.

#### 4.1.6 Методы определения механических характеристик экспериментальных образцов

Механические характеристики образцов катанки из сплава Al6101 были определены в ходе проведения статических испытаний на растяжение цилиндрических образцов (рисунок 4.3) типа III с диаметром рабочей части  $d = 3$  мм и длиной рабочей части  $l_0 = 18$  мм в соответствии с ГОСТ 1497-84 [78].

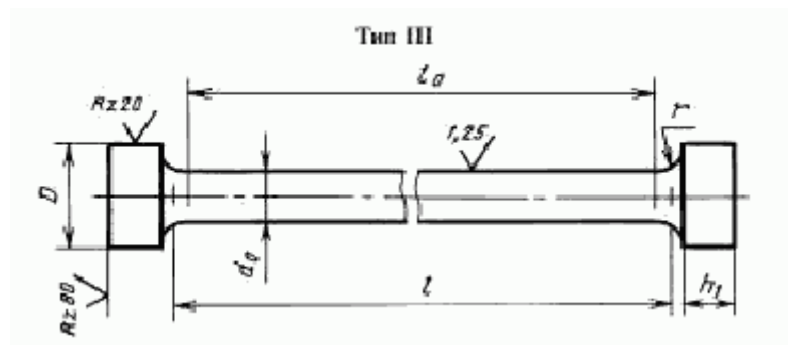


Рисунок 4.3 - Чертеж образца типа III [78]

Для получения статистически надежных результатов было испытано не менее 3 образцов для каждого исследуемого состояния.

Механические испытания образцов были проведены на электромеханической измерительной системе для проведения статических испытаний Instron 5982.

По результатам испытаний были определены значения условного предела текучести ( $\sigma_{0.2}$ ), временного сопротивления разрыву ( $\sigma_B$ ) и относительного удлинения образца после разрыва ( $\delta$ ).

#### **4.1.7 Методы определения физических свойств экспериментальных образцов**

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) образцов катанки из алюминиевых сплавов Al6101 было определено согласно ГОСТ 7229-76 [112] с помощью психрометра аспирационного МВ-4М (погрешность  $\pm 2$  %), барометра-анероида БАММ-1 (цена деления  $0,1 \times 10^3$  Па) и микрометра БСЗ (класс точности 0,1).

Измерения проводились на выпрямленных образцах катанки длиной 1 м в измеряемой части. Определение размеров образцов проводилось измерительной металлической линейкой с ценой деления 1 мм и микрометром МК-25 с ценой деления 0,01 мм. Погрешность измерений длины образцов составила не более 0,2 %.

Электрическое сопротивление измерялись двойным мостом постоянного напряжения с инструментальной с погрешностью 0,1 %.

Температура окружающей среды контролировалась для учета температурного множителя ( $K$ ). Атмосферное давление не превышало 100,1 кПа, а относительная влажность – 55 %.

Значения удельного сопротивления переводили в электропроводимость (%), соответствующую стандарту IACS (International Annealed Copper Standard).

## **4.2 Получение образцов обработкой Мульти-РКУП-Конформ на лабораторном оборудовании**

### **4.2.1 Исследование влияния технологических параметров на прочностные характеристики алюминиевых полуфабрикатов**

Первым этапом практической реализации являлась апробация нового метода на лабораторной установке. Так как прототипом метода Мульти-РКУП-К служит процесс РКУП-К, исследования проводились на установке, адаптированной для проведения экспериментов по схеме Мульти-РКУП-К (рисунок 4.4). Было проведено исследование влияния температуры обработки, смазочного покрытия и качества поверхности на прочностные характеристики заготовок, полученных методом Мульти-РКУП-К.



Рисунок 4.4 – Лабораторное оборудование для Мульти-РКУП-К

В экспериментах было использовано два вида заготовок. Известно, что наличие на поверхности заготовки шероховатости способствует лучшему

проникновению смазочного покрытия и, следовательно, более эффективной работе смазочного слоя между заготовкой и оснасткой при деформации. Поэтому рассматривались два вида подготовки исходных заготовок – с накаткой (рисунок 4.6) и без накатки (рисунок 4.5).

В работе авторов [9] была выполнена обработка методом РКУП-К при температурах обработки 100, 150 и 200 °С и выявлено, что высокое значение временного сопротивления разрыву формируется при температуре 150 °С, а высокая электропроводимость – при 200 °С. Также известно, что температура рекристаллизации алюминиевого сплава Al 6101 составляет примерно 260 °С, поэтому обработка при температуре 200 °С нежелательна. Таким образом, были выбраны температуры 150 и 170 °С для обработки методом Мульти-РКУП-К.

При обработке было использовано два вида смазочных покрытия: быстросохнущая смазка +  $\text{MoS}_2 + \text{BN}$  и краска + смесь из  $\text{MoS}_2 + \text{BN}$ .

Для оценки влияния температуры обработки на свойства полученных алюминиевых полуфабрикатов были проведены механические испытания (таблица 4.2).

Размеры исходных заготовок – 11 x 11 мм, длина – 150 мм (рисунки 4.5-4.6). Скорость вращения рабочего колеса – 2 об/мин.



Рисунок 4.5 – Исходные заготовки Al 6101 без рисок

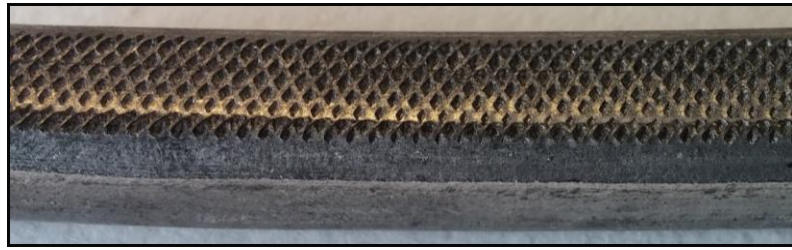
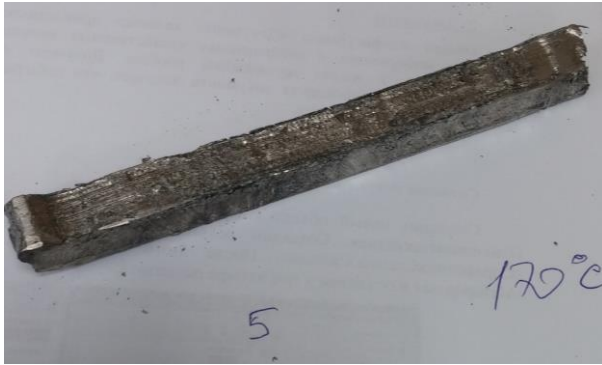


Рисунок 4.6 – Исходная заготовка с накаткой перед деформацией

В результате обработки Мульти-РКУП-К были получены заготовки квадратного сечения со стороной квадрата 11 x 11 мм (рисунки 4.7-4.8).



Рисунок 4.7 – Образцы № 1-4, полученные после обработки Мульти-РКУП-К: верхний ряд - при 150 °С; нижний ряд – при 170 °С



а



б

Рисунок 4.8 – Образцы, полученные обработкой Мульти-РКУП-К:

а – № 9; б – № 6

Качество поверхности после деформации влияет на характер течения металла при последующей обработке, поэтому необходимо оценить, в первую очередь, качество поверхности, а затем механические свойства полуфабрикатов (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Технологические параметры, выбранные для проведения сравнения

№ образца	Температура обработки, °С	Вид смазочного покрытия	Качество поверхности заготовки
1	150	Быстросохнущая смазка + $\text{MoS}_2 + \text{BN}$	без накатки
2			с накаткой
3		Краска + $\text{MoS}_2 + \text{BN}$	без накатки
4			с накаткой
5	170	Быстросохнущая смазка + $\text{MoS}_2 + \text{BN}$	без накатки
6			с накаткой
7		Краска + $\text{MoS}_2 + \text{BN}$	без накатки
8			с накаткой
9		Без смазочного покрытия	без накатки



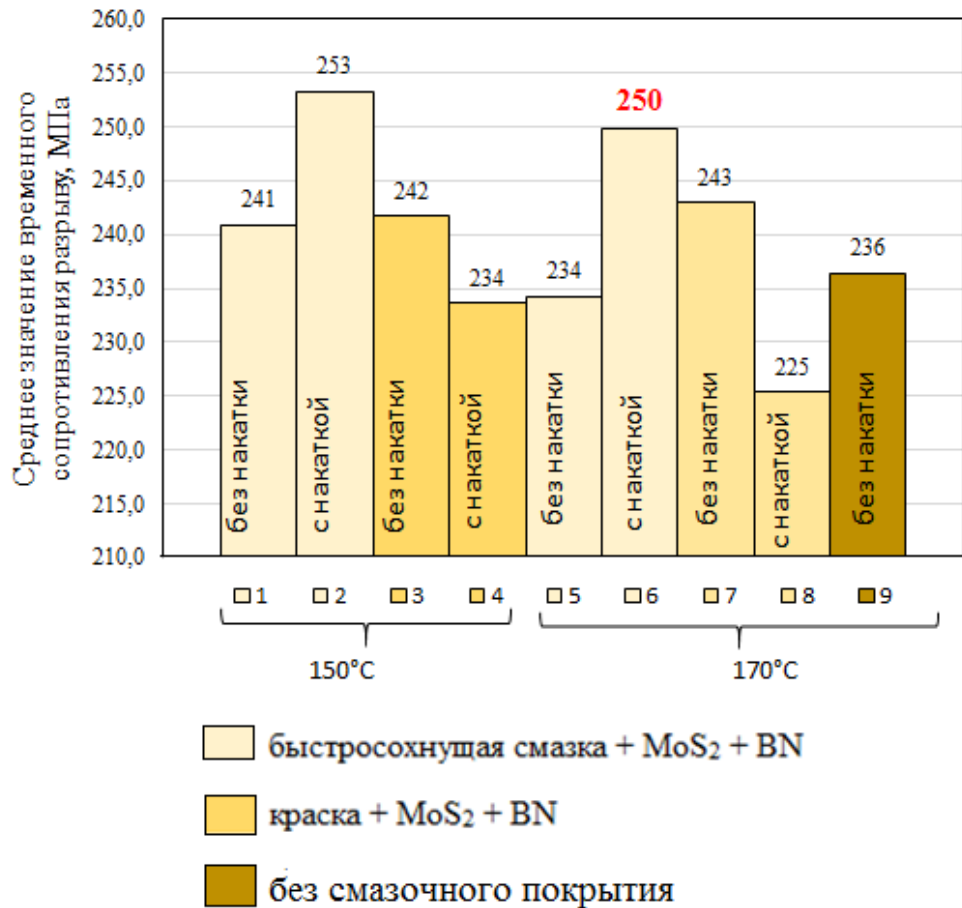


Рисунок 4.9 – Диаграмма средних значений временного сопротивления разрыву в зависимости от технологических параметров

Как видно из рисунка 4.9, при повышении температуры обработки от 150 до 170 °C наблюдается снижение величины временного сопротивления разрыву при использовании любых видов смазочного покрытия. Так при температуре обработки 150 °C на образце № 2 было получено высокое значение временного сопротивления разрыву (253,3 МПа) при применении смазочного покрытия, состоящего из быстросохнущей смазки в сочетании со смесью из MoS<sub>2</sub> и BN. Но на поверхностях образцов (с накаткой и без накатки), полученных при 150 °C, присутствуют дефекты в виде задиров и трещин, в отличие от образцов, полученных при 170 °C (рисунок 4.7). Как выявлено, 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

среднее значение временного сопротивления разрыву образца №9 составляет 236,42 МПа, но, как видно из рисунка 4.8, на поверхности образца присутствует множество дефектов в виде задигов и трещин по причине отсутствия смазочного покрытия на этой поверхности. Также из рисунка 4.9 видно, что в полученных образцах временное сопротивление разрыву выше при использовании смазочного покрытия, состоящего из состава «быстросохнущая смазка + MoS<sub>2</sub> + BN», чем при применении состава «краска + MoS<sub>2</sub>+BN». Для дальнейших исследований был выбран образец № 6, полученный при температуре обработки 170 °С и применении смазочного покрытия, 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 значения временного сопротивления разрыву 250 МПа.

Учитывая то, что исходная прочность составляет  $185,1 \pm 1,2$  МПа, можно отметить, что после обработки методом Мульти-РКУП-К прочность возросла на 36 %.

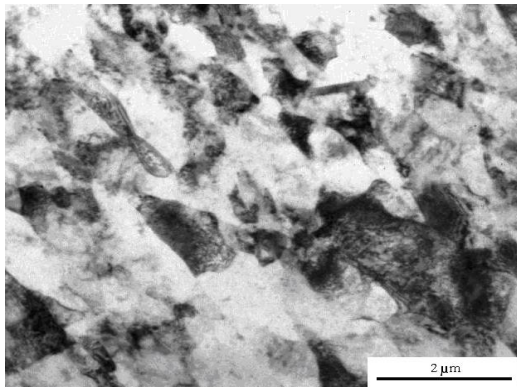
Таким образом, разработаны рациональные технологические параметры для реализации метода Мульти-РКУП-К на лабораторном оборудовании, в частности, определены температура обработки 170 °С, качество поверхности исходных заготовок с накаткой, применение смазочного покрытия, состоящего из быстросохнущей смазки в сочетании со смесью из графита, MoS<sub>2</sub> и BN.

#### **4.2.2 Структура и свойства полученных алюминиевых образцов полуфабрикатов**

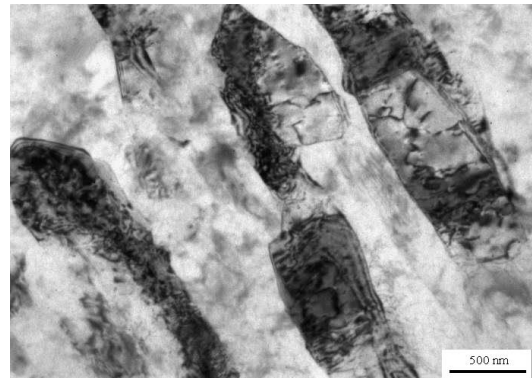
Исследования микроструктуры и свойств проводились на образце № 6. Электронно-микроскопический анализ показал, что в результате одного цикла Мульти-РКУП-К формируется структура смешанного типа, образованная преимущественно вытянутой в направлении сдвиговой деформации субструктурой (рисунок 4.10 а, б). Также отмечено формирование отдельных

участков (объемная доля которых составляет примерно 30 %), содержащих равноосные зерна с размером  $460 \pm 20$  нм (рисунок 4.10 в). Ранее в работах [75, 97-98] было показано, что формирование структуры за 2-4 цикла обработки ИПД в термически-упрочняемых сплавах системы Al-Mg-Si происходит за счет фрагментации исходных зерен и образования субграниц.

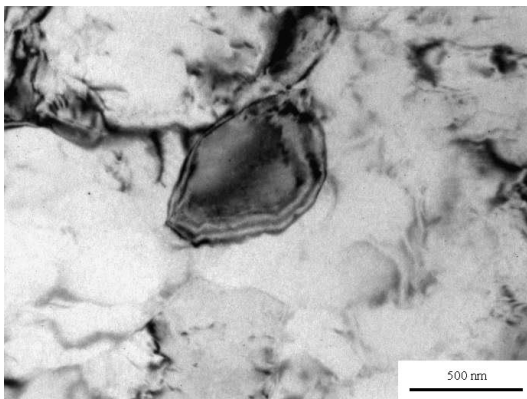
Также установлено, что в сплаве образуются наноразмерные выделения глобулярной формы вторичной упрочняющей фазы  $Mg_2Si$  со средним размером 20 нм (рисунок 4.10 г). Как показано авторами работ, посвященных исследованиям распада твердого раствора в процессе ИПД, в сплавах данной системы наличие данной фазы свидетельствует о том, что формирование УМЗ структуры сопровождается динамическим старением [4-5, 7, 58, 113-115].



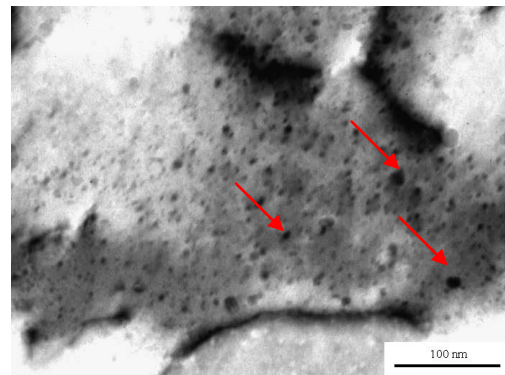
а



б



в



г

Рисунок 4.10 – Электронно-микроскопический анализ:

а-в – микроструктура алюминиевого сплава после обработки Мульти-РКУП-К; г – наноразмерные выделения вторичной упрочняющей фазы  $Mg_2Si$  (стрелками указаны выделения  $Mg_2Si$  глобулярной формы)

Твердость (HV) заготовок алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si в исходном закаленном состоянии составила  $45 \pm 3$  HV. Формирование в материале смешанной структуры в результате обработки методом Мульти-РКУП-К привело к повышению твердости до  $91 \pm 9$  HV. Распределение твердости вдоль оси заготовки свидетельствует об однородности сформированной в процессе ИПД структуры (рисунок 4.11).

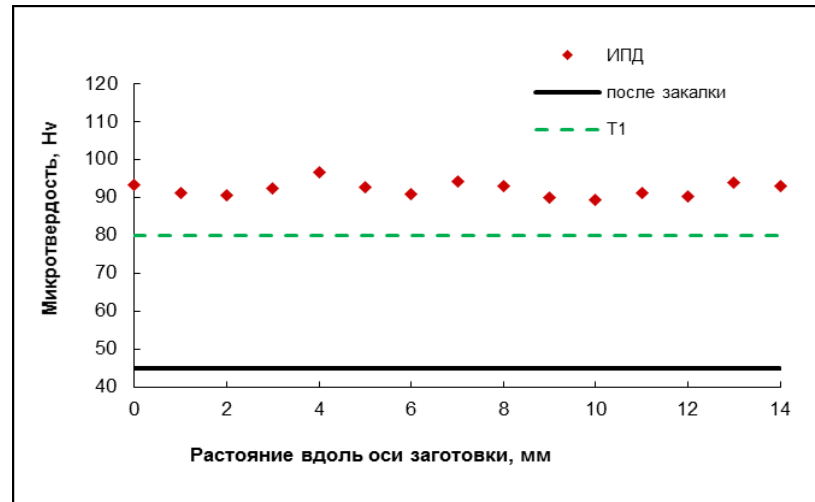


Рисунок 4.11 – Распределение твердости вдоль оси заготовки после обработки ИПД методом Мульти-РКУП-К

Результаты механических испытаний образцов после обработки Мульти-РКУП-К представлены в таблице 4.3. Для корректного сопоставления уровня свойств в таблице приведены значения после стандартной обработки Т1 (Т1 – закаленное + искусственно состаренное на максимальную прочность состояние алюминиевого сплава [116]). Полученные значения временного сопротивления разрыву хорошо согласуются с изменениями твердости. Максимальные значения временного сопротивления разрыву и электропроводности достигнуты после обработки Мульти-РКУП-К, которые, соответственно, на 43 и 5,1 % выше значений состояния Т1.

Анализ полученных значений удельной электрической проводимости позволяет сделать вывод, что использование метода Мульти РКУП-Конформ позволяет получать пилотные образцы из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si

с повышенными значениями электропроводимости при достижении высоких значений временного сопротивления разрыву уже после одного цикла обработки (таблица 4.3). Повышенные значения электропроводимости, согласно работам [113-115], обеспечиваются за счет обеднения матрицы алюминиевого твердого раствора легирующими элементами и формирования наноразмерных выделений упрочняющей фазы.

Таблица 4.3 – Физико-механические свойства алюминиевого сплава

Режим обработки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Удельная электропроводимость IACS**, %	Микротвердость HV
Состояние поставки *	180±4	120±3	30,0±1.0	51,3±0,5	84±8
T1 *	170±2	-	23,0±1,5	49,2±0,5	80±8
Мульти РКУП-Конформ	243±4	221±2	11,5±1,0	54,3±0,5	91±9
* Данные из сертификата ТУ 16-705.493-2006					
** IACS – «Международный стандарт по отоженной меди»					

Таким образом, проведенные исследования структуры и механических свойств алюминиевого сплава, подвергнутого ИПД методом Мульти-РКУП-К, позволили установить, что новый метод является весьма эффективным для повышения механических и электрических свойств алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si, что весьма привлекательно для его будущего применения.

#### 4.3 Апробация метода Мульти-РКУП-Конформ на опытно-промышленном оборудовании

Проведенные исследования на лабораторной установке позволили установить технологические параметры, которые необходимо учитывать при

деформации методом Мульти-РКУП-К. На рисунке 4.12-4.13 показаны принципиальная схема и опытно-промышленное оборудование «Вальцы ковочные комбинированные Д400 модели СО 536», на котором была проведена обработка по предлагаемой схеме.

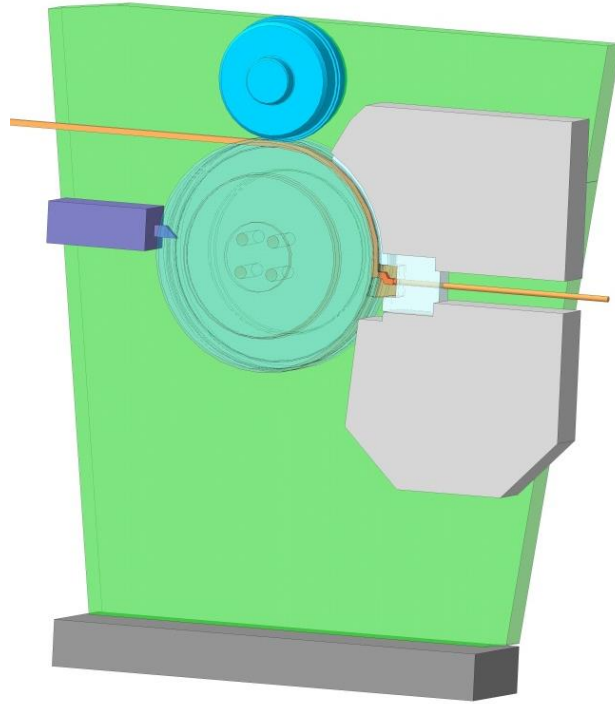


Рисунок 4.12 – Принципиальная схема

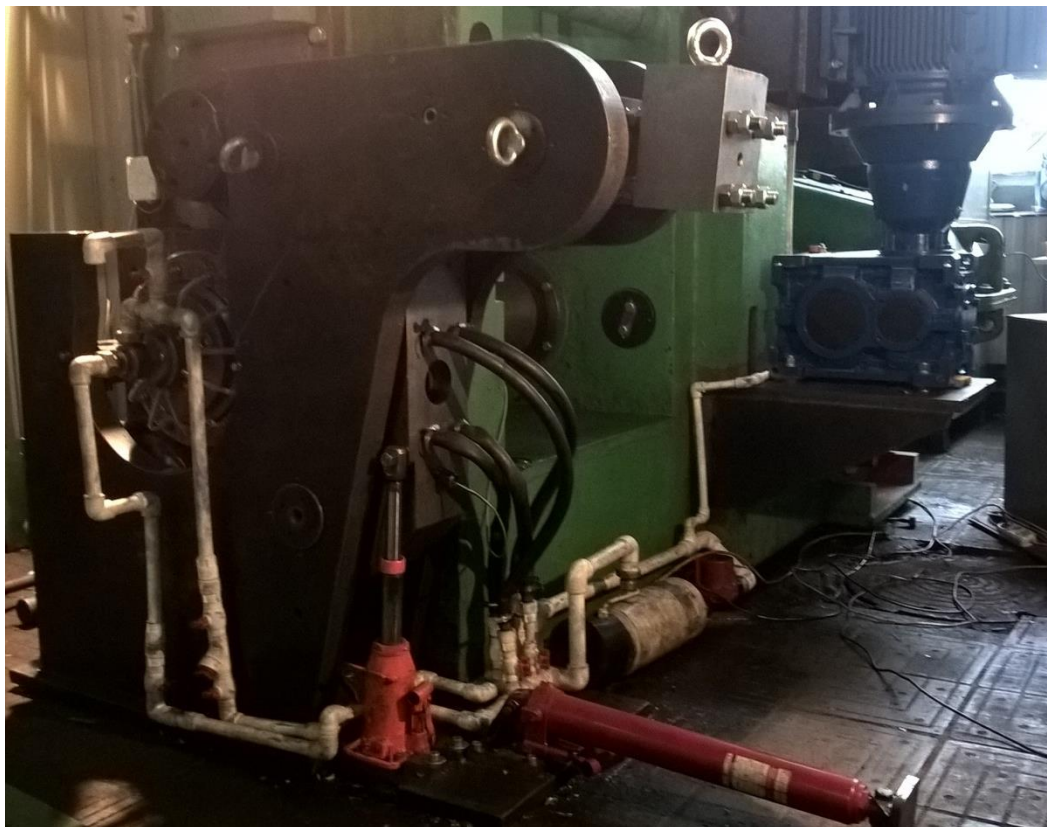


Рисунок 4.13 – Опытно-промышленное оборудование

#### **4.3.1 Исследование геометрических параметров матрицы при реализации метода Мульти-РКУП-Конформ на опытном-промышленном оборудовании**

При проектировании оснастки для реализации Мульти-РКУП-К на опытном-промышленном оборудовании было последовательно разработано три варианта матриц. 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 геометрическим параметрам лабораторной конструкции, обеспечивающей получение наиболее максимальных механических свойств методом Мульти-РКУП-К;

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

На первом этапе были проведены исследования конструкции канала матрицы с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D с рассмотрением трех вариантов оснастки. Сравнимые варианты конструкций матриц представлены на рисунке 4.14.

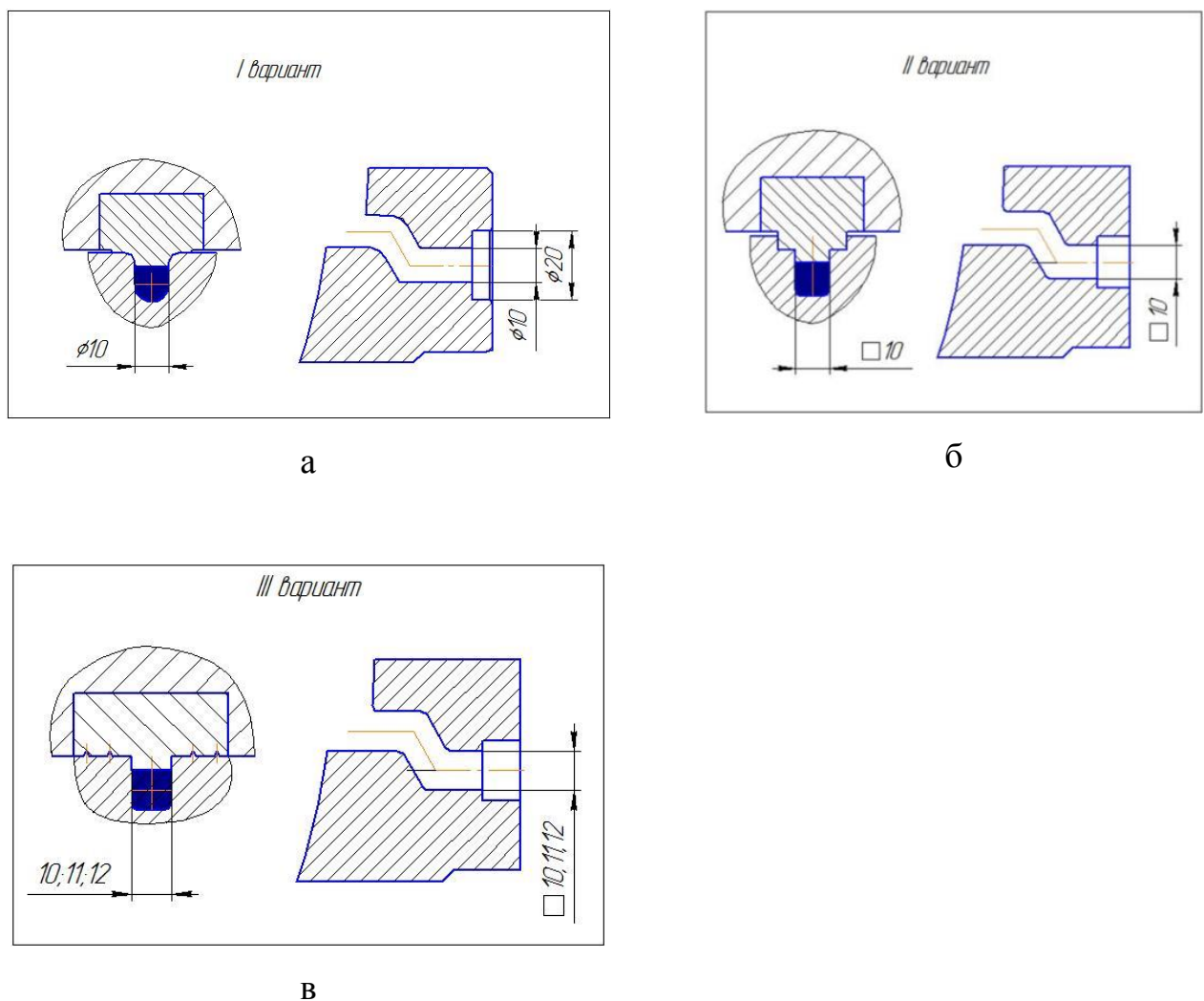


Рисунок 4.14 – Эскизы трех вариантов матриц:

а – первый вариант; б – второй вариант; в – третий вариант



При моделировании были оценены деформированное состояние, контактные силы на инструменте, рабочий момент и параметры очага деформации. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.17-4.19.

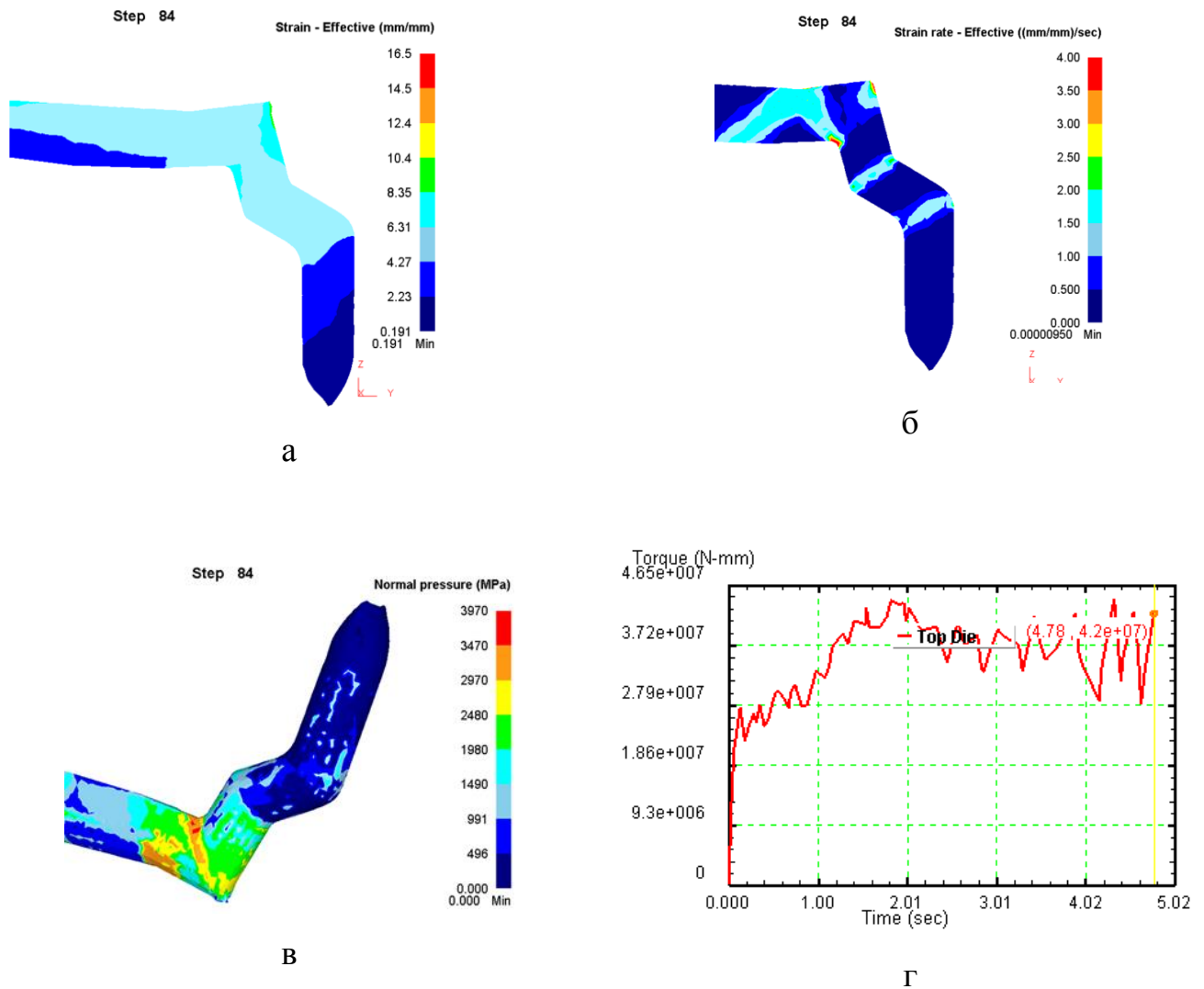


Рисунок 4.15 – Результаты компьютерного исследования варианта №1:  
 а – деформированное состояние; б – оценка параметров очага деформации;  
 в – картина распределения контактных сил; г – крутящий момент

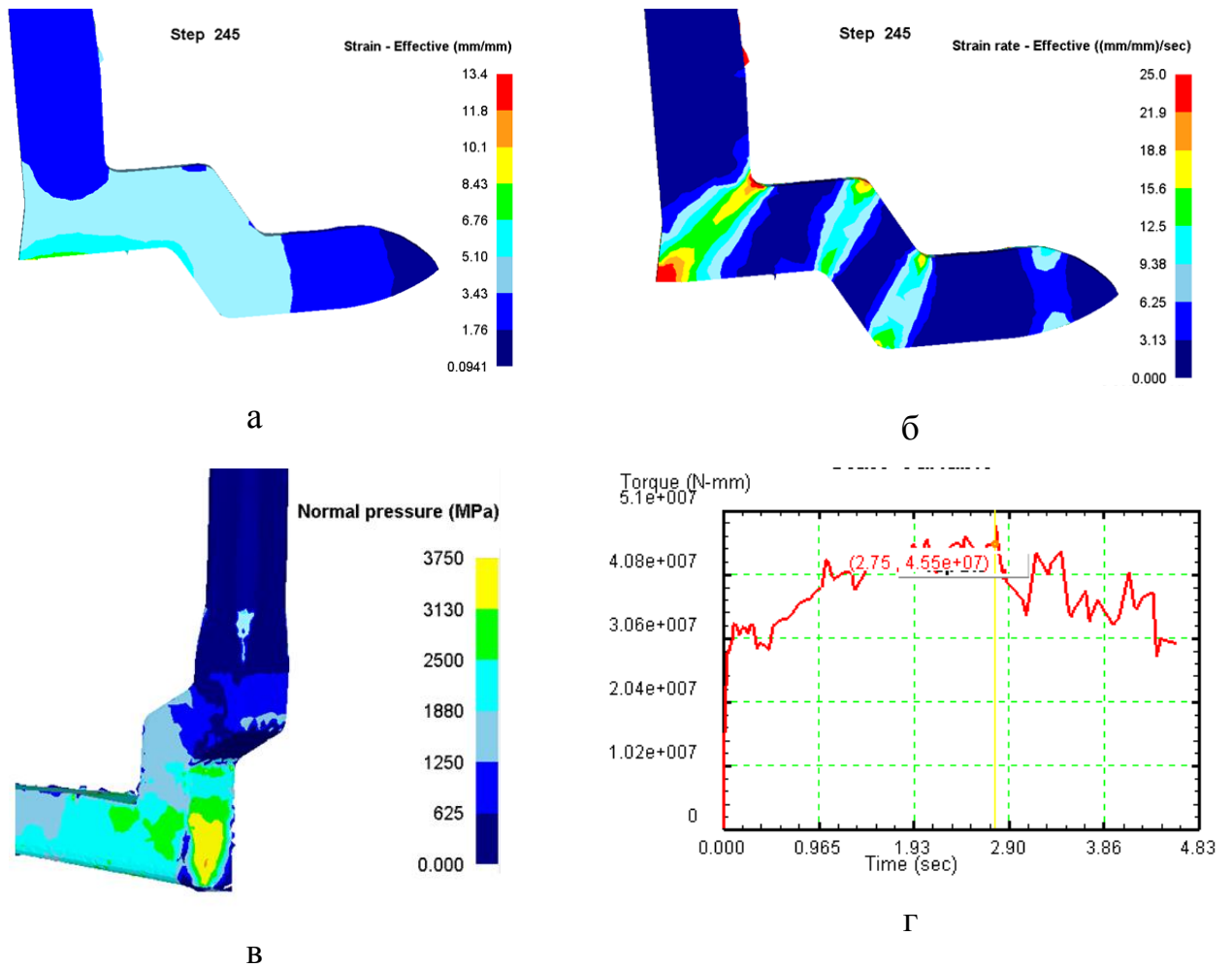


Рисунок 4.16 – Результаты компьютерного исследования варианта №2:  
а – деформированное состояние; б – оценка параметров очага деформации;  
в – картина распределения контактных сил; г – крутящий момент

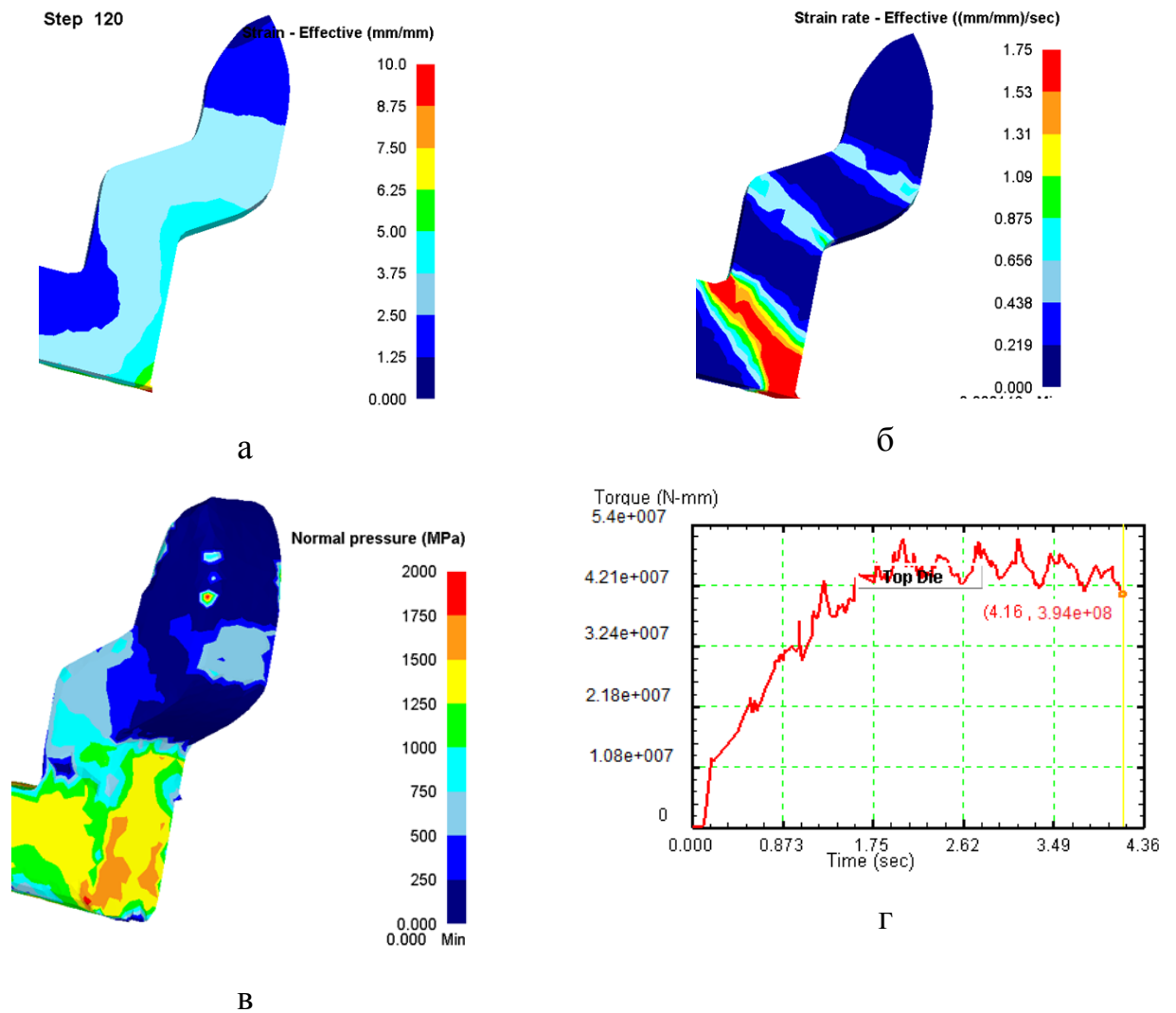


Рисунок 4.17 – Результаты компьютерного исследования варианта №3:  
 а – деформированное состояние; б – оценка параметров очага деформации;  
 в – картина распределения контактных сил; г – крутящий момент

Сравнительный анализ полученных картин показал (рисунки 4.15-4.17):

– деформированное состояние для исследованных вариантов оснастки №2 и №3 близко и значение накопленной деформации составило примерно  $e = 3,5$ , для варианта №1 эта величина выше и достигает значения  $e = 4,5$ ;

– оценка очага деформации через картины скоростей деформации показывает, что для исследованных вариантов №2 и №3 очаги деформации сдвигом ярко выражены и отвечают форме, реализуемой при РКУП, в первом

варианте оснастки первый очаг деформации размыт и не соответствует общепринятой форме очага метода РКУП;

– максимальное значение контактных сил наблюдается при вариантах оснастки №1 и №2 и в ограниченной небольшой области превышает максимально допустимые значения, при варианте №3 максимальное значение контактной силы находится на уровне предельно допустимой величины;

– максимальный крутящий момент при всех вариантах находится примерно на одном уровне. Полученные значения момента 45-50 кН·м ниже расчетного значения (60 кН·м), реализующегося на разработанном оборудовании.

В заключение следует отметить, что положительным результатом варианта оснастки №3 являются низкие значения контактных сил, способствующие более долгой работоспособности оснастки, а также ярко выраженные очаги деформации по форме и размерам характерные для схемы простого сдвига, реализуемой при РКУП.

На втором этапе были проведены экспериментальные исследования на вальцах Д400.

При варианте матрицы №1 были выбраны следующие параметры: сечение гравюры колеса являлось полукруглым, первый угол сдвига составлял  $100^\circ$ , полученный полуфабрикат катанки  $\varnothing 10$  мм. Полукруглое сечение гравюры колеса было заимствовано от конструкции валков в промышленных экструдерах, реализующих Конформ-процесс, так как обеспечивало устойчивую величину активных сил трения для создания рабочего момента и обеспечения процесса экструзии. Такая конструкция гравюры обеспечивала отсутствие концентраторов напряжений в колесе.

Было установлено, что данные геометрические параметры оснастки позволяют деформировать исходный пруток, однако временное сопротивление разрыву полученных образцов катанки была низкой (170 МПа). Это явилось следствием недостаточно полной реализации эффекта сдвига и большого деформационного разогрева. Увеличенный до  $100^\circ$  входной угол вставки обеспечивал более «мягкие» условия прессования, однако адгезионная ситуация

(налипание металла на стенки канала прессования) [117-118] была довольно активной.

При варианте №2 конструкции матрицы и колеса были приближены к геометрическим параметрам, которые были реализованы на лабораторном оборудовании при получении образцов из алюминиевого сплава Al 6101 методом Мульти-РКУП-К. Особенностью данного конструктивного варианта явилась попытка ограничить потери металла за счет создания дополнительного препятствия (замка) течению материала из очага деформации. Замок выполнен в виде ручья шириной 20 мм и глубиной 4 мм на поверхности рабочего колеса (рисунок 4.18).

Проведенный эксперимент показал, что в процессе обработки обеспечивается захват и формируется заготовка, однако из-за повышенного зазора между колесом и матрицей присутствуют большие потери металла в облой (грат), толщина которого достигает величины 1-2 мм, а момент превышает критические значения, и система автоматически блокируется из-за перегрузок. В этих условиях начинает срабатывать клиновой эффект, приводящий к повышению площади давления на гравюру колеса и башмака, и, соответственно, к поломкам инструмента.

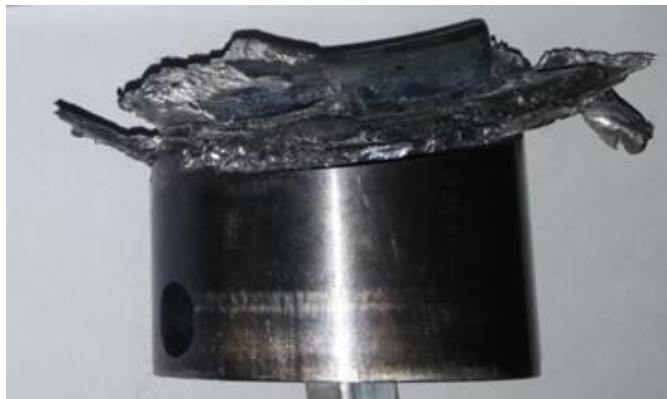


Рисунок 4.18 – Общий вид профиля гравюры рабочего колеса варианта оснастки №2

Из-за больших потерь металла на стадии условно устойчивого течения, гидростатическое давление в очаге деформации становится недостаточным для осуществления процесса экструзии. Поэтому при проведении экспериментальных работ были получены заготовки длиной только 400-600 мм из исходной заготовки длиной 1200 мм (рисунок 4.19 а). Потери металла в облой при прессовании в этих условиях составили около 50 % (рисунок 4.19 б). Прочность образцов катанки, получаемых после обработки в оснастке №2, составила 210 МПа.



а



б

Рисунок 4.19 – Результаты экспериментов:

а – полученный полуфабрикат катанки использованием варианта матрицы №2; б – матрица с облоем

При проектировании варианта матрицы №3 были учтены негативные моменты первых вариантов оснастки, связанные с выявлением повышенной адгезионной активности алюминия, создающей дополнительное сопротивление от повышенных характеристик трения, с низкой эффективностью реализации сдвигового характера деформацией, с сопровождением повышенного

деформационного разогрева. В результате был предложен разборный вариант матрицы, позволяющий оперативно влиять на конструкцию канала прессования и качество рабочих (взаимодействующих с деформирующим материалом) поверхностей матрицы. Это важно с точки зрения обеспечения стабильной и низкой шероховатости рабочих поверхностей на всем протяжении контакта, а также использования и контроля качества специальных покрытий, снижающих коэффициент трения. К тому же такая конструкция более технологичная при изготовлении, так как не требует обработки инструментов второго порядка. Также обеспечивается частичная замена рабочих элементов в случае выхода из строя или необходимости изменения деформационных условий обработки, например, при совершенствовании конструкции канала. Изменению подверглись как гравюра рабочего колеса (по сравнению с вариантом №2 были повышены радиусы сопряжения поверхностей) для снижения концентрации напряжений, так и форма донного участка гравюры, который приобрел небольшую кривизну для улучшения условий захвата и эффективности силового воздействия.

Проведенный эксперимент показал, что в процессе обработки фиксируется устойчивая стадия процесса. На данной стадии экспериментальных работ полностью исключить потери не удалось, и из исходной заготовки длиной 2,1 м диаметром 11,5 мм была получена заготовка квадратного сечения  $11 \times 11 \text{ мм}^2$  и длиной 1,6 м. Анализ показал, что потери в облой при этом составили около 10%. Вид полученной катанки представлен на рисунке 4.21.



Рисунок 4.21 – Общий вид образца катанки, полученного методом Мульти-РКУП-К с использованием варианта матрицы №3

Анализ качества поверхности полученного образца показал, что на длине заготовки поверхность не имеет задиров, заусенцев. Максимальное значение прочности образцов, получаемых после обработки в оснастке №3, составило 220 МПа. Таким образом, для дальнейших исследований был выбран вариант конструкции матрицы №3 – как наиболее рациональная модификация оснастки.

### 4.3.2 Влияние скорости обработки на силовые и температурные параметры

Как известно, скорость деформирования влияет на силовые характеристики процесса, температурный разогрев и качество поверхности получаемой заготовки. Ниже представлены результаты (рисунок 4.22) исследований влияния скорости обработки на температуру оснастки в области очагов деформации (косвенная оценка деформационного разогрева) и величину крутящего момента.

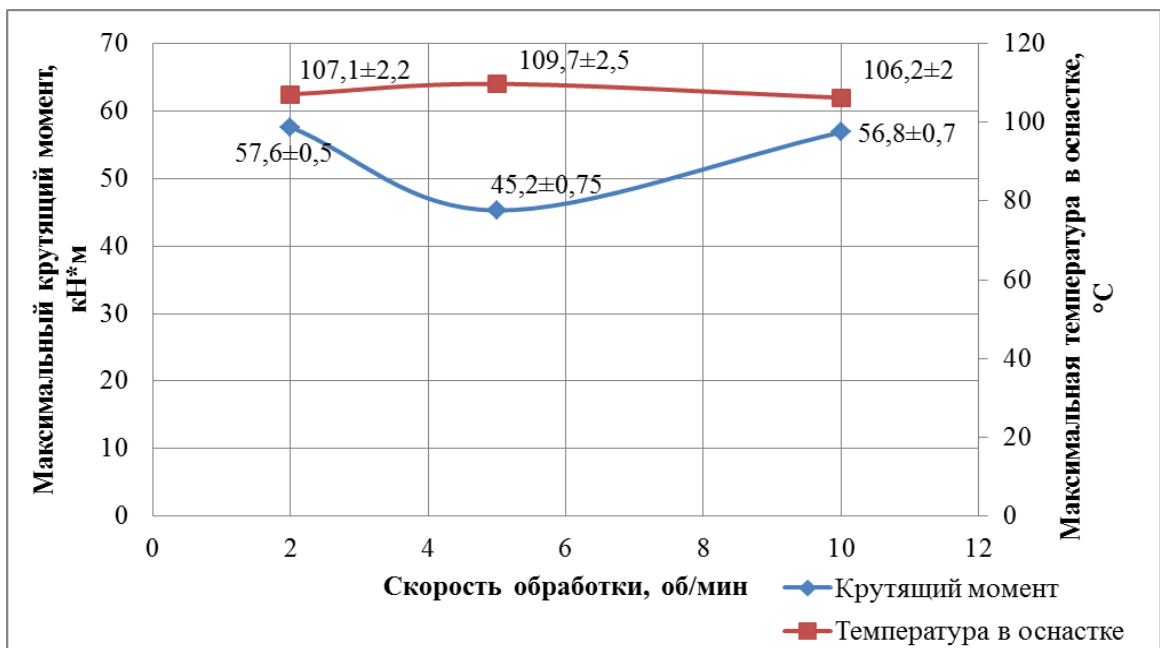


Рисунок 4.22 – График зависимости скорости обработки от температуры в оснастке и крутящего момента на рабочем колесе



Известно, что чем выше скорость обработки, тем выше производительность процесса. При скоростях обработки 2 и 10 об/мин величина максимального крутящего момента достигает значения близкого, но не превышающего номинального значения момента на оборудовании (рисунок 4.22). Значения максимальных температур разогрева находятся на одном уровне при различных скоростях обработки. Таким образом, скорость деформирования 10 об/мин является рациональным значением для реализации Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании.

Для предотвращения образования застойных зон было применено покрытие «Росойл-Конформ», рекомендуемое для реализации Конформ-процессов на опытно-промышленном оборудовании. Полученный длинномерный алюминиевый образец-полуфабрикат представлен на рисунке 4.23. Были замерены такие параметры, как величина крутящего момента, температура в оснастке, скорость обработки (рисунок 4.24).



Рисунок 4.23 – Полученный образец алюминиевого полуфабриката

Как видно из рисунка 4.24, величина максимального крутящего момента составляет 52 кН·м, что не превышает номинальный момент для промышленного оборудования (60 кН·м). Максимальная температура в оснастке составила 103 °С, с учетом того, что на выходе заготовка охлаждается водой, деформационный разогрев находится в пределах допустимых температур (глава 2).

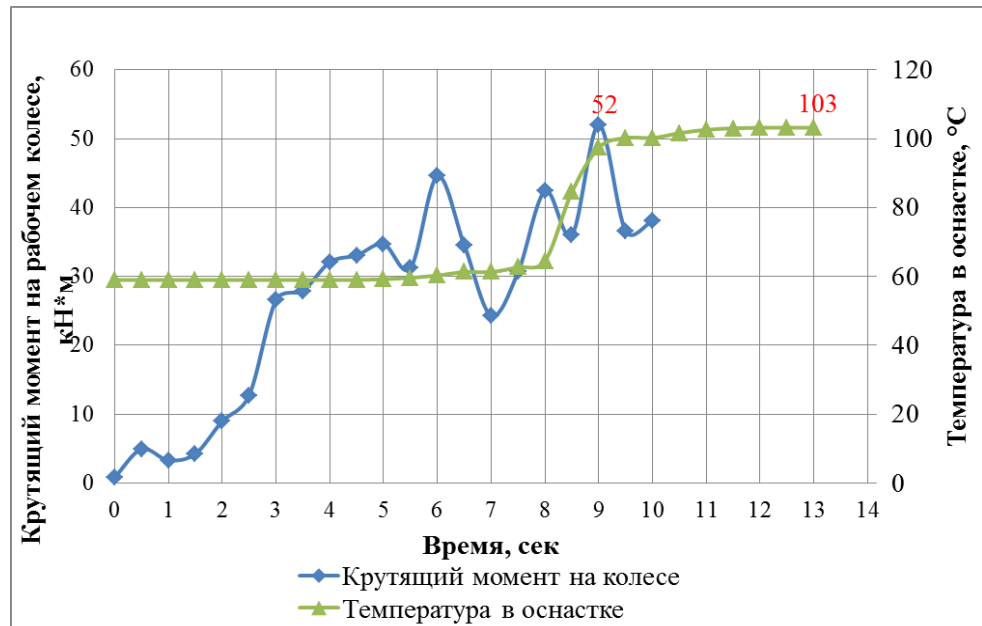


Рисунок 4.24 – График изменения крутящего момента и температуры в оснастке

Таким образом, технологические параметры, такие как максимальный крутящий момент и температурные условия, не превышают допустимые значения при реализации в промышленных условиях, следовательно, внедрение метода Мульти-РКУП-К в производство осуществимо.

Также было проведено сравнение значений максимального крутящего момента на рабочем колесе, полученных разработанной аналитической формулой расчета (глава 3), компьютерным моделированием (пункт 4.2) и экспериментальным путем (рисунок 4.25).

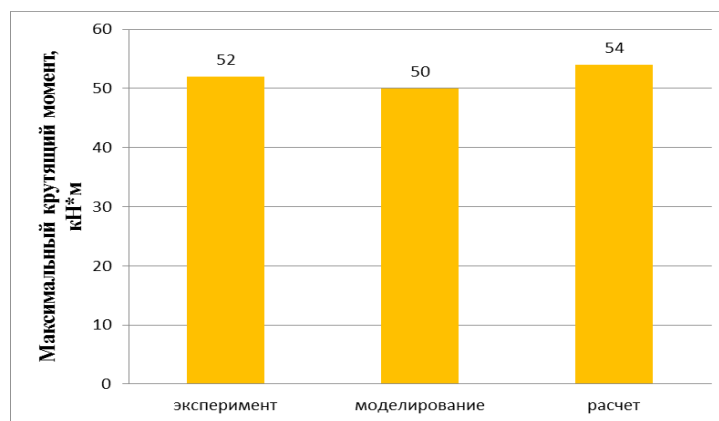


Рисунок 4.25 – Сравнение значений максимального крутящего момента на колесе, полученных компьютерным моделированием, расчетным и экспериментальным путем

Погрешность значений крутящего момента между расчетом и моделированием составляет  $\sim 8\%$ , между моделированием и экспериментом  $\sim 4\%$ , между расчетом и экспериментом  $\sim 4\%$ . 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.

### 4.3.3 Получение образцов алюминиевой катанки на опытно-промышленном оборудовании

Кинетика изменения микроструктуры алюминиевой заготовки в процессе деформации методом Мульти-РКУП-К представлена на рисунке 4.26.

Как видно из рисунка 4.26 (снимок 1), структура исходного образца однородная, видны границы зерен, зерна преимущественно вытянутые, средний размер которых составляет  $108 \pm 55$  мкм. После первого очага деформации

(снимок 2) наблюдается тип структуры с сильно вытянутыми зернами и развитой субструктурой внутри зерен.

Дальнейшая трансформация структуры происходит следующим образом: после второго очага деформации при сохранении полосчатости наблюдается активное дробление полос, а после третьего очага деформации формируются более равноосные зерна, хотя некоторая полосчатость структуры сохраняется. Размер зерен после обработки составляет порядка  $530 \pm 16$  нм с ультрамелкой внутренней субструктурой.

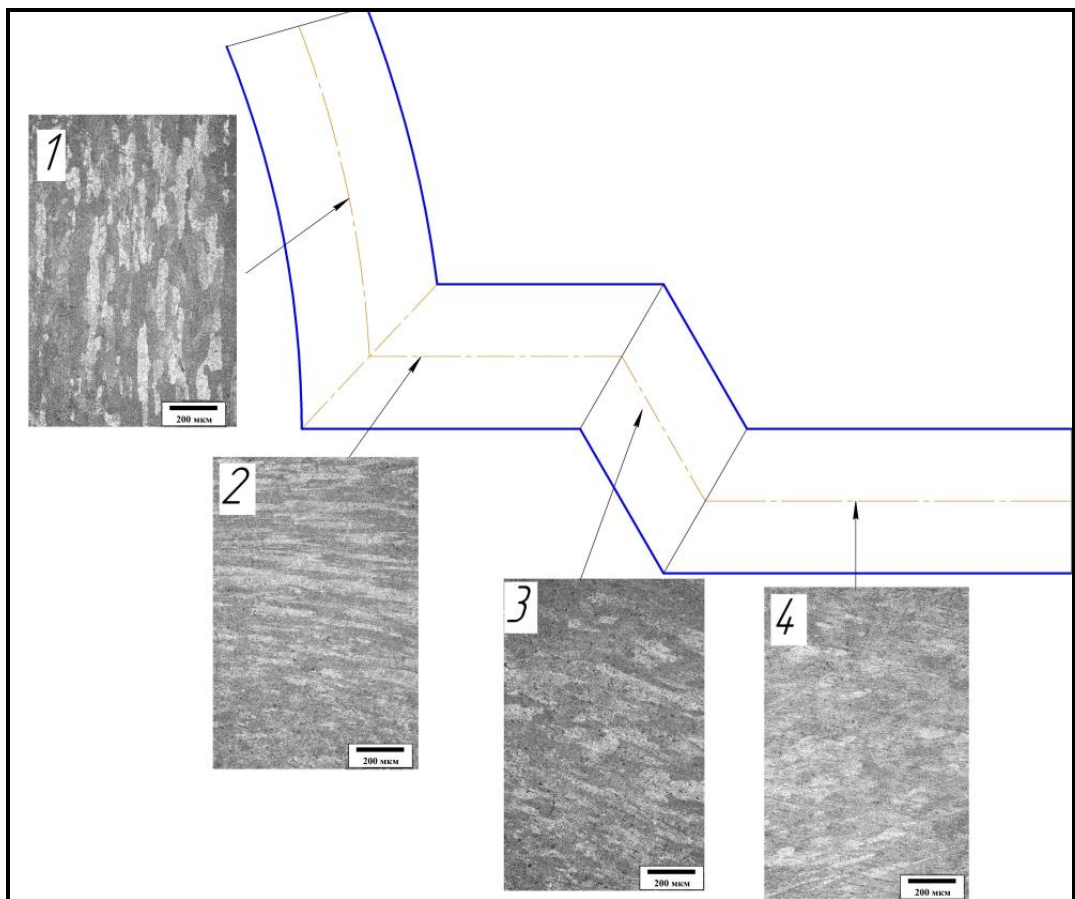


Рисунок 4.26 – Изменение микроструктуры образца в процессе деформации методом Мульти-РКУП-К

Таким образом, в процессе Мульти-РКУП-К структура трансформируется из крупнозернистой в смешанную ультрамелкозернистую, что приводит к повышению прочностных свойств.

#### 4.3.4 Механические и функциональные свойства полученных образцов

Результаты измерений физико-механических свойств алюминиевых полуфабрикатов, полученных методом Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – 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»				

Как видно из таблицы 4.4, временное сопротивление разрыву возросло с 170 ± 4 до 268 ± 10 МПа, то есть на 57 %, а электропроводимость – на 4,9 %, по сравнению с состоянием поставки, что подтверждается актом от АО «Цветлит» (Приложение Б). Следовательно, метод Мульти-РКУП-К является весьма эффективным для создания улучшенного комплекса механических и электрических свойств в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si в опытно-промышленных условиях.

#### 4.4 Рекомендации по созданию технологической линии с использованием Мульти-РКУП-Конформ

Технологические рекомендации по реализации технологической линии на опытно-промышленном производстве (рисунок 4.27):

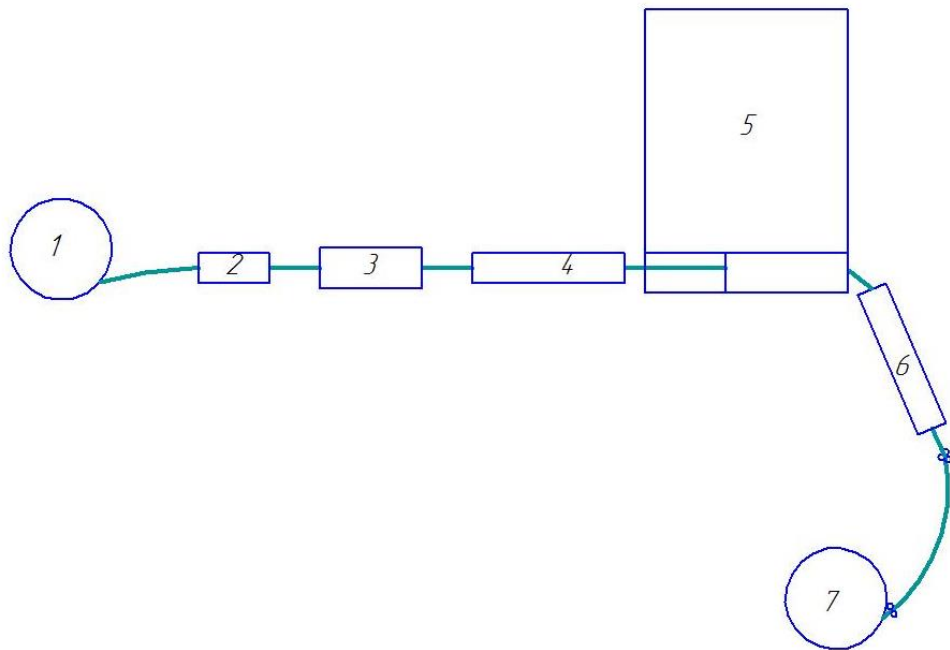


Рисунок 4.27 – Технологическая цепочка практической реализации Мульти-РКУП-К: 1 – Разматывающее устройство; 2 – Приемное устройство; 3 – Установка для правки; 4 – Установка для мойки; 5 – Установка для Мульти-РКУП-К; 6 – Установка для охлаждения и формирования круглого профиля; 7 – Установка для намотки

Из представленного рисунка 4.27 видно, что технологическая линия состоит из следующих агрегатов:

- 1) разматывающее устройство;
- 2) приемное устройство;
- 3) устройство для правки исходной катанки;
- 4) моющая установка;
- 5) установка для Мульти-РКУП-К;

- б) установка для охлаждения и формирования круглого профиля;
- 7) установка для смотки катанки.

Разматывающее устройство МРБ 1,2-0,6, позволяющее производить размотку бухты массой до 600 кг. Устройство позволяет осуществлять размотку исходной катанки из бухт диаметром 1,2 м и высотой до 0,6 м. Общий вид разматывающего устройства представлен на рисунке 4.28. Данная модель устройства является мобильной и не занимает большого пространства.



Рисунок 4.28 – Разматывающее устройство МРБ 1,2 - 0,6

Для устранения первичных колебаний катанки в процессе размотки бухты для технологической линии разработано и смонтировано приемное устройство (демпферное). Устройство оборудовано двумя блоками направляющих роликов, которые были разработаны и обеспечены закупленными стандартными изделиями, изготовлены и собраны на специальной раме. При разработке и изготовлении приемного устройства были учтены особенности промышленного оборудования. На рисунке 4.29 представлен вид изготовленного устройства.



Рисунок 4.29 – Вид изготовленного приемного устройства

С целью обеспечения заданной формы исходной катанки предусмотрено правильное устройство, позволяющее править катанку с отклонением от прямолинейности  $\pm 1$  мм на длине 1 м. Устройство имеет собственный привод и производит правку посредством ряда роликов, установленных на вращающемся барабане станины. Проведенные приемочные испытания показали работоспособность данного оборудования с учетом технологических особенностей линии. Общий вид правильного устройства представлен на рисунке 4.30. Приемные устройства подобного типа используются в промышленных технологических линиях при производстве алюминиевого профиля машинами непрерывной экструзии.



Рисунок 4.30 – Внешний вид устройства для правки исходной катанки



Для обеспечения более высокого качества обработки исходную катанку подвергают предварительной мойке. Для уменьшения адгезии алюминиевой катанки стальную оснастку деформирующего узла планируется совместить с мойкой с нанесением на поверхность катанки специального слоя, уменьшающего адгезию алюминия. Прототип изготавливаемой моющей установки представлен на рисунке 4.31.



Рисунок 4.31 – Промышленная установка для мойки

Опытно-промышленное оборудование Д400 (рисунок 4.32) на сегодня запущен и находится в режиме опытно-экспериментальной эксплуатации. Данное оборудование оснащено рядом элементов, контролирующих параметры процесса получения катанки, таких как температура рабочего колеса, деформирующего инструмента, температуры катанки на входе и выходе экструдера, а также скорости вращения рабочего колеса и крутящего момента.

Регистрация технологических параметров ведется при помощи компьютера, подключенного к электронной системе. Разработан информативный интерфейс системы регистрации параметров процесса.

В программном пакете предусмотрены операции контроля параметров, которые будут подключены только при запуске всей технологической линии (параметры с установки ТВЧ, количество, длина, намотанной катанки).



Рисунок 4.32 – Опытно-промышленное оборудование

На этапе планирования технологической линии по изготовлению катанки предполагалось наличие в линии устройства для охлаждения готового продукта. Данный элемент – «холодильник» – был реализован как дополнительный конструктивный элемент экструдера. Такой «холодильник» апробирован и используется на сегодняшний день на опытно-промышленной установке для ускоренного охлаждения получаемого продукта до температуры, не превышающей 35-50 °С. Схема «холодильника» представлена на рисунке 4.33.

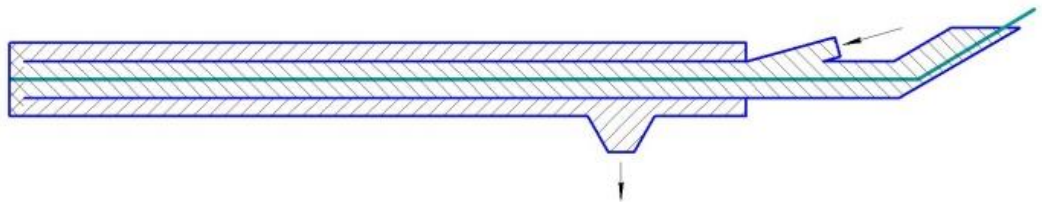


Рисунок 4.33 – Принципиальная схема «холодильника» для охлаждения готового продукта

Еще одним из важных элементов технологической линии является сматывающее устройство. Данное устройство уже прошло первичную аттестацию на технических площадях изготовителя путем намотки стальной арматуры АIII

класса диаметром 10 мм. В условиях УГАТУ данное оборудование было апробировано и испытано при намотке исходной катанки в бухту с внутренним диаметром 0,6 м. Сматывающее устройство (рисунок 4.34) позволяет сматывать бухту массой до 150 кг включительно.



Рисунок 4.34 – Сматывающее устройство

На данный момент закуплена, поставлена, изготовлена вся номенклатура планируемого оборудования для технологической линии. Новое оборудование прошло первичную апробацию на предприятиях-изготовителях и/или в условиях УГАТУ в соответствии с разработанным техническим заданием.

Таким образом, технологические рекомендации позволят получать алюминиевые полуфабрикаты с повышенным комплексом механических и функциональных свойств.

### **Выводы по главе**

1. 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,  $\text{MoS}_2$  и  $\text{BN}$ , в котором наблюдалось сочетание качества поверхности (без дефектов) и достаточно высокого значения временного сопротивления разрыву 250 МПа.

2. Установлено, что метод ИПД – Мульти-РКУП-К на лабораторном оборудовании позволяет сформировать в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si смешанную структуру, обеспечивающую одновременное повышение временного сопротивления разрыву и электропроводимости материала на 43 % и 5,1 % соответственно по сравнению с состоянием поставки (Т1).
3. 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.
4. Установлено, что обработка алюминиевых образцов марки Al 6101 методом Мульти-РКУП-К на опытно-промышленном оборудовании приводит к повышению прочности материала со  $170 \pm 4$  до  $268 \pm 10$  МПа, электропроводимости с 49,2 до 54,1 % IACS по сравнению с состоянием поставки (Т1).
5. 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  $\sim 8\%$ , моделированием и экспериментом  $\sim 4\%$ , расчетом и экспериментом  $\sim 4\%$ .
6. Разработан комплекс технологических и технических решений, обеспечивающих повышение качества длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si в условиях сверхбольших разовых деформаций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 °С 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 электропроводности 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  $170 \pm 4$  до  $268 \pm 10$  МПа, электропроводимости с 49,2 до 54,1 % IACS по сравнению с состоянием поставки (T1).

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  $\sim 8\%$ , моделированием и экспериментом  $\sim 4\%$ , расчетом и экспериментом  $\sim 4\%$ .

14. Разработан комплекс технологических и технических решений, обеспечивающих повышение качества длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si в условиях сверхбольших разовых деформаций.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Экономика России, цифры и факты. Часть 7 Энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://utmagazine.ru/posts/10560-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-7-energetika> (дата обращения 30.06.2015).
2. Воронцова, Л.А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях / Л.А. Воронцова, В.В. Маслов, И.Б. Пешков. – М.: Энергия, 1971. – 224 с.
3. Белый, Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий / Д.И. Белый // Кабели и Провода, 2012. – №1 – С. 8-15.
4. Murashkin, M.Yu. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC / M.Yu. Murashkin, I. Sabirov, V.U. Kazykhanov // Journal of Materials Science, 2013. – Vol. 48(13). – P.4501-4509. doi: 10.1007/s10853-013-7279-8.
5. Sabirov, I. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development / I. Sabirov, M.Yu. Murashkin, R.Z. Valiev // Materials Science & Engineering A, 2013. – Vol.560. – P.1-24.
6. Aleksandrov, I. V. Analysis of the deformation behavior of copper subjected to equal-channel angular pressing and subsequent tension / I. V. Aleksandrov, R. G. Chembarisova, V. D. Sitdikov, G. I. Raab, V. U. Kazykhanov // Physics of metals and metallography, 2007. – Vol.104. – P.306-314.
7. Valiev, R. Z. Grain Refinement and Mechanical Behavior of the Al Alloy, Subjected to the New SPD Technique / R. Z. Valiev, M.Yu. Murashkin, E.V Bobruk, G. I. Raab // Materials Transactions, 2009. – Vol. 50(1). – P. 87-91.
8. Raab, G. I. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform / G. I. Raab, R.Z. Valiev, T. C. Lowe, Y.T. Zhu // Materials Science and Engineering A, 2004. – Vol.382. – P. 30-34.



9. Mann, V.Kh. Nanostructured Wire Rod Research and Development in Russia / V.Kh. Mann, A.Yu . Krokhin, I.A. Matveeva, G.I. Raab, M.Yu. Murashkin, R.Z. Valiev // Light metal age, 2014. – Vol.72(6). – P. 26-29.
10. Прогноз 2015-2017 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Федеральной службы по тарифам: сайт. – URL: <http://www.fstrf.ru/about/activity/prognoz> (дата обращения 20.01.2015).
11. Горбунов, Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы: сб. докладов четвертого международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2012. – С. 828-833.
12. Пешков, И.Б. Состояние и перспективы применения алюминия в кабельной промышленности / И.Б. Пешков // Кабели и Провода, 2009. – №1. – С. 7-9.
13. Уваров, Е.И. Кабельная промышленность России и стран СНГ в 2013 году / Е.И. Уваров // Кабели и Провода, 2014. – № 1. – С. 310- 344.
14. Пешков, И.Б. Кабельная промышленность России и стран СНГ. Этапы развития, новые задачи / И.Б. Пешков // Кабели и Провода, 2009. – №5. – С. 4-10.
15. Уваров, Е.И. Кабельное производство в 2011 году. Итоги работы предприятий Ассоциации «Электрокабель» / Е.И. Уваров // Кабели и Провода, 2012. – №1. – С. 3-6.
16. Обзор рынка алюминиевой катанки. – М.: ИнфоМайн, 2008 – 90 с.
17. Официальный сайт компании «Southwire» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.southwire.com/SCR.htm> (дата обращения 12.03.2016).
18. Scawina [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.npa.pl> (дата обращения 12.03.2016).
19. Белый, Д.И. ООО «Элкат» - Более 20 лет успешной работы / Д.И. Белый // Кабели и Провода, 2012. – №1. – С. 23-29.
20. Официальный сайт компании «Properzi» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.properzi.com/index.html> (дата обращения 12.03.2016).

21. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
22. Kim, J.K. Effect of aging treatment on heavily deformed microstructure of 6061 aluminum alloy after equal channel angular pressing / J.K. Kim, H.G. Jeong, S.I. Hong // *Scripta Mater*, 2001. – Vol. 45. – P. 901-907.
23. Nurislamova, G. Nanostructure and related mechanical properties of Al 6061 alloy processed by severe plastic deformation / G. Nurislamova, X. Sauvage, M. Murashkin // *Philosophical Magazine Letters*, 2008. – Vol. 88(6). – P. 459-466.
24. Могучева, А.А. Структура и свойства алюминиевого сплава 1421 после РКУ-прессования и изотермической прокатки / А.А. Могучева, Р.О. Кайбышев // *Физика металлов и металловедение*, 2008. – Т.106. – № 4. – С. 1-10.
25. Бродова, И.Г. Особенности измельчения структуры алюминиевых сплавов с переходными металлами / И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, А.Н. Петрова // *Письма о материалах*, 2011. – Т.1. – С. 32-35.
26. Horita, Z. Development of fine grained structures using severe plastic deformation / Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto // *Material Science and Technology*. – 2000. – Vol. 16. – P. 1239-1245.
27. Adedokun, S.T. Characteristics of an Aluminum Alloy after Generation of Fine Grains Using Equal Channel Angular Extrusion Process / S.T. Adedokun, Y.K. Chou // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2011. – P.289-293.
28. Герман, Э. Непрерывное литье / Э. Герман. – М.: Металлургиздат, 1961. – 814 с.
29. Дрозд, В.Г. 60 лет научно-конструкторской и производственной деятельности ВНИИМЕТМАШ / В.Г. Дрозд, А.И. Майоров, Б.А. Сивак. – М.: Наука, 2005. – 509 с.
30. Официальный сайт компании «ВНИИМЕТМАШ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vniimetmash.ru/> (дата обращения 24.05.2016).
31. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко,

Н.Н. Загиров – М.:МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

32. Климко, А.П. Структурные исследования пруткового алюминия, полученного методом совмещенных процессов литья – прокатки – прессования / А.П. Климко, А.И. Гришечкин, В.С. Биронт // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика: сб. науч. тр. / под общ. ред. В.В. Стацеры. – Красноярск: ГАЦМиЗ, 2001. – вып. 7. – С. 99-101.

33. Сидельникова, Е.С. Исследование температуры начала рекристаллизации алюминиевого прутка, полученного методом СЛИПП / Е.С. Сидельникова, А.П. Климко, В.С. Биронт // Материаловедение и современные технологии: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Ю.А. Баландина. – Магнитогорск, 2002. – Ч. II. – С. 15-18.

34. Пат. 2257419 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/03, С 22 F 1/04. Способ получения модифицирующих материалов для алюминия и его сплавов / Климко А. П., Загиров Н. Н., Биронт В. С., Сидельников С. Б., Лопатина Е.С.; заявители и патентообладатели Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Красноярская государственная академия цветных металлов и золота" – № 2004102027/02 ; заявл. 22.01.2004; опубл. 27.07.2005.

35. Сергеев, В.М., Получение пресс-изделий непрерывным литьем-прессованием / В.М. Сергеев, Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов // Цветные металлы, 1988. – №12 – С. 65-67.

36. Горохов, Ю.В. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, И.Л. Константинов // Вест. МГТК им. Г.И. Носова, 2009. – №3.– С. 20-23.

37. П. м. 102550 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 В 1/46. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / Беляев С.В, Сидельников С.Б., Довженко И.Н., Горохов Ю.В., Лопатина Е.С., Губанов И.Ю., Соколов Р.Е., Солопко И.В., Киселев А.Л., Галиев Р.И.; заявители и патентообладатели Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" – № 2010142016/02 ; заявл. 13.10.2010; опубл. 10.03.2011.

38. Горохов, Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко. – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2013. – 224 с.

39. П. м. 73245 Российская Федерация, МПК В 21 С 3/00, В 22 D 11/00 Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н. , Лопатина Е.С., Соколов Р.Е., Виноградов О.О., Пещанский А.С., Беляев С.В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" – № 2007148951/22; заявл. 25.12.2007; опубл. 20.05.2008.

40. Пат. 2457914 Российская Федерация, МПК В 21 С 3/00, В 22 D 11/00. Устройство для непрерывного литья. Прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / Баранов В.Н., Ворошилов Д.С., Галиев Р.И., Довженко И.Н., Довженко Н.Н., Лопатина Е.С., Сидельников С.Б., Солдатов С.В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр" – № 2011103241/02; заявл. 31.01.2011; опубл. 10.08.2012.

41. Беспалов, В.М. Исследование совмещенных процессов обработки сплавов системы Al-Zr для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Красноярск, 2015. – 24 с.

42. Беспалов, В.М. Исследование механических свойств новых сплавов алюминия с переходными металлами / В.М. Беспалов, Р.Е. Соколов, А.С. Сидельников // Молодежь и наука: материалы НТК – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2011. – Т.3. – С. 161-165.

43. 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.; заявитель и

патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "НаноMeT" — № 2012143646/02, заявл. 11.10.2012 ; опубл. 10.06.2014.

44. Рааб, Г.И. Разработка и исследование метода СЛИПП-ИПД для получения алюминиевых полуфабрикатов высокого качества / Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, Р.З. Валиев// Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2014. – №3. – С. 309-315.

45. Пат. 2181314 Российская Федерация, МПК В 21 D 25/02, В 21 С 25/00 Устройство для обработки металлов давлением / Рааб Г.И., Кулясов Г.В., Полозовский В.А., Валиев Р.З.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет – № 2000115099/02; заявл. 09.06.2000; опубл. 20.04.2002.

46. Raab, G.I. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels / G.I. Raab // Material Science and Engineering A, 2005. – Vol. 410–411. – P. 230–233.

47. Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев. – Минск: Наука и техника, 1994.– 232 с.

48. Green, D. The continuous extrusion forming of wire sections / D. Green// Journal of the Institute of Metals, 1972. –No.100. – P.295-300.

49. Потапов, И.Н. Методы непрерывного прессования / И.Н. Потапов, Д.Б. Евремов, П.П. Финагин, Б.А. Прудковский, Б.А. Романцев // Цветные металлы, 1987. – №3. – С. 85-88.

50. Горохов, Ю.В. Силовые параметры непрерывного прессования металла способом Конформ / Ю.В. Горохов, В.М. Сергеев, Ф.С. Гилеев, В.Н. Корнилов // Цветные металлы, 1987. – № 7. – С. 73-75.

51. Сергеев, В.М. Расчет оптимальной геометрии инструмента при непрерывном прессовании металла / В.М. Сергеев, В.Г. Шеркунов, Ю.В. Горохов// Металлы. Известия академии наук СССР, 1990. – № 4. – С. 183-187.

52. Корнилов, В.Н. Разработка устройств для непрерывного прессования цветных металлов и сплавов способом Конформ на основе морфологического анализа /

В.Н. Корнилов, Ю.В. Горохов, В.М. Сергеев // Цветные металлы, 1995. – № 11. – С. 58-62.

53. Скотт, К. Экструзионная установка Conform ТМ, алюминиевые отходы и космические технологии / К. Скотт // Обогащение руд. Цветные металлы, 2001. – Спец. выпуск. – С. 91-93.

54. Патент 3934446 США, МПК В 21 В 21/00 Methods of and apparatus for production of wire / Betzalel Avitzur; заявитель и патентообладатель Betzalel Avitzur – US 05/461,307; заявл. 16.04.1974; опубл. 27.01.1976.

55. Пат. 2446027 Российская Федерация, МПК В 21 С 1/00, В 21 J 5/06, С 21 D 7/00 Способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой / Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Барышников М.П., Полякова М.А.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова" – № 2010122149/02; заявл. 31.05.2010; опубл. 27.03.2012.

56. Чукин, М.В. Проектирование инструмента для равноканальной угловой протяжки проволоки / М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева // Известия ТулГУ. Технические науки, 2014. – №10. – Ч.2. – С.62-67.

57. Чукин, М.В. Влияние термической обработки на эволюцию структуры и свойств стальной проволоки в процессе РКУП протяжки / М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2008. – №2. – С. 70-71.

58. Лежнев, С. Н. Анализ влияния нового совмещенного процесса «равноканальное угловое прессование-волочение» на микроструктуру и свойства деформируемой медной проволоки / С. Н. Лежнев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 59–65.

59. Волокитин, А.В. Развитие совмещенного способа деформирования «прессование-волочение» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы / А.В. Волокитин, А.М. Фефелов // Вестник науки Сибири, 2011. – № 1.

60. Найзабеков, А. Б. Исследование процесса равноканального углового прессования алюминиевых сплавов / А. Б. Найзабеков, В. А. Андреященко //

Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина». – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 706-709.

61. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией/ Р.З., Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

62. Рааб, Г.И. Равноканальное угловое прессование по схеме conform длинномерных наноструктурных полуфабрикатов из титана / Г.И. Рааб, Р.З. Валиев// Кузнечно-штамповочное производство, 2008. – № 1. – С. 21-27.

63. Сегал, В.М. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В.М. Сегал, В.И. Резников, А.С. Дробышевский, В.И. Копылов // Металлы, 1981.– Т.1. – С.115-123.

64. Рааб, Г.И.Равноканальное угловое прессование длинномерных заготовок/ Г.И. Рааб, Р.З. Валиев // Цветная металлургия, 2000. – №5. – С.50 - 53.

65. Katsas, S.Characterisation of Conform and conventionally extruded Al–4Mg–1Zr. Effect of extrusion route on superplasticity / S. Katsas, R. Dashwood, G. Todd, M. Jackson, R. Grimes //Journal Material Science, 2010. – Vol. 45. – P. 4188–4195.

66. Polyakov, A. V. Peculiarities of ultrafine-grained structure formation in Ti Grade-4 using ECAP-Conform/ A. V. Polyakov, I. P. Semenova, G. I. Raab // Advanced Materials Science, 2012. – Vol. 31(1). – P. 78-84.

67. Гундеров, Д. В. Структура и свойства сплава TiNi, подвергнутого равноканальному угловому прессованию по схеме Conform / Д. В. Гундеров, Е. А. Прокофьев, А. В. Лукьянов, Г. И. Рааб, А. В. Коротницкий, В. Браиловский, С. Д. Прокошкин // Материаловедение, 2009. – №8. – С.45-48.

68. Xu, C. Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy/ C. Xu, S. Schroeder, P. V. Berbon, T. G. Langdon.// Acta Materialia, 2010 – Vol. 58. – P.1379–1386.

69. Huang, J.I. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening / J.I. Huang, I.T. Zhu, H. Jiang // *Acta Materialia*, 2001. – Vol. 49 (9). – P. 1497-1505.
70. 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.
71. Фахретдинова, Э.И. Исследование течения металла в процессе Мульти-РКУП-Конформ / Э.И. Фахретдинова, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев // *Advanced Engineering Materials*, 2015. – Vol.17 (12). – P. 1723–1727.
72. Фахретдинова, Э.И. Влияние геометрии формообразующей оснастки на напряженно-деформированное состояние процесса Мульти-РКУП-Конформ / Э.И. Фахретдинова, Г.И. Рааб, М.М. Ганиев, О.Л. Рыжиков // 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.
73. Рааб, Г.И. Компьютерное исследование влияния геометрии оснастки на деформационные параметры пластической обработки алюминиевой катанки методом Мульти-РКУП-Конформ / Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, Р.З. Валиев, Л.П. Трифоненков, В.Ф. Фролов // *Металлург*, 2015 – № 11. – С. 22-27.
74. Raab, G.I.. The role of severe plastic deformation in the formation of high electrical properties of aluminum alloy / G.I. Raab, E.I. Fakhretdinova // *Machines, Technologies, Materials*, 2014. – I.12. – P.45-47.
75. 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.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "НаноMeT"– № 2013156136/02 ; заявл. 17.12.2013 ; опубл. 20.08.2015.
76. П. м. 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.

77. Raab, G.I. Advance ECAP techniques whit increased strain per pass / G.I. Raab / Ultrafine Grained Materials IV, 2006. – P. 177-181.

78. Valiev, R.Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement/ R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Progress in Material Science, 2006. – Vol.51(7). – P. 881-981.

79. Nakashima, K. Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains / K. Nakashima, Z. Horita , M. Nemoto, T. G. Langdon // Materials Science and Engineering A, 2000. – Vol. 281(1-2). – P. 82-87.

80. Лицензия. Р.С. SFTS. Key #9190/ Ufa, Russia.

81. Боткин, А.В. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования в параллельных каналах / А. В. Боткин, Г. И. Рааб, А. Н. Абрамов, Р. З. Валиев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2009. – № 6. – С. 3–7.

82. Боткин, А.В. Интенсивная пластическая деформация цилиндрической заготовки из сплава 6061 равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / А.В. Боткин, М.Ю. Мурашкин, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2009. – № 4. – С. 33.

83. Yoon, S. Ch. Finite element analysis of the effect of the inner corner angle in equal channel angular pressing / S. Ch. Yoon, H. S. Kim // Materials Science and Engineering A, 2008. – Vol.490 (1-2). – P.438–444.

84. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 22 с.

85. Мурашкин, М.Ю. Особенности структуры и механические свойства алюминиевого сплава 6061, подвергнутого обработке равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / М.Ю. Мурашкин, Е.В. Бобрук, А.Р.

- Кильмаметов, Р.З. Валиев // Физика металлов и металловедение, 2009. – Т. 108. – № 4. – С. 439-447.
86. Semenov, V.I. Computer Simulation of Continuous SPD Process Commercially Pure Titanium Using Virtual Full Factorial Experiment with the Influence of Friction Factors / V.I. Semenov, S.-J. Huang, L.Sh. Shuster, A.G. Raab // ISSN: 0354-8996 Tribology in Industry, 2016. – Vol. 38. – No. 1. – P. 127-132.
87. Рааб, Г.И. Анализ и экспериментальное исследование НДС процесса РКУП в условиях высоких давлений / Г.И. Рааб, А.В. Боткин, И.В. Александров, А.В. Ашнуров, Р.З. Валиев // Физика и техника высоких давлений, 2002. – Т. 12. – № 4. – С. 47-52.
88. Segal, V.M. Materials processing by simple shear / V.M. Segal // Materials Science and Engineering A, 1995. – Vol.197 (2). – P.157.
89. Васильев, Д.И. Основы проектирования деформирующего инструмента/ Д.И. Васильев, М.А. Тылкин, Г.П. Тетерин. – М.: Высшая школа, 1984. – 224 с.
90. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб. – Уфа: Гилем, 2013. – 376 с.
91. Эрк, А.Е. Поведение заготовки и формоизменение металла при непрерывном равноканальном угловом прессовании с радиусами в углах пересечения канала / А.Е. Эрк, В.Г. Шеркунов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2007. – №1. – С.50-54.
92. Raab, G. Modelling of Stress-Strain Distribution in ECAE by analytical-experimental method / G. Raab, R. Lapovok // Ultrafine Grained Materials IV TMS Meeting, 2006. – P. 189-194.
93. Рааб, Г.И. Моделирование процесса равноканального углового прессования по схеме «Конформ» титановой длинномерной заготовки / Г.И. Рааб, Ф.Ф. Сафин, Р.З. Валиев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2006. – № 6. – С. 41-44.

94. Рааб, Г.И. Особенности НДС при РКУП с противодавлением / Г.И. Рааб, К.Н. Макарычев, Р.З. Валиев // Физика и техника высоких давлений, 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 72–79.
95. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник/ О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
96. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением /В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.
97. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
98. Хайретдинов, Э. Ф. Инструментальные материалы для штампов горячего деформирования: учебное пособие /Э. Ф. Хайретдинов, В. З. Бикбулатова., С. П. Павлинич. – Уфа: Уфимск. Гос. Авиац. техн. ун-т, 1998. – 200 с.
99. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
100. 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.
101. Фахретдинова, Э.И. Разработка модели силовых параметров нового метода интенсивной пластической деформации Мульти РКУП-КОНФОРМ / Э.И. Фахретдинова, Г.И. Рааб, М.М. Ганиев // Сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч.3 – С.172-174.
102. Грудев, А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. - М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
103. Фролов, К.В. Современная трибология. Итоги и перспективы / К.В.Фролов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.

104. Боткин, А. В. Научно-методологические основы проектирования процессов углового прессования: дис. ...док. техн. наук. – М., 2014. – 282 с.
105. Леванов, А.Н. Контактное трение в процессах ОМД / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спасский. – М.: Metallurgy, 1976. – 147 с.
106. Беляев, С.В. Анализ энергосиловых условий непрерывного прессования методом Conform /С.В. Беляев, Д.В. Богданов, И.Ю. Губанов, Ю.В. Горохов, А.Ю. Крохин, В.Ф. Фролов, И.В. Костин//Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2015. - №3. – С.44-51.
107. Ренне, И.П. Теоретические исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением / И.П. Ренне. – Тула: ТПИ, 1979. – 97с.
108. Утяшев, Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации / Ф.З.Утяшев. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 313 с.
109. 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. – №2. – С. 202-206.
110. 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.
111. ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Введ. 2000-06-30. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.
112. ГОСТ 7229-76. Кабели, провода и шнуры, метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников. – Введ. 1977-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 6 с.
113. Markushev, M.V. Structure and mechanical properties of commercial Al-Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing / M.V. Markushev, M.Yu.

Murashkin // *Materials Science and Engineering A*, 2004. – Vol. 367 (1-2). – С. 234-242.

114. Bobruk, E. Microstructure features and mechanical properties of a UFG Al-Mg-Si alloy produced via SPD / E. Bobruk, I. Sabirov, V. Kazykhanov, R. Valiev, M. Murashkin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014.

115. Sabirov, I. Application of equal channel angular pressing with parallel channels for grain refinement in aluminum alloys and its effect on deformation behavior / I. Sabirov, M.T. Perez-Prado, M. Murashkin, J.M. Molina-Aldareguia, E.V. Bobruk, N.F. Yunusova, R.Z. Valiev // *International Journal Material Forming*, 2010.– Vol. 3(1). – P. 411–414.

116. ТУ 16-705.493-2006. Катанка из алюминиевого сплава. Технические условия. – Введ. 2006-12-01. – М.: Бюро стандартов. – 10 с.

117. Ерманок, М.З. Производство профилей из алюминиевых сплавов / М.З. Ерманок, В.И. Фейгин. – М. : Металлургия, 1972. – 272с.

118. Ерманок, М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов / М.З. Ерманок. – М. : Металлургия, 1974. – 232с.

УТВЕРЖДАЮ:



## АКТ

**об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» результатов кандидатской диссертации Э.И. Фахретдиновой «Разработка нового комбинированного процесса получения алюминиевых полуфабрикатов электротехнического назначения»**

Настоящим актом подтверждаем, что результаты кандидатской диссертации Э.И. Фахретдиновой «Разработка нового комбинированного процесса получения алюминиевых полуфабрикатов электротехнического назначения» используются при чтении курса лекций по дисциплине «Деформационно-термическая обработка материалов» и «Термическая и химико-термическая обработка материалов» специальности 28.03.02 «Нанотехнологии».

Также результаты были использованы при написании следующих учебных пособий:

1. Клевцов, Г. В. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов: [учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 280302 «Нанотехнологии», 150700 «Машиностроение», магистров 280402 «Нанотехнологии» УГАТУ, магистров/бакалавров 220401 «Материаловедение и технологии материалов» Тольяттинского государственного университета] / Г. В. Клевцов, Е. В. Бобрук, И. П. Семенова, Н. А. Клевцова, Р. З. Валиев; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – 240 с.
2. Бобрук, Е. В. Современные методы деформационно-термической обработки: от традиционных материалов до наноструктурных : [учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров/магистров 152200 "Нанотехнологии", 150700 "Машиностроение"] / Е. В. Бобрук, И. П. Семенова, Р. З. Валиев ; Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) .— Уфа : УГАТУ, 2015 .— 112 с.

Начальник учебного управления

Н. Г. Косьяненко

Зав. кафедрой нанотехнологий

Р.З. Валиев

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
по развитию АО «Цветлит»  
А.В. Калачин  
«  » сентября 2016г.

**АКТ**

проведения испытаний и исследований опытно-промышленных образцов катанки  
диаметром 9,5 мм из алюминиевого сплава АВЕ системы Al-Mg-Si

Настоящим актом удостоверяется, что коллективом авторов Научно-исследовательского института физики перспективных материалов при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» переданы опытно-промышленные образцы катанки, изготовленные методом Мульти-РКУП-Конформ из сплава АВЕ системы Al-Mg-Si. Образцы катанки диаметром 9.5 мм длиной до 2 м в количестве 5 шт.

В результате проверки установлено:

Опытно-промышленные образцы катанки имеют следующие характеристики:

а/ диаметр 9.5мм ± 0.4 мм и длину до 2 м;

б/ временное сопротивление на разрыв (предел прочности) 268 ± 10 МПа;

в/ относительное удлинение – не менее 11 %;

г/ удельное электрическое сопротивление (электропроводимость) 0.03186 Ом·мм<sup>2</sup>/м (54.1 % IACS).

Структура проволоки из сплава АВЕ состоит из вытянутых, преимущественно нерекристаллизованных зерен/волокон, содержащих развитую ячеистую дислокационную структуру и тонкодисперсные выделения упрочняющей метастабильной фазы β".

Выводы:

Опытно-промышленные образцы катанки, изготовленные методом Мульти-РКУП-Конформ, из алюминиевого сплава АВЕ диаметром 9.5 мм, имеют значения прочности выше в два раза, значения электропроводимости выше на 8 % по сравнению с техническими характеристиками ГОСТ 20967-75. Значения пластичности соответствуют требованиям ГОСТ 20967-75.

От ФГБОУ ВО «УГАТУ»:

От АО «Цветлит»:

В.н.с.  Г.И. Рааб

Вед. Инженер 

С.н.с.  М.Ю. Мурашкин

Гл. технолог 

М.н.с.  Э.И. Фахретдинова