

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

ВО ФАН ТХАНЬ ДАТ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
СОСТАВНЫХ ЗАГОТОВОК АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА РС-356 И
ТИТАНА ВТ1-0 ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ**

Специальность: 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением»

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д. т. н., с.н.с

Бурлаков Игорь Андреевич

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	15
1.1. Составные заготовки в производстве	15
1.2. Методы получения осесимметричных составных заготовок	16
1.2.1. Осадка цилиндрических заготовок	16
1.2.2. Осадка с кручением	18
1.3. Способы получения заготовок методом 3Д-печати	21
1.4. Методы определения энергосиловых параметров.....	22
1.4.1. Определение силовых параметров	23
1.4.2. Расчет силовых параметров	28
1.4.3. Определение температурных параметров	29
Выводы по 1 главе.....	34
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	35
2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов.....	35
2.1.1. Алюминиевый сплавы РС-356.....	35
2.1.2. Титан BT1-0	36
2.2.1. Методика получения заготовок из сплава РС-356	37
2.2.2. Методика проведения металлографических исследований	39
2.2.3. Методика определения шероховатости поверхности	40
2.2.4. Методика определения микротвердости	40
2.2.5. Испытания на сжатие	41
2.2.6. Метод осадки с кручением.....	42
2.2.7. Методы определения энергосиловых параметров и перемещений.	45
2.2.8. Методы моделирования процессов пластического формообразования	47
2.2.9. Исследования энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356.....	50
2.2.10. Методы получения составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356	51
2.2.11. Методы получения составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0	52
Выводы по 2 главе.....	54

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	55
3.1. Разработка реологической модели алюминиевого сплава РС-356	55
3.2. Расчет теплового эффекта при пластической деформации.	66
3.3. Расчет энергетических затрат при осадке заготовок из алюминиевого сплава РС-356 без кручения и с кручением	72
3.4. Моделирование процесса осадки составных изделий из алюминиевого сплава РС-356.	74
3.5. Моделирование процесса осадки с кручением составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0	78
Выводы по 3 главе.....	80
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	81
4.1. Получение индикаторных диаграмм алюминиевого сплава РС-356..	81
4.2. Изучение изменения структур при пластической деформации заготовок из алюминиевого сплава РС-356.....	82
4.3. Исследование энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356	85
4.4. Получение составных изделий из алюминиевого сплава РС-356.....	87
4.5. Изготовление составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0	88
Выводы по 4 главе.....	89
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЕТОВ	91
5.1. Анализ реологических моделей алюминиевого сплава РС-356.....	91
5.2. Изучение структурообразования при пластической деформации заготовок из алюминиевого сплава РС-356.....	100
5.3. Изучение энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356	102
5.4. Отработка процесса получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356.	105
5.5. Отработка процесса получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0	109
Вывод по 5 главе	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ	127

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

№	Обозначение	Наименование переменной/сокращения
1	ε	величина деформации
2	$\dot{\varepsilon}$	скорость деформации, 1/с
3	σ_B	предел прочности, МПа
4	σ_S	предел текучести, МПа
5	δ	относительное удлинение, %
6	k	напряжение сдвига, МПа
7	$F_{деф}$	сила деформации, Н
8	R^2	Коэффициент детерминации
9	S	средняя абсолютная ошибка, %
10	w	Механическая энергия, Дж
11	C	массовая теплоемкость, Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
12	α	доля накопленной энергии
13	ОМД	обработка металлов давлением
14	SLM	селективное лазерное плавление
15	НВ	твердость по Бринеллю
16	HV	твердость по Виккерсу
17	ЭДС	электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности, включая автомобиле-, авиа-, ракетно- и судостроение, активно применяют составные заготовки, в том числе биметаллические. Этот подход позволяет создавать облегченные и экономически выгодные детали методами обработки давлением.

Существует несколько технологий соединения составных заготовок, таких как лазерная сварка, электронно-лучевая, электродная сварка, сварка трением с перемешиванием и другие. У каждого из этих методов есть как достоинства, так и недостатки.

В ряде случаев для создания составных заготовок применяют сочетание двух различных процессов — штамповки и литья. При этом жидкий металл заполняет форму, что повышает производительность и позволяет получать изделия сложной геометрии. В процессе застывания металла осуществляется штамповка, исключая появление усадочных дефектов и пористости. Такой подход сокращает время кристаллизации, что позволяет формировать структуру с мелкими зёрнами и улучшить механические свойства материала по сравнению с литыми аналогами.

Существует несколько вариантов данного метода. Например, один из них предполагает последовательное выполнение процессов литья и штамповки, что применяется при изготовлении поршней для судовых двигателей. Это позволяет снизить массу изделий, улучшая их эксплуатационные характеристики. Технология включает отливку заготовки с последующей финальной штамповкой, что значительно повышает прочностные свойства металла. Такой метод дает возможность разрабатывать облегченные конструкции поршней, а их верхнюю часть выполнять из особо прочного материала. В ходе процесса к верхней части поршня приваривается пластина из никелевого сплава, что способствует увеличению давления и температуры в цилиндрах двигателя и снижению расхода топлива.

Исследования показывают, что составные заготовки, изготовленные перечисленными способами, в ряде случаев обладают пониженной пластичностью по сравнению с отдельными материалами. Помимо этого, данные методы характеризуются высокой трудоемкостью, а деформация сваренных заготовок нередко вызывает смещение сварного соединения и локализацию зоны деформации при вытяжке.

Развитие современного машиностроения невозможно без постоянного совершенствования производственных процессов, в том числе и процесса осадки металла. Осадка с кручением является перспективным процессом в машиностроении. Энергосиловые параметры являются ключевыми факторами для создания рационального процесса и обеспечения высококачественной продукции.

Энергосиловые параметры процесса обработки металлов при осадке с кручением являются важным аспектом исследования этого процесса [1]. Они определяют, какое количество энергии требуется для реализации процесса формообразования вращающимся инструментом [1], а также какие силы действуют на материал во время его обработки.

Одним из основных энергосиловых параметров являются силы [2], действующие на материал во время осадки с кручением и оказывающие значительное влияние на процесс обработки металла.

Важную роль в процессе деформации играет температура заготовки материалов, которая зависит от свойств материала и характеристик процесса деформации [3]. При деформации материалов их температура повышается в результате преобразования механической работы при формообразовании заготовок и трения между их поверхностями и инструментом в тепло [4]. Это может приводить к изменению микроструктуры материала и его свойств, включая прочность и твердость.

Однако повышение температуры может быть желательным, поскольку это может снижать сопротивление материала деформации и повышать его пластичность, что особенно важно при деформации материалов с высокой

прочностью. С другой стороны, слишком высокая температура может приводить к излишней пластической деформации, что может привести к разрушению материала в процессе его деформации до необходимых размеров и формы. Поэтому, рациональная температура для деформации материалов должна быть выбрана с учетом свойств материала, условий процесса и требуемого качества готовой детали.

Исследование энергосиловых параметров процесса осадки с кручением позволяет определить рациональные параметры для получения продукта высокого качества и снижения затрат на производство. Это делает технологию обработки металлов более эффективной и экономически выгодной [5, 6].

В процессе осадки металла с кручением необходимо установить энергосиловые и температурные параметры, чтобы гарантировать эффективное и стабильное производство заготовок. Энергосиловые параметры являются ключевыми факторами, необходимыми для разработки рационального процесса, обеспечивающего получение высококачественной продукции. Существует множество методов определения этих параметров, которые могут быть использованы в зависимости от типа металла, производственной технологии и требуемой точности изделий. В данной работе необходимо было определить наиболее подходящие методы для достижения рациональных результатов и обеспечения высокой производительности процесса осадки металла с кручением.

В процессе обработки металлов давлением происходит взаимодействие инструмента с заготовкой, которое придает ей необходимую форму. Качество получаемой заготовки кардинально зависит от воздействующих факторов и, в первую очередь, от температурно-скоростных и силовых режимов обработки, индивидуальных для каждого материала.

В машиностроении широко используются биметаллические изделия, которые обладают повышенной стойкостью к высоким температурам и коррозии. Для достижения этого эффекта могут применяться составные изделия, состоящие, например, из титана, обладающего низкой

теплопроводностью, и сплава с высокой устойчивостью к коррозии, такого как алюминий. Титан, наряду с такими положительными качествами как малая плотность и высокая коррозионная стойкость, обладает низкой теплопроводностью 21,9 Вт/м·К. Этот недостаток возможно минимизировать путем его плакирования материалами с высокой теплопроводностью и малой плотностью, например, алюминием (203,5 Вт/м·К), теплопроводность которого на порядок выше, чем у титана. Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что отсутствуют данные по изготовлению составных изделий из несвариваемых между собой материалов - алюминиевого сплава РС-356 (ТУ 24.42.00-002-44669951-2019, ГОСТ Р 71758-2024) и технического титана марки ВТ1-0 по ОСТ 1 90012-81, ГОСТ 19807-91 (далее титана ВТ1-0) методом осадки с кручением на угол не более 180 градусов. Решение этой задачи определяет актуальность настоящей диссертационной работы.

Целью диссертационной работы.

Разработать технологический процесс получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 с применением осадки с кручением при вращении верхнего бойка на малый угол с исследованием энергосиловых параметров процесса и изучения структуры материала.

При выполнении работы решались следующие задачи:

1. Построить «изотермические» кривые текучести алюминиевого сплава РС-356 в зависимости от термомеханических параметров (температуры, скорости и величины деформации) с использованием уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю коэффициентами.

2. Исследовать энергосиловые параметры процесса формообразования заготовок алюминиевого сплава РС-356 осадкой с кручением с применением конечно-элементных методов моделирования с использованием пакета программного обеспечения QForm.

3. Оработать технологические режимы получения составных изделий из заготовок из алюминиевого сплава РС-356 методом осадки с кручением.

4. Определить технологические режимы получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 с титаном ВТ1-0, включая температуру, величину деформации, скорость деформации и угол вращения верхнего бойка.

5. Разработать технологический процесс получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 и оценить качество соединения.

Объект исследования: осадка с кручением с величиной поворота бойка до 180 градусов при различных термомеханических параметрах.

Предмет исследования: энергосиловые характеристики процесса осадки с кручением при изготовлении составных изделий диаметром до 100 мм и их металлографические исследования.

Научная новизна работы:

1. Впервые определены реологические модели алюминиевого сплава РС-356 на основе уравнений с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами, предложенных Хензелем–Шпиттелем. Построены кривые «напряжение-деформация» с различными параметрами термомеханических режимов (температуры, скорости деформации, величины деформации и угла поворота бойка). Показано, что использование найденных моделей в компьютерной программе QForm обеспечивает точность моделирования процессов обработки давлением в диапазоне температур 20-450 °С для сплава РС-356 и 20-550°С для титана ВТ1-0 и скоростей деформации 0,001; 0,01 и 0,4 сек⁻¹.

2. Определены силовые, скоростные и температурные параметры и угол вращения бойка, обеспечивающие формообразование составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 так и с титаном ВТ1-0.

3. Разработан технологический процесс получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 с оценкой качества соединения металлографическими исследованиями.

Теоретическая значимость работы

1. Получены зависимости напряжения текучести от величины деформации алюминиевого сплава РС-356 на основе уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9 и 5 неизвестными коэффициентами. Определены реологические модели для моделирования процессов холодной и горячей обработки металлов давлением, в том числе составных изделий, а также пополнить базу деформируемых материалов в расчетных компьютерных программах, предназначенных для моделирования процессов обработки металлов давлением. Найдено, что для моделирования процесса деформации алюминиевого сплава РС-356 в интервале температуры 20-450 °С необходимо применять реологическую модель с 9-ю коэффициентами, а модель с 5-ю коэффициентами применять для процессов холодной деформации заготовок.

2. Получены зависимости, позволяющие оценивать влияние величины деформации на увеличение температуры заготовок из алюминиевого сплава РС-356 в температурном диапазоне 20-450 °С при скоростях деформации 0,001; 0,01 и 0,4 сек⁻¹.

3. Определено влияние термомеханических режимов на энергосиловые параметры процесса формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356 осадкой с кручением на малым углом.

Практическая значимость работы

1. Впервые полученная реологическая модель алюминиевого сплава РС-356, используемая в комплексной программе QForm, позволила определить энергосиловые параметры процесса, корректность которых была подтверждена экспериментальными результатами.

2. На основе анализа результатов металлографических исследований составных изделий до и после осадки с кручением в зависимости от температурно-скоростных параметров разработаны научно-обоснованные режимы холодной и горячей деформации с кручением осесимметричных заготовок для получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356,

что подтверждено результатами исследования микроструктуры и микротвердости.

3. Впервые получены составные изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0, пригодные для последующей обработки методом горячей штамповки. Это обеспечило возможность изготовления биметаллических изделий, в том числе деталей типа «диск биметаллический» и разработать технологический процесс для их производства.

Методы исследования.

Теоретические исследования опирались на фундаментальные положения теории пластичности, технологии машиностроения теоретической механики и сопротивления материалов. Для анализа процесса формообразования использовались методы математического моделирования, в том числе метод конечных элементов, реализованный в инженерном программном комплексе QForm, который обеспечил возможность численного анализа напряжённо-деформированного состояния заготовок при осадке с кручением.

Обработка экспериментальных данных, а также построение диаграмм «напряжение–деформация» проводились с использованием программной среды MATLAB. Это позволило выполнять точную аппроксимацию экспериментальных зависимостей и определять параметры моделей Хензеля–Шпиттеля с различным числом переменных, применяемых для описания термомеханического поведения материала.

Экспериментальные исследования проводились с использованием исследовательского и технологического оборудования. В качестве основного технологического устройства применялся гидравлический пресс модели «ДБ-2432», предназначенный для выполнения осадки с кручением; микроструктурный анализ материалов осуществлялся с помощью оптического микроскопа «Olympus Delta» и сканирующего электронного микроскопа «FEI QUANTA 650»; для определения реологических характеристик алюминиевого сплава РС-356 использовались испытательные машины моделей «LFM250» и

«LFM50»; измерения микротвердости образцов проводились на приборе «DuraScan 20», а нагрев заготовок и инструмента обеспечивался электрической печью модели «СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1». Формообразование составных изделий осуществляли за одну непрерывную операцию, включающую на первом этапе осадку без кручения на величину 40- 50%, затем осадка с вращением верхнего бойка до 180 градусов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости напряжения текучести алюминиевого сплава РС-356 от величины деформации, скорости деформации и температуры, аппроксимированные с использованием уравнений Хензеля–Шпиттеля с 9-ю и 5-ю коэффициентами в диапазонах температур 20-300 °С и 400-450 °С с постоянными скоростями деформации 0,001; 0,01 и 0,4 с⁻¹.

2. Влияние термомеханических режимов (температуры, скорости деформации, угла поворота бойка) на энергосиловые характеристики процесса осадки с кручением заготовок из алюминиевого сплава РС-356. Показано, что при углах поворота бойка до 144° наблюдаются закономерные изменения силы осадки и момента кручения, что позволяет оптимизировать условия деформирования с целью повышения однородности структуры и снижения энергозатрат.

3. Режимы осадки с кручением осесимметричных заготовок, позволяющие получать составные изделия из алюминиевого сплава РС-356.

4. Технологический процесс получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 методом осадки с кручением с углами поворота бойка до 108 градусов.

Достоверность результатов диссертационной работы,
подтверждается использованием испытательного и металлографического оборудования и анализа результатов численного моделирования с применением современных конечно-элементных методов. Достоверность результатов моделирования подтверждаются экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены, обсуждены и получили положительную оценку на следующих научно-технических конференциях:

- V Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт – Петербург – 2022);
- V Международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (Санкт – Петербург – 2022);
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», приуроченной к 65-летию доктора технических наук, профессора Яковлева С.С. (Тула – 2022);
- Международная научно-исследовательская конференция «СМИС-2023. Технологии управления качеством» (Москва – 2023);
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула – 2023).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 12 печатных работах. Из них 9 статей опубликованы в рецензируемых журналах, в том числе 7 в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Web of Science, и 1 статья в зарубежном журнале с квартилем Q2.

Личный вклад автора. Диссертант самостоятельно выполнил основную экспериментальную часть работы, принимал активное участие в постановке цели и задач исследования, анализе и обработке полученных данных, интерпретации результатов. Автор также участвовал в подготовке публикаций и представлении наиболее значимых научных достижений на профильных конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы из 93 наименований. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, в том числе 83 рисунка, 10 таблиц, 3 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1. Составные заготовки в производстве

Составные заготовки (гибридные заготовки) – это заготовки, которые объединяют в себе два или несколько различных материалов или технологий производства для достижения оптимальных характеристик прочности, веса, износостойкости и других параметров [7].

С развитием машиностроения, особенно в области авиастроения, требования к проектированию и производству составных заготовок значительно возросли [8]. Это обусловлено несколькими ключевыми факторами:

1. **Применение композитных материалов:** Современные летательные аппараты всё чаще изготавливаются с использованием композитных материалов, таких как углепластики. Это позволяет снизить массу конструкции до 30%, сохраняя при этом высокую прочность и надёжность. Например, в самолёте Airbus A350 около 52% массы приходится на композитные материалы, что способствует снижению расхода топлива и увеличению дальности полёта.

2. **Стандартизация и спецификации:** для обеспечения единого подхода к технической документации в авиастроении применяется спецификация ASD S1000D. Она регламентирует состав и структуру данных для формирования конструкторских и иных технических документов, что обеспечивает совместимость и стандартизацию информации между различными участниками производственного процесса.

3. **Компоновка летательных аппаратов:** Процесс компоновки включает в себя обоснование формы летательного аппарата, взаимное расположение его составных частей, агрегатов, систем и узлов. Это определяет их взаимодействие и функционирование на всех этапах эксплуатации, что критически важно для обеспечения аэродинамических характеристик и общей эффективности конструкции.

4. Использование современных сплавов: В производстве авиационных деталей широко применяются алюминиевые и титановые сплавы. Эти материалы обладают высокой прочностью при относительно низкой массе, что делает их идеальными для авиационных конструкций. Например, алюминиевые сплавы с легирующими добавками, такими как цинк, медь и литий, позволяют достигать необходимых механических свойств после соответствующей термической обработки. [9]

5. Автоматизация проектирования: Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяют создавать точные модели деталей и узлов, оптимизировать производственные процессы и сокращать время разработки. Это особенно важно в авиастроении, где требуется высокая точность и надёжность каждой составной части.

Таким образом, современные требования к проектированию и производству составных заготовок в авиастроении направлены на повышение эффективности, надёжности и безопасности летательных аппаратов, что достигается за счёт применения инновационных материалов, стандартизации процессов и внедрения передовых технологий проектирования.

1.2. Методы получения осесимметричных составных заготовок

Для получения неразъёмных соединений применяют различные методы. Это диффузионная сварка, сварка трением [10, 11], ротационная сварка, электродная сварка [12, 13], сварка лазерным лучом [14, 15], диффузионная пайка, сварка плавлением и др. [16]. Однако их применение ограничено необходимостью нагрева заготовок до температур, близких к температурам плавления. Поэтому одним из перспективных методов соединения является процесс осадки.

1.2.1. Осадка цилиндрических заготовок

Осадка – это ключевой процесс кузнечной обработки, при котором происходит увеличение поперечного сечения заготовки за счёт уменьшения её

высоты (рисунок 1.1) [17, 6, 18]. В ходе данного процесса заготовка располагается вертикально, а деформация осуществляется вдоль её оси.

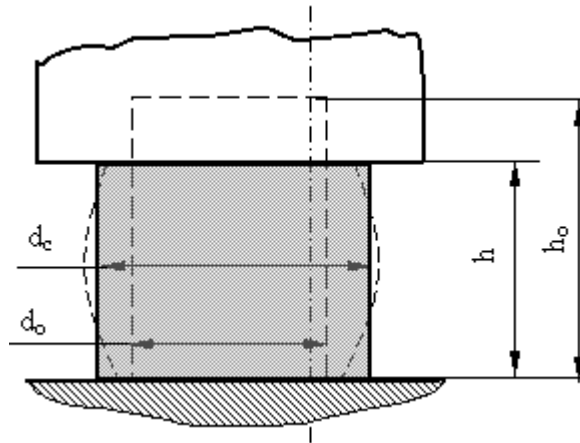


Рисунок 1.1 – Осадка цилиндрических заготовок

При отношении исходной высоты заготовки к ее диаметральному размеру (h_0/d_0) больше 2,5...3,0 осадка невозможна из-за продольного изгиба заготовки [17]. Величина деформации при осадке определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0}, \quad (1.1)$$

где h_0 – высота заготовки до осадки; h – высота заготовки после осадки.

Средний диаметр заготовки круглого сечения по высоте вычисляется на основе условия сохранения объёма и определяется следующим уравнением:

$$d_c = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}}, \quad (1.2)$$

где d_0 – исходный диаметр заготовки до деформации.

Осадку между плоскими бойками (рисунок 1.2) применяют при изготовлении поковок в виде дисков и цилиндров перед прошивкой.

Напряжённое состояние металла при осадке цилиндрических заготовок на плоских плитах в первую очередь зависит от условий внешнего трения, геометрической формы заготовки, выраженной через отношение высоты к диаметру (H/D). Эти параметры совместно формируют граничные условия процесса деформации. [18]

При отсутствии внешнего трения или при его незначительных значениях напряжённое состояние металла при осадке описывается схемой линейного сжатия (рисунок 1.2а). Однако при наличии внешнего трения распределение напряжений в различных зонах поковки становится неоднородным и существенно зависит от геометрической формы заготовки (рисунок 1.2б, в).

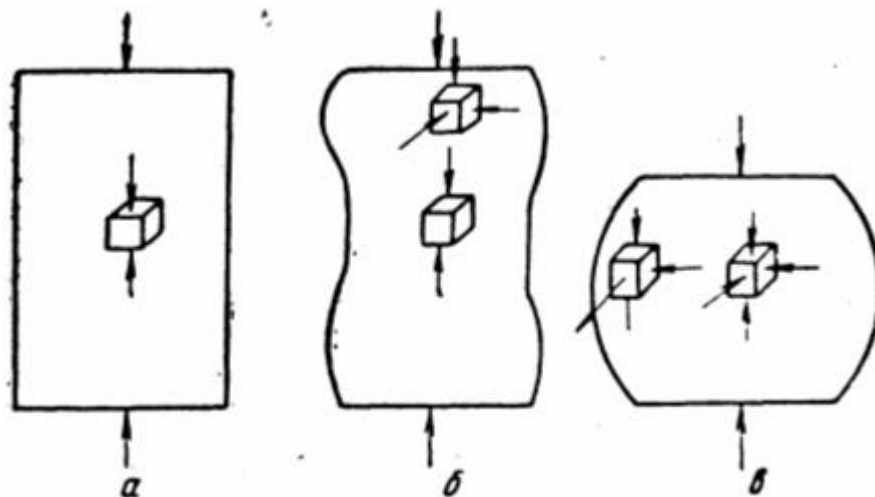


Рисунок 1.2 – Схемы напряжений при осадке цилиндрических заготовок:

а - равномерная осадка; б - неравномерная осадка при $\frac{H_0}{D_0} = 2$; в -
неравномерная осадка при $\frac{H_0}{D_0} = 1$.

Схема объемного сжатия формируется под воздействием сил внешнего трения. Однако при осадке заготовок с большой высотой влияние этих сил постепенно ослабевает по мере удаления от контактных поверхностей, что объясняется принципом Сен-Венана. В результате в центральной части высоких заготовок преобладает схема линейного напряжённого состояния [19].

1.2.2. Осадка с кручением

В настоящее время проводятся исследования с целью разработки новых методов, которые позволяют уменьшить силу формообразования и обеспечить более равномерную деформацию путем эффективного использования трения при штамповке. Один из таких методов - осадка с кручением [20] .

Технология осадки с кручением представляет собой современный и перспективный метод обработки материалов [21]. Процесс реализуется на специализированных установках, где инструмент сочетает поступательное движение (осадку) с вращательным (кручением). В зависимости от конструкции оборудования, такие прессы могут быть выполнены в различных конфигурациях, включая установки для торцевой раскатки с вращением и качением бойка [22]. При вращении нижнего инструмента, вращающегося вместе с заготовкой (рисунок 1.3), обеспечиваются синхронность движения и заданные характеристики вращения [23, 24, 25, 26, 27, 21].

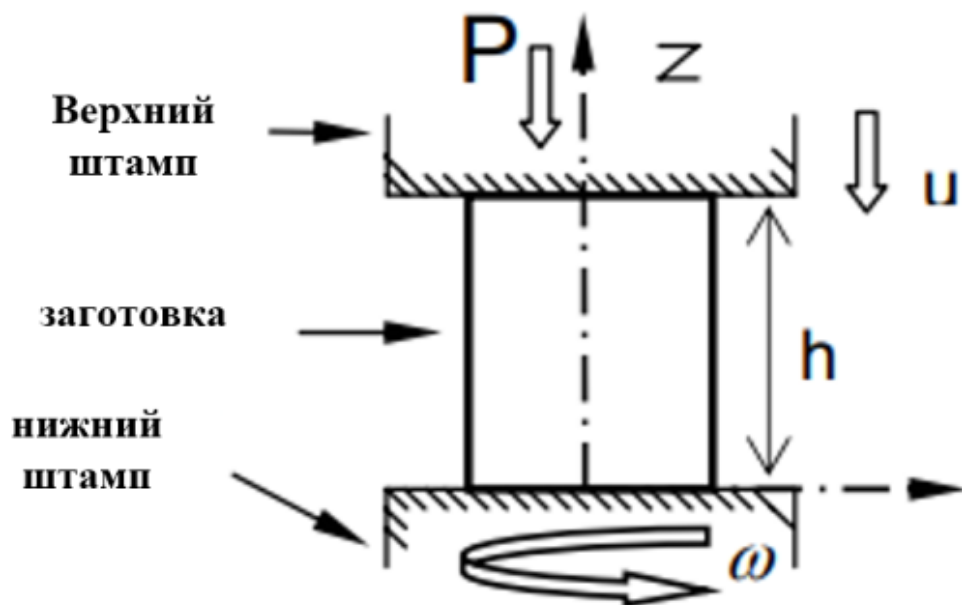


Рисунок 1.3 – Схема прессы с нижней вращающейся бойкой

В процессе осадки с кручением истинная деформация равна [28]

$$e = \frac{1}{H_0} \int \sqrt{V^2 + \frac{R_0^2 \dot{\omega}^2}{3}} dt \quad (1.3)$$

где H_0 – высота образца, V – скорость перемещения инструмента, R_0 – исходный радиус образца, r – радиус образца, $\dot{\omega}$ – угловая скорость

Интегрирование уравнения (1.3) приводит к формуле:

$$e = \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3}} - \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3(1+e_a)}} + \ln(1+e_a) + \ln \frac{1 + \frac{\theta^2}{6(1+e_a)} + \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3(1+e_a)}}}{1 + \frac{\theta^2}{6} + \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3}}} \quad (1.4)$$

где t - время осадки, $\theta = \frac{R_0 \cdot \dot{\omega}}{V}$ - поворотная компонента деформации, $e_a = \frac{V \cdot t}{H_0 e}$ - аксиальная компонента деформации [29].

Ось вращения верхнего бойка совпадает с продольной осью заготовки. При деформировании за счёт трения на контактной поверхности от бойка к заготовке передаётся вращательный момент, вызывающий её закручивание. В зависимости от состояния поверхностей (шероховатости) между инструментом и заготовкой может происходить как полное сцепление, так и частичное проскальзывание. Металлографический анализ показывает, что после обработки обеспечивается практически полная (до 100 %) сварка составных заготовок, что говорит о высокой эффективности метода. В отечественных исследованиях рассматриваются различные аспекты осадки с кручением, включая расчёт сил, определение кинематических параметров и анализ теплообмена [29].

Процесс штамповки с кручением имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами пластической деформации:

- Повышенная точность формообразования: за счёт комбинированного действия давления и кручения металл равномернее заполняет форму, что улучшает точность геометрии изделия и повышает качество его поверхности.
- Снижение сил деформации: штамповка с кручением снижает силы, необходимые для деформации заготовки, поскольку материал подвергается сдвиговым нагрузкам, которые требуют меньшего давления по сравнению с традиционными методами. Это позволяет использовать менее мощное оборудование и повышать производительность.

- Улучшение структуры материала: в процессе деформации с кручением структура материала упрочняется, выравнивается зерно, улучшаются прочностные характеристики и износостойкость готовой детали.
- Снижение износа инструмента: плавное течение металла и снижение пиковых нагрузок уменьшают трение между заготовкой и инструментом, что в свою очередь снижает износ штампов и увеличивает их срок службы.
- Улучшенное заполнение полости штампа: кручение способствует лучшему перемещению металла в труднодоступные участки формы, что особенно важно при производстве деталей со сложной геометрией, и снижает вероятность образования дефектов.
- Экономия материала: благодаря высокой точности и хорошему заполнению формы уменьшаются припуски на последующую обработку, что снижает расход материала.

В работах [30, 31] представлено теоретическое обоснование эффективности процесса осесимметричной осадки с применением кручения. Одним из актуальных и многообещающих направлений считается деформация заготовок с одновременным воздействием кручения и ступенчатого нагрева, что способствует более равномерному измельчению микроструктуры, а также улучшению микротвердости и прочности обрабатываемого материала [32].

1.3. Способы получения заготовок методом 3Д-печати

3D-печать металлами позволяет производить изделия практически из любых сплавов, что является главным достоинством этой технологии [33]. Самым современным и распространенным способом использования металлических порошков в 3Д-принтерах является селективное лазерное плавление (SLM).

Технология SLM — это метод аддитивного производства, при котором изделия из металла создаются путём послойного плавления металлического порошка с использованием мощного лазерного излучения. В процессе печати каждый слой порошка полностью расплавляется в заданных участках в

соответствии с 3D-моделью, что позволяет формировать плотные, прочные и сложные по геометрии детали без использования традиционных форм или оснастки [34, 33].

Установки SLM (Selective Laser Melting) позволяют эффективно решать сложные производственные задачи за счёт высокой точности, возможности создания изделий сложной формы и минимизации отходов материала. Благодаря послойному построению деталей из металлического порошка, SLM обеспечивает изготовление компонентов с высокой плотностью и прочностными характеристиками, которые сопоставимы или превосходят традиционно полученные изделия. Это особенно важно при производстве уникальных или малосерийных деталей, в том числе с внутренними каналами, решётчатыми структурами или интегрированными функциями, что затруднительно или невозможно реализовать другими методами.

Осадка порошковых заготовок

Из-за 10-20% пористости в изделиях из порошковых металлов, они обладают более низкими пластичностью, усталостной и ударной прочностью, что ограничивает их размеры и область применения. При штамповке порошковых заготовок, полученных спеканием, они подвергается процессу пластической деформации, что позволяет увеличить плотность материала и повысить его механические свойства. Благодаря этим преимуществам метод штамповки порошковых материалов рассматривается как альтернатива для изготовления деталей, применяемых в автомобилях и самолетах.

1.4. Методы определения энергосиловых параметров

В области машиностроения и обработки металлов давлением (ОМД) энергосиловые и температурные параметры играют важную роль. Энергосиловые параметры, такие как сила давления, работа деформации и предел текучести, связаны с силами при формообразовании металла. Температурные параметры существенно влияют на качество заготовок, предотвращая нежелательные деформации и обеспечивая нужные свойства и структуру материала. Определение и контроль этих параметров играют

ключевую роль в достижении оптимальных параметров обработки металлов давлением, обеспечивая высокое качество, точность изделий, а также повышение производительности и экономической эффективности процесса.

1.4.1. Определение силовых параметров

При разработке технологического процесса штамповки необходимо с достаточной точностью определить силы деформации. Это позволяет произвести правильный выбор оборудования, определить силовые параметры штамповки, которые обеспечивают бездефектное изготовление изделий. Расчет силовых параметров необходим также при проектировании технологической оснастки и при создании нового штамповочного оборудования [35].

Существует несколько методов определения силовых параметров в обработке металлов давлением (ОМД), включая:

1. **Метод прямого измерения силы** - этот метод основан на использовании силовых датчиков, которые позволяют непосредственно измерять силу, действующую на обрабатываемую заготовку. Для этого на машине ОМД устанавливаются специальные датчики, которые могут быть электрическими, механическими или гидравлическими. Эти датчики позволяют получить точные данные о силе, нагружающей инструмент, и применяются в основном в исследовательских лабораториях для научных исследований [36];

2. **Метод определения силы по деформации** - этот метод основан на использовании закона Гука, который связывает напряжение и деформацию материала. Измерение деформации производится при помощи датчиков деформации, установленных на обрабатываемой заготовке. После измерения деформации можно определить силу, действующую на инструмент [36];

3. **Метод конечно-элементного моделирования (КЭМ)** - этот метод основан на использовании компьютерных программ, которые позволяют моделировать процесс ОМД и определять силовые параметры. Моделирование процесса ОМД производится на основе математических

моделей, которые учитывают множество факторов, таких как форма инструмента, марка металла и др. КЭМ позволяет получить точные данные о силовых параметрах [37].

На практике из этих методов определения сил самым рациональным является методом применения силовых датчиков.

Тензометрический датчик (датчик силы), согласно п. 2.1.2 ГОСТ 8.631-2013, представляет собой устройство, реагирующее на изменение величины физического воздействия (силы) и преобразующее его в электрический сигнал [38]. По сути, это резистор, изменяющий свое омическое сопротивление в зависимости от приложенной силы. В зависимости от области применения используются различные типы тензометрических устройств, отличающиеся как принципом работы, так и конструктивными особенностями.

Виды датчиков

Тензометрические датчики классифицируются как по форме, так и по конструктивным особенностям, зависящим от типа чувствительного элемента. Выделяют следующие виды датчиков (рисунок 1.4): фольговые, плёночные и проволоочные.

Фольговые датчики применяются путем наклеивания на поверхность. Их конструкция включает фольговую ленту толщиной 12 мкм, частично плотную, частично решетчатую. Особенностью данной конструкции является возможность пайки вспомогательных контактов. Эти датчики удобны для эксплуатации при низких температурах [39, 40].

Плёночные датчики схожи по конструкции с фольговыми, но изготавливаются из тензочувствительных плёнок со специальным напылением, повышающим их чувствительность. Они особенно эффективны для измерения динамических нагрузок. В качестве материалов для плёнок используются германий, висмут, титан [38, 41].

Проволоочные датчики способны измерять нагрузки в широком диапазоне — от долей грамма до нескольких тонн. Их называют одноточечными, так как измерение происходит в одной точке, а не на

площади, как у фольговых и плёночных датчиков. Проволочные датчики применяются для контроля процессов растяжения и сжатия [40, 41].

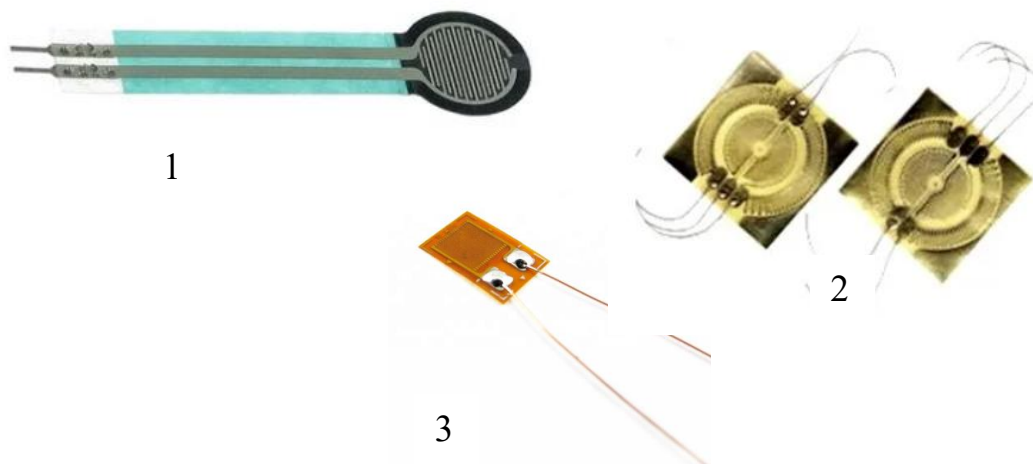


Рисунок 1.4 – Виды тензометрических датчиков

1- Фольговый; 2- Проволочный; 3- Пленочный

Конструкция

В качестве примера рассмотрим наиболее простой тип тензодатчика, в котором тензорезистор является чувствительным элементом. Он представляет собой тонкую упругую проволоку либо пленку, наклеиваемую на измеряемую поверхность [39].

Принцип работы тензорезистора действительно основан на законе Гука, который описывает связь между механическим напряжением и деформацией в пределах упругости материала. Когда на тензорезистор (обычно тонкую металлическую или полупроводниковую полоску) воздействует внешняя сила, он деформируется — растягивается или сжимается. В результате этой деформации изменяется его электрическое сопротивление. Коэффициент пропорциональности определяется формулой [42]:

$$K = \Delta l / l = \Delta R / R, \quad (1.5)$$

Где: K — коэффициент пропорциональности; Δl — изменения длины; l — длина измеряемого элемента в исходном положении; ΔR — изменение сопротивления при деформации; R — значение сопротивления тензорезистора в исходном положении.

На практике это реализуется следующим образом (рисунок 1.5):

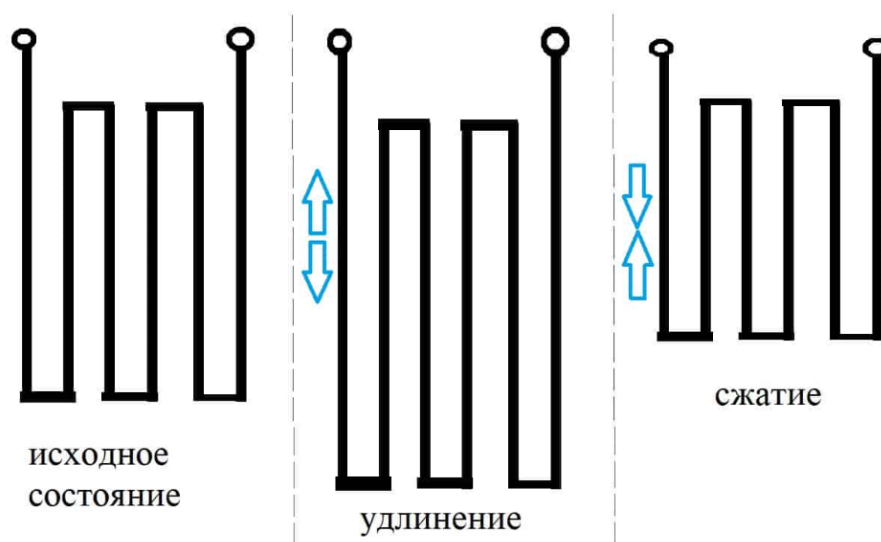


Рисунок 1.5 – Устройство тензорезистора

В состоянии покоя дорожки тензорезистора обладают определённой длиной и площадью поперечного сечения. Электрическое сопротивление резистивного элемента тензодатчика в этом состоянии определяется по следующей формуле [42]:

$$R = (\rho * l) / S, \quad (1.6)$$

Где: R — электрическое сопротивление тензорезистора; l — длина проводника; ρ — удельное сопротивление материала; S — поперечное сечение проводника.

Согласно закону Гука, деформация пропорциональна приложенной нагрузке, а изменение сопротивления в тензорезисторе также пропорционально этой деформации. Таким образом, фиксируя изменения сопротивления, можно измерять механические напряжения или силы, действующие на объект [40]. В результате сопротивление тензодатчика уменьшается, что и составляет основу его принципа работы.

Тензометрический датчик силы работает по принципу моста Уитстона (рисунок 1.6), поэтому подключение датчика аналогично подключению резистивного моста. Это означает, что необходимо обеспечить:

- Питание датчика постоянным или переменным напряжением.
- Усиление выходного напряжения от датчика.

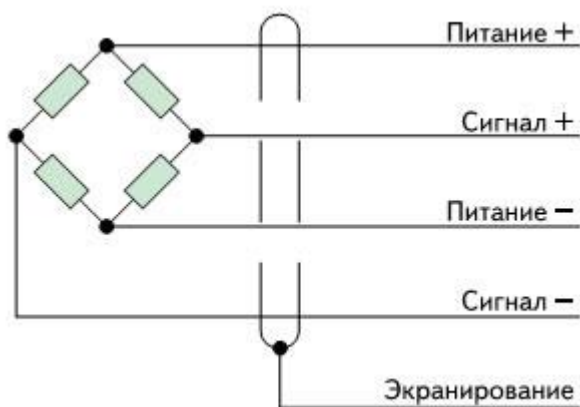


Рисунок 1.6 – Принцип действия тензодатчика

В основе такой схемы лежит электрический мост, состоящий из четырёх резисторов, один или несколько из которых являются тензорезисторами. Когда на датчик действует сила, тензорезисторы деформируются (сжатие и растяжение) (рисунок 1.7), их сопротивление изменяется, и баланс моста нарушается. Это вызывает появление выходного напряжения, пропорционального величине деформации — а значит, и приложенной силе [40].

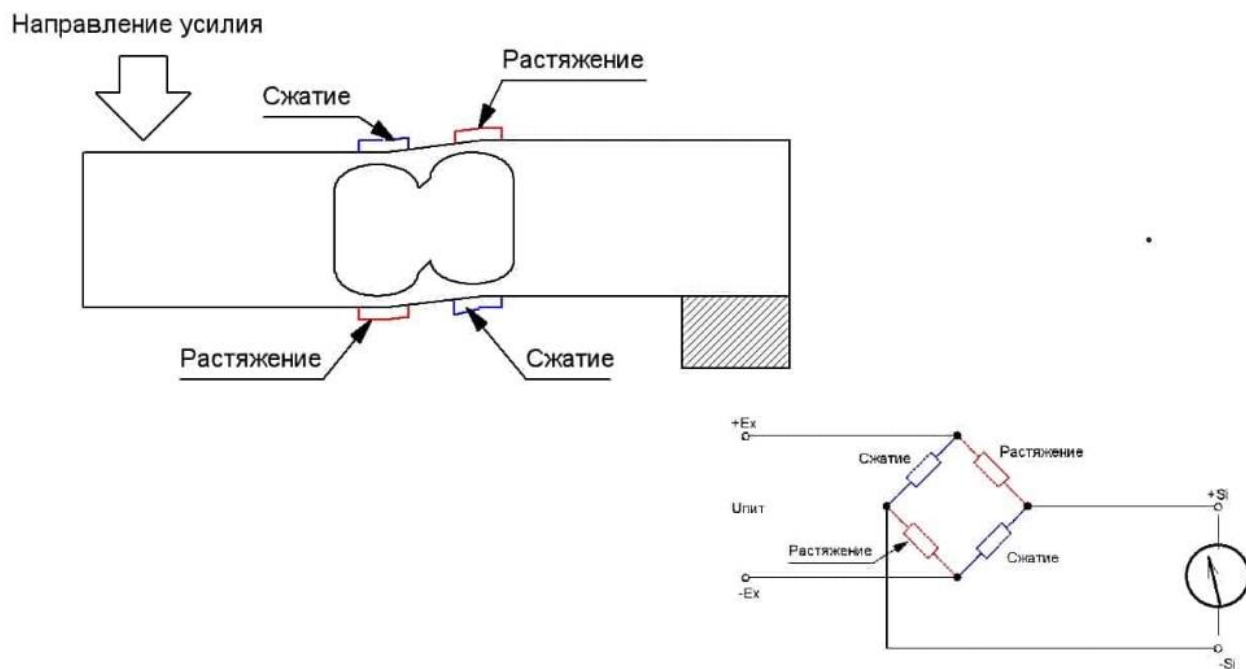


Рисунок 1.7 – Воздействие нагрузки на тензодатчик

Когда два резистора сжимаются, а другие два растягиваются, это вызывает искажение моста, что приводит к появлению сигнала электрической

цепи. В результате через выход тензодатчика начинает протекать электрический ток, что будет отображаться в виде отклонения стрелки гальванометра или изменений на дисплее оборудования, реагирующего на изменение разности потенциалов. Как только механическая нагрузка перестает воздействовать на тензодатчик, гибкая подложка возвращается в исходное состояние, и измерительный мост снова приходит в равновесие [40].

1.4.2. Расчет силовых параметров

Исследование энергосиловых параметров процесса формообразования металл позволяет определить рациональные параметры для получения продукции высокого качества и снижения затрат на производство. Это делает технологию обработки металлов более эффективной и экономически выгодной [5, 6].

В работе [21] рассматривается работа деформации – A при штамповке с кручением, которая состоит из нормальной силы – P и крутящего момента – M .

$$A = \int_{h_1}^{h_2} P dh + \int_0^{\varphi} M d\varphi \quad (1.7)$$

где h – текущая высота образца, φ – угол скручивания.

Так как параметр кручения q и текущая высота h зависят от времени – t , то, исключая время можно получить зависимость $h = f(q)$ и обратную функцию $q = f^{-1}(h)$.

$$A = \int_{q_1}^{q_2} \left[P(q) + M(q) \frac{d\varphi}{dh} \right] f'(q) dq \quad (1.8)$$

Другая работа [43] рассматривает силу комбинированной осадки в зависимости от двух независимых друг от друга факторов β_1 (условие контактного трения) и β_2 (действие внутреннего сдвигового напряжения)

$$P' = P\beta_1\beta_2 \quad (1.9)$$

Где: P – осевая сила обычной осадки;

β_1, β_2 : коэффициенты, отражающие уменьшение осевой силы при комбинированной осадке относительно стандартной;

Коэффициенты β_1 и β_2 показывают, во сколько раз осевая сила комбинированной осадки меньше, чем при традиционной.

Влияние первого фактора (β_1) связано с угловым проскальзыванием инструмента по поверхности заготовки или сдвигом поверхностного слоя металла, контактирующего с инструментом. В результате этого изменяется ориентация вектора касательного напряжения τ , действующего на материал в зоне контакта (рисунок 1.8), что влияет на характер течения металла и снижает сопротивление деформации.

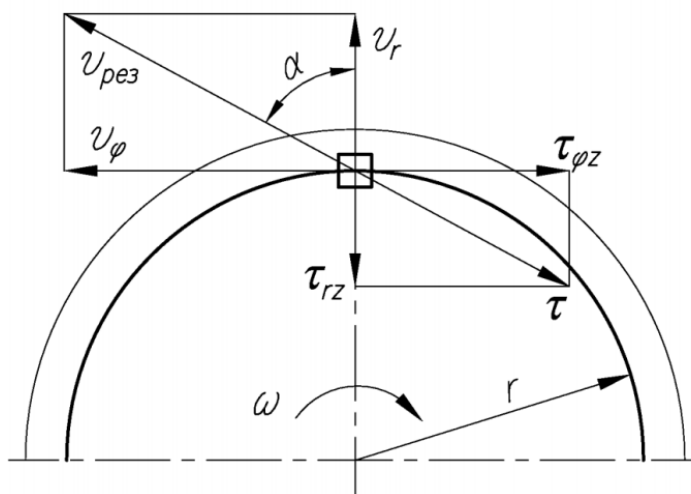


Рисунок 1.8 – Схема поворота вектора касательного напряжения

Фактор β_1 оказывает тем большее влияние на снижение коэффициента трения в радиальном направлении, чем значительнее проскальзывание, выше коэффициент трения μ и больше отношение d/h .

Второй фактор β_2 оказывает влияние на величину напряжения течения σ . Максимальное влияние β_2 на осевую силу ($\sim 0,75$) должно наблюдаться при полном проскальзывании и наибольшем значении коэффициента трения, что является противоречивым. Кроме того, значение β_2 слабо зависит от соотношения скоростей v и ω .

1.4.3. Определение температурных параметров

Определение температуры в обработке металлов давлением может быть выполнено с помощью различных методов, включая:

- Пирометрия - это метод измерения температуры на основе измерения инфракрасного излучения, испускаемого телом. В технологии обработки металлов давлением пирометры, особенно портативные, позволяют оперативно и точно контролировать температурный режим заготовок и инструмента.

- Измерение сопротивления - способ определения температуры, основанный на зависимости электрического сопротивления проводника от температуры. Он обеспечивает высокую точность измерений и применяется при контроле температурного состояния материалов в различных технологических процессах.

- Термометрия с помощью термопар - это метод измерения температуры на основе измерения разности термоэлектрического напряжения между двумя разными металлами, соединенными в точке измерения температуры. Этот метод может быть использован для измерения температур в процессах обработки металлов давлением.

В практике ОМД применение термопар является наиболее простым и удобным методом определения температур.

Термопара – это устройство, предназначенное для измерения температуры в широком диапазоне — от крайне низких до очень высоких значений [44]. Она широко применяется в промышленности, научных исследованиях, медицине, а также в системах автоматического управления. Термопары эффективно используются как в лабораторных условиях, так и в производственных процессах для контроля и регулирования температуры благодаря своей надёжности, простоте конструкции и быстрому отклику. Термопары обладают высокой надёжностью, малой инертностью, универсальностью и отличаются относительно низкой стоимостью. Различные виды термопар способны измерять температуры в диапазоне от -250 до +2500 °С. Однако конструктивные особенности термодатчика не позволяют

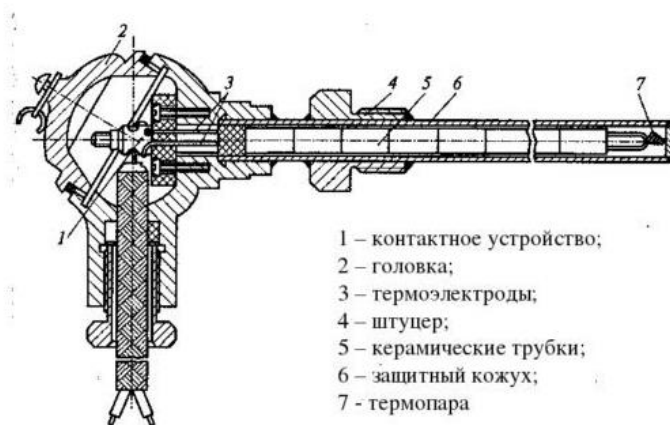
обеспечить высокую точность измерений, и погрешность может достигать 2 °С.

Виды термопар

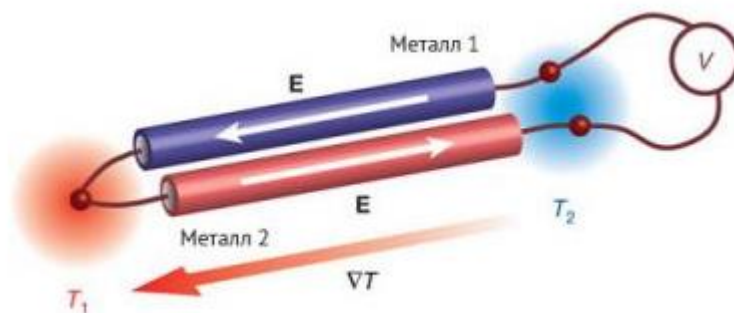
Существует множество различных типов термопар, каждый из которых имеет свои уникальные характеристики и способы применения. Наиболее распространенные типы термопар включают в себя [44, 45]: тип К (хромель-алюмель), тип J (железо-константан), тип Т (медь-константан), тип Е (хромель-константан), тип В (платина-родий), тип R (платина-родий), тип S (платина-родий)

Устройство термопары

Термопара состоит из двух проводников разных металлов, соединенных в одном конце, называемом точкой измерения. Другие концы проводников подключены к измерительному прибору.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Устройство термопары

Внешне такое устройство представляет собой две тонкие проволоки, соединённые сваркой на одном конце, образуя небольшой шарик (рисунок 1.9б). Многие китайские мультиметры комплектуются термопреобразователями, позволяющими измерять температуру различных нагретых элементов устройств. Обычно два проводника заключены в прозрачную стекловолоконную трубку: на одном конце расположен аккуратный сварной шарик, а на другом – разъёмы для подключения к измерительному прибору.

В промышленном оборудовании термодатчики имеют более сложную конструкцию. Их рабочий элемент заключён в металлический корпус в форме зонда (рисунок 1.9а), внутри которого он изолирован керамическими вставками, устойчивыми к высоким температурам и агрессивной среде. Такие термодатчики используются для контроля температуры в технологических процессах на производстве.

Принцип действия

Принцип работы термопары основан на термоэлектрическом эффекте, который также называют эффектом Зеебека [44]. Когда два разных металла соединены в двух точках и эти соединения имеют разные температуры, между ними возникает электрическое напряжение (рисунок 1.10).

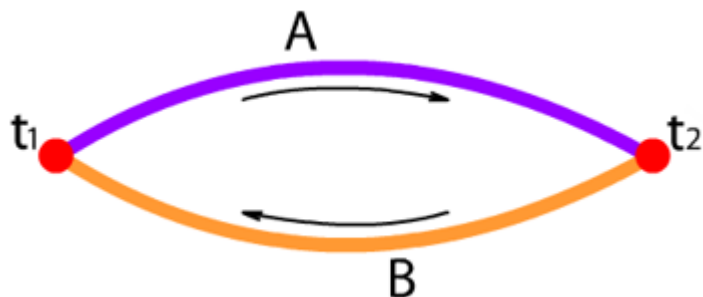


Рисунок 1.10 – Схема принципа работы термопар

где: обозначим температуры: $t_1 > t_2$.

- А — положительный термоэлектрод,
- В — отрицательный термоэлектрод.
- Спай с температурой t_1 называют горячим спаем (рабочим концом), а спай с температурой t_2 — холодным спаем (свободным концом).
- Стрелками показано направление термоэлектрического тока.

Термоэлектрод, по которому ток движется от горячего спая к холодному, условно считается положительным, а тот, по которому ток идет от холодного к горячему, — отрицательным.

Напряжение, вырабатываемое термопарой, зависит от степени нагрева и типа используемых металлов. Его величина небольшая и находится в диапазоне 1–70 микровольт на один градус [45]. Термо-ЭДС определяется по формуле:

$$E = \alpha (T_1 - T_2), \quad (1.7)$$

Где: E — термо-ЭДС, T_1 — температура горячего спая, T_2 — температура холодного спая, α — коэффициент Зеебека

Для измерения абсолютной температуры применяется метод компенсации холодного спая. Его суть заключается в помещении второго перехода (не находящегося в зоне измерения) в среду с образцовой температурой. В современных системах для этого используется вспомогательный температурный датчик, расположенный рядом со вторым переходом. Измерительное устройство получает данные от дополнительного

датчика и корректирует итоговый результат. Это значительно упрощает схему измерения, поскольку термопару, компенсатор и измерительный элемент можно объединить в одном устройстве.

Выводы по 1 главе

1. Представлены методы производства осесимметричных заготовок, применяемые в области машиностроения. Проведен аналитический обзор литературы, где рассматриваются процессы обработки металлов давлением с применением метода осадки, а также метода осадки вращающимся инструментом.

2. Показано, что металлический порошок обладает рядом таких преимуществ, таких как высокая стойкость к износу изделий, высокая точность геометрических форм, что способствует повышению экономической эффективности. Все эти факторы открывают возможности применения металлического порошка, а также порошковых заготовок, в различных отраслях, особенно в машиностроении и автомобилестроении.

3. Показаны существующие методы определения силовых и температурных параметров и их применены в ОМД. Рассмотрены методы определения энергосиловых параметров процессов получения осесимметричных заготовок, в том числе, осадкой с кручением.

4. Проведен аналитический обзор информации о датчиках сил и термопарах, их видов, классификаций, принципов работы и применения в области обработки металлов давлением.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов

В качестве исследуемых материалов были выбраны алюминиевый сплав PC-356 (AlSi7Mg) и титан марки BT1-0. Алюминиевый сплав PC-356 отличается хорошими литейными свойствами, высокой коррозионной стойкостью и пониженной плотностью, что делает его перспективным материалом для различных отраслей машиностроения. Титан BT1-0, в свою очередь, характеризуется высокой прочностью, отличной коррозионной стойкостью и низкой плотностью. Однако существенным недостатком титана является его низкая теплопроводность — порядка 16,76 Вт/(м·К).

Для улучшения теплопроводных характеристик титана возможно его плакирование высокотеплопроводными материалами с низкой плотностью, такими как алюминий (теплопроводность — 155 Вт/(м·К)). Для сравнения, теплопроводность титана примерно в четыре раза ниже, чем у железа, и почти на порядок ниже, чем у алюминия.

2.1.1. Алюминиевые сплавы PC-356

Порошковый алюминиевый сплав PC-356 (AlSi7Mg) — характеризуется отличными литейными качествами и высокой эффективностью в процессе селективного лазерного спекания (SLM) [46, 47]. Данный сплав широко используется как термообрабатываемый алюминиевый сплав, который может быть применен для производства легких функциональных деталей в автомобильной и авиационной промышленности. Он характеризуется высоким отношением прочности к массе, хорошей коррозионной стойкостью и стабильными тепловыми характеристиками, что делает его оптимальным выбором для применения в условиях, где требуется сочетание лёгкости, прочности и термической устойчивости. Химический состав и свойства алюминиевого сплава PC-356 представлены в таблицах 2.1-2.2 [48].

Таблица 2.1 – Химический состав алюминиевого сплава РС-356, мас. %

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	Zn
основа	6,5-7,5	0,25-0,45	0,35	0,15	0,1	0,35	0,1

Таблица 2.2 – Основные физические и механические свойства сплава РС-356

Плотность ρ , кг/м ³	2650
Относительное удлинение δ , %	9,6-14
Температура плавления $T_{пл}$, °C	625
Удельная теплоемкость C , Дж/(кг.град)	917
Теплопроводность λ , Вт/(м.К)	155
Пористость, об. %	0,2
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	290-350
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа	75
Удельное электросопротивление $R \cdot 10^9$, Ом.м	28
Твердость, НВ	110
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	170-220

2.1.2. Титан BT1-0

Титан BT1-0 представляет собой технически чистый титан с минимальным содержанием примесей, обладающий высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью и удовлетворительной пластичностью. Он используется в химической, авиационной и судостроительной промышленности, а также в медицине, благодаря сочетанию низкой плотности и биоинертности. Химический состав BT1-0 регламентируется ГОСТ 19807-91, согласно которому содержание титана составляет не менее 99,3 %, а доля примесей строго ограничена (не более 0,7 % в совокупности), конкретно приведен в таблице 2.3. Свойства его показаны в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Химический состав титана BT1-0, мас. %

Ti	O	N	Fe	H	C	Si
99,3-99,7	0,2	0,04	0,25	0,01	0,07	0,1

Таблица 2.4 – Основные физические и механические свойства титана BT1-0

Плотность ρ , кг/м ³	4505
Твердость, НВ	131-163
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	8,9
Температура плавления $T_{пл}$, °C	1668
Удельная теплоемкость C , Дж/(кг.град)	540
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	300-450
Относительное удлинение δ , %	25-30
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	250-380
Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа	112
Теплопроводность λ , Вт/(м.К)	16,76

2.2. Методы исследования образцов

2.2.1. Методика получения заготовок из сплава PC-356

Для получения исследуемых заготовок из сплава PC-356 был применен 3D-принтер EOS M 290 с использованием технологии SLM (рисунок 2.1). Характеристики принтера приведены в таблице 2.5.

Печать заготовок была выполнена со следующими режимами: мощность лазера 350 Вт, скорость сканирования – 1300 мм/с, межтрековое расстояние 0,19 мм, толщина слоя 0,030 мм, температура подогрева рабочей платформы 35 °C. Скорость построения 7,41 мм³/с.



Рисунок 2.1 - 3D-принтер EOS M 290

Таблице 2.5 – Характеристики 3D-принтер EOS M 290

№	Параметр	Значение
1	Технология печати	SLM
2	Область печати, мм	250 x 250 x 325
3	Материал печати	Металлический порошок
4	Толщина слоя, мм	0,29-0,5
5	Мощность лазера, Вт	200, 400 (опция)
6	Тип лазера	Иттербиевый волоконный лазер
7	Операционные системы	Windows
8	Поддерживаемые форматы файлов	STL (опция — конвертер из всех стандартных форматов)
9	Дисплей	Сенсорный
10	Интерфейс подключения	Ethernet
11	Программное обеспечение	EOS RP Tools/EOSTATE; Magics RP (Materialise)
12	Материал корпуса	Пластик, металл
13	Электропитание, В	8.5кВт (среднее 3.2кВт), 32 А
14	Вес, кг	1250
15	Размеры, мм	2200 x 1070 x 2290
16	Производитель	EOS

2.2.2. Методика проведения металлографических исследований

В процессе пластической деформации происходит изменение структуры материалов [49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. Для оценки микроструктурных изменений были проведены металлографические исследования с использованием оптической и электронной микроскопии. Анализ микроструктуры осуществлялся с применением бинокулярного микроскопа модели Olympus Delta, обеспечивающего увеличение до $2500\times$ ($25\times$, $100\times$, $500\times$, $1000\times$, $2500\times$) (рисунок 2.3а), а также сканирующего электронного микроскопа модели FEI QUANTA 650, позволяющего получить изображения с увеличением до $5000\times$ (рисунок 2.3б).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Бинокулярный микроскоп “Olympus Delta” (а) и электронный микроскоп “FEI QUANTA 650” (б)



Рисунок 2.3 –исследуемые образцы

Микроструктура была исследована в поляризованном свете с использованием шлифов, которые прошли электролитическую полировку. Эти шлифы были подготовлены из образцов (рисунок 2.3) исследуемых сплавов, как до, так и после их деформирования при различных температурно-скоростных режимах.

2.2.3. Методика определения шероховатости поверхности

Для анализа трения между заготовками, а также между заготовкой и инструментом необходимо были определить шероховатость их поверхностей, что было выполнено с помощью профилометра TR210 (рисунок 2.4) с диапазоном измерения 0,02 – 160 мкм и точностью 3%.



Рисунок 2.4 – Профилометр TR210

2.2.4. Методика определения микротвердости

Для глубокого анализа воздействия пластических процессов на механические свойства материала проводили исследования микротвердости после деформации с применением прибором «DuraScan 20» (рисунок 2.5) с нагрузкой 1 Н (100 г).



Рисунок 2.5 – Микротвердомер DuraScan 20

2.2.5. Испытания на сжатие

Для проведения испытаний на сжатие цилиндрических образцов были использованы универсальные испытательные машины LFM-50 и LFM-250 (рисунок 2.6), обеспечивающие широкий диапазон скоростей деформирования [56]. Технические характеристики этих машин представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Характеристики испытательных машин [57]

Параметр	Показатель	
	LFM-250	LFM-50
Максимальная нагрузка	250 кН	50 кН
Минимальная нагрузка	1,25 кН	0,250 кН
Максимальная скорость деформации	30 с ⁻¹	0,4 с ⁻¹
Исполнение	Напольная	Настольная
Ход траверсы	до 1000 мм	



а



б

Рисунок 2.6 – Испытательные машины моделей LFM250 (а) и LFM50 (б)

Испытательная машина LFM-50 оборудована системой нагрева, которая позволяет осуществлять подогрев как исследуемого образца, так и деформирующего инструмента. Такая конструкция обеспечивает возможность проведения испытаний в условиях повышенных температур. В рамках настоящей работы с применением данной машины были выполнены испытания на сжатие в температурном диапазоне от 300 до 450 °С.

В свою очередь, машина LFM-250 не имеет функции термopодогрева, однако характеризуется значительно большей допустимой нагрузкой. Это определило её использование для проведения испытаний на сжатие при комнатной температуре (20 °С).

2.2.6. Метод осадки с кручением

Для проведения испытаний на осадку с кручением был использован гидравлический пресс модели ДБ-2432А (рисунок 2.7) силой 1,6 МН. Заготовки цилиндрической формы одновременно подвергались воздействию осевой силы и крутящего момента, который возникал за счёт вращения

деформирующего инструмента [58, 59]. В таблице 2.7 приведены технические характеристики данного гидравлического пресса.

Таблица 2.7 - Технические характеристики пресса ДБ2432А [60].

№	Параметр	Значение
1	Номинальное усилие пресса, кН	1600
2	Ход ползуна, мм	560
3	Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	900
4	Размеры стола, мм	710×630
5	Скорость возвратного хода выталкивателя, мм/с	150
6	Скорость рабочего хода ползуна, мм/с	50-7,0
7	Ход выталкивателя, мм	250
8	Емкость гидроагрегата, л	160
9	Емкость бака наполнения, л	270
10	Температура нагрева штампа, °С	100-250
11	Время выдержки под давлением, с	10-999
12	Питающая сеть	3-х фазная ~50Гц/380В
13	Мощность, кВт	7,5
14	Габариты, мм	2270x1200x3820
15	Масса, кг	5100



Рисунок 2.7 – Гидравлический пресс модели ДБ-2432А [58, 60, 61]

Нагрев образцов до необходимой температуры перед деформацией выполняли в электрической печи СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 (рисунок 2.8)



Рисунок 2.8 – Электрическая печь СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1

С целью обеспечения горячего испытания образцов была предусмотрена возможность нагрева нижнего инструмента. Для этого применяли электрическую печь модели СНОЛ 1,6.2,5.1/9- И3 (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Электрическая печь модели СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ

2.2.7. Методы определения энергосиловых параметров и перемещений.

Параметры эксперимента, такие как сила, ход инструмента, температура и угол поворота, регистрировались с помощью соответствующих датчиков в процессе проведения испытаний. (рисунок 2.10).

Датчик силы индивидуальной конструкции (рисунок 2.10в) расположен под нижним инструментом, предназначенным для определения силы осадки.

Датчик перемещения (рисунок 2.10б) предназначен для определения рабочего хода движущегося инструмента.

Для измерения температуры заготовок и инструмент применены хромель-алюмелевые термопары типа К (рисунок 2.10г) с диапазоном измерения от 20 до 1100°C. С целью изучения изменения температурного поля заготовок в процессе пластического формообразования термопары крепились в заготовках методом сверления и сварки.

С помощью датчика поворота (рисунок 2.10а) можно определить угол поворота и скорость вращения верхнего инструмента.

Все используемые приборы размещались в непосредственной близости друг от друга для обеспечения удобства и оперативности проведения экспериментов (рисунок 2.11).

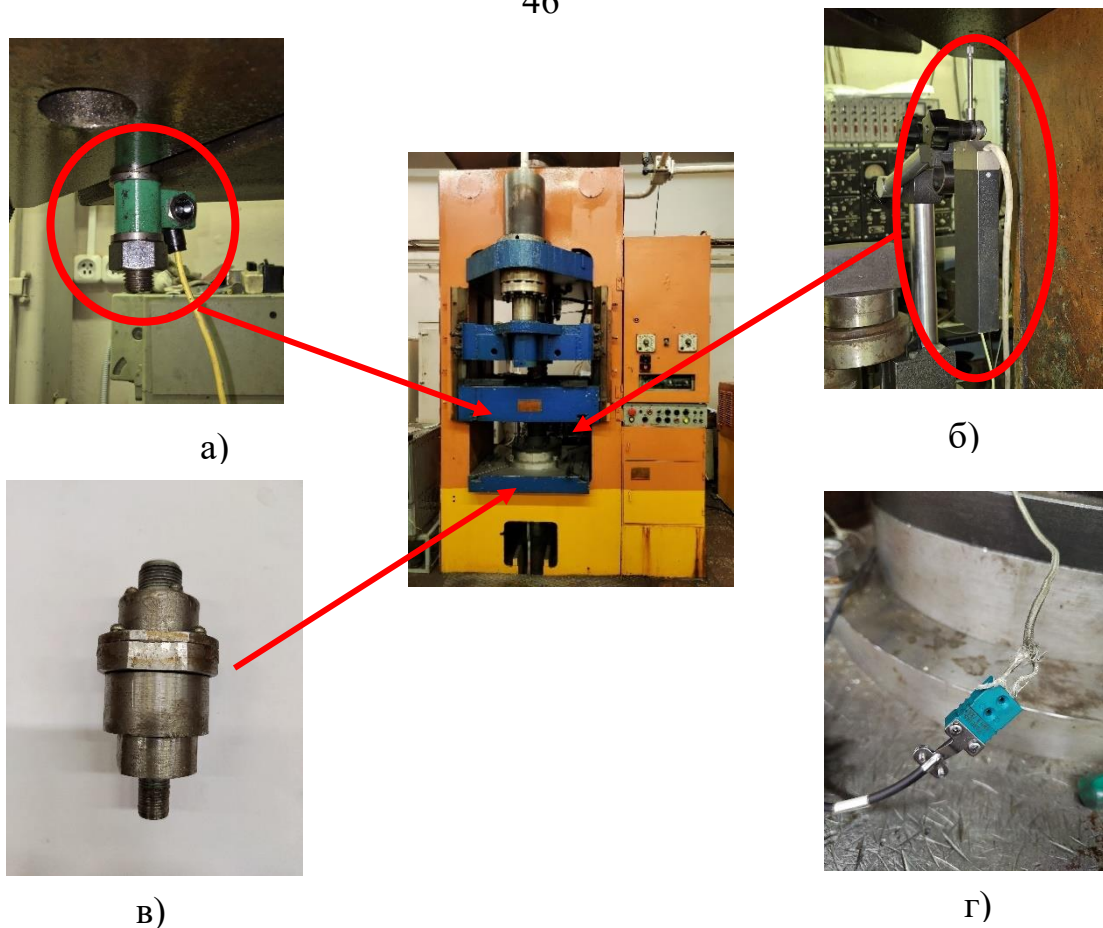


Рисунок 2.10 – Схема расположения датчиков на гидравлическом прессе модели ДБ-2432А:

а – угла поворота, б – перемещения, в – силы, г – температуры.

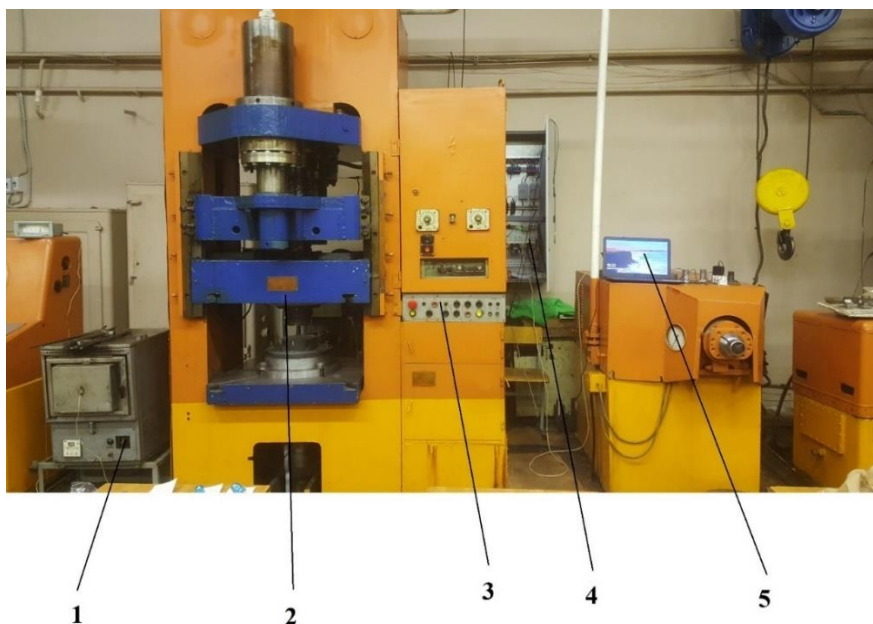


Рисунок 2.11 – Испытательное оборудование:

1 - электрическая печь, 2 - пресс, 3 - пульт управления, 4 - процессор, 5 - компьютер (ЭВМ)

2.2.8. Методы моделирования процессов пластического формообразования

В качестве инструмента для моделирования процессов пластического формообразования использовалось программное обеспечение QForm 11. Данная конечно-элементная система предназначена для численного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД). QForm 11 позволяет точно воспроизводить физические явления, происходящие в заготовке и инструменте, включая распределение напряжений, деформаций, температуры и другие параметров в реальном масштабе времени. QForm 11 учитывает термомеханические процессы нагрева и охлаждения металла, включая изменения, происходящие во время деформации, а также взаимодействие заготовки с инструментом.

Для разработки технологических процессов и выбора оптимальных режимов пластического формообразования важно использовать адекватные реологические модели материалов, обеспечивающие точность численного моделирования деформационных процессов (рисунок 2.12) [62].

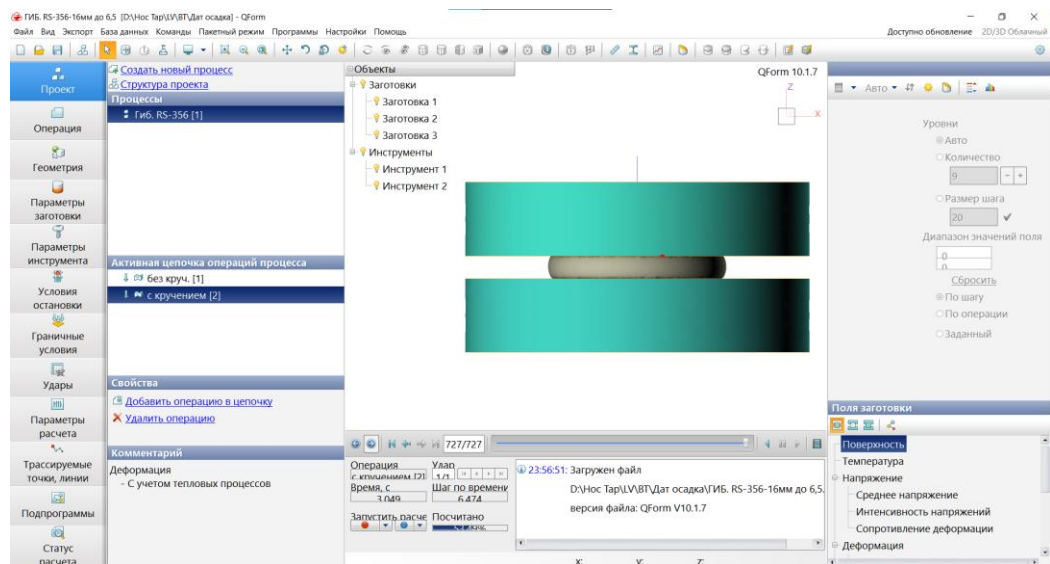
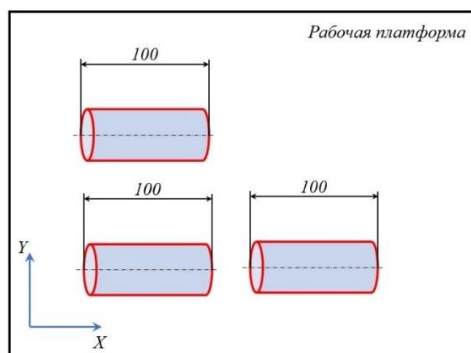


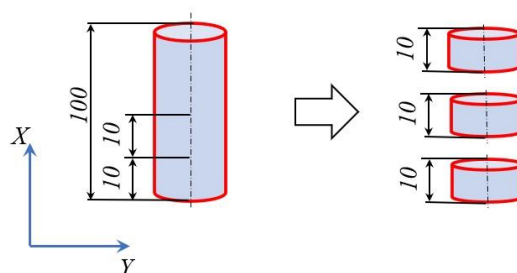
Рисунок 2.12 – Окно программы QForm

Для построения реологической модели сплава РС-356 были изготовлены цилиндрические образцы с размерами 10×10 мм (диаметр × высота). В процессе производства стержень располагался в установке SLM в плоскости XY рабочей платформы (рисунок 2.13a). После завершения 3D-печати

цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм вырезали из стержня методом электроэрозионной обработки на проволочно-вырезном станке модели «ONA AF-25» (рисунок 2.14). Для резки использовалась латунная проволока марки Л63 диаметром 0,025 мм, при этом толщина изменённого слоя не превышала 20–30 мкм. Испытания на сжатие проводились вдоль оси X в соответствии с координатами печати (рисунок 2.13б). Дополнительная термообработка заготовок после печати не выполнялась.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Схема изготовления цилиндрических образцов алюминиевого сплава PC-356



Рисунок 2.14 – Электроэрозионный проволочно-вырезной станок модели «ONA AF-25»

Испытания на сжатие провели на универсальных испытательных машинах моделей LFM250 (при температуре 20°C) и LFM50 (при температурах 300, 400 и 450 °C). Деформацию осуществляли со скоростями 0,001; 0,01 и 0,4 с⁻¹ [63, 64]. Постоянство скорости деформации обеспечивали путем управления скоростью перемещения траверсы испытательной машины в соответствии с формулой:

$$S_i = h_o - \exp(-\dot{\varepsilon}_i \times t) \times h_o, \quad (2.1)$$

где: S_i – перемещение траверсы испытательной машины, мм;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹;

t – время, секунд;

h_0 – исходная высота образца исследуемого материала, мм.

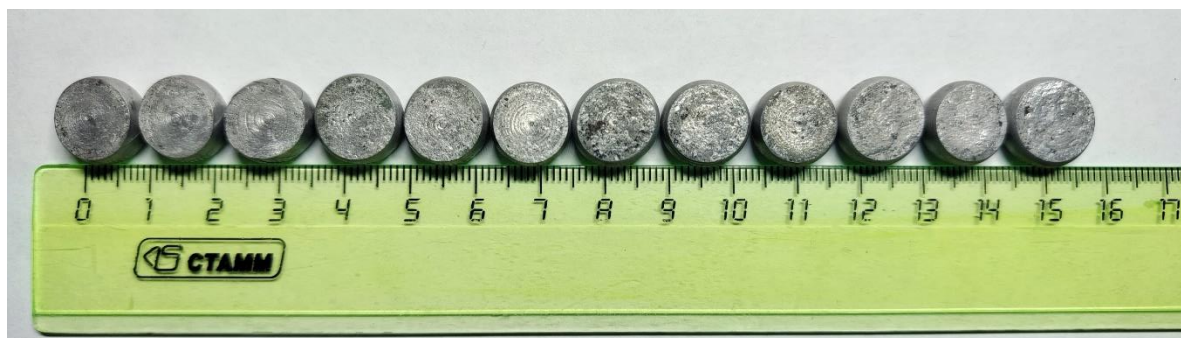


Рисунок 2.15 – Цилиндрические образцы из алюминиевого сплава РС-356 после осадки

Для проведения моделирования процесса формообразования на базе программы QForm 11, необходимо интегрировать в ее деформируемый материал. Для моделирования пластического поведения материала применялась модель Хензеля–Шпиттеля [65], которая описывает зависимость напряжения текучести от ключевых параметров процесса — температуры, скорости деформации и величины деформации[64]. Математическое выражение модели включает 9 (формула 2.2) и 5 (формула 2.3) неизвестные коэффициенты, значения которых определяются на основе результатов экспериментальных исследований.

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^{m_2} \exp(-m_4 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \exp(-m_1 T), \quad (2.3)$$

где:

σ_i – напряжение текучести,

T – температура заготовки;

ε – величина деформации,

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации,

$A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Данные модели позволяют точно учитывать влияние термомеханических условий на течение материала и применяется при численном моделировании процессов обработки давлением.

Для расчёта неизвестных коэффициентов модели был использован алгоритм Левенберга–Маркардта, основанный на методе наименьших квадратов. Подбор параметров осуществлялся с помощью специализированных вычислительных средств, реализованных в программной среде MatLab [66].

2.2.9. Исследования энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356

С целью изучения энергосиловых параметров подготовили цилиндрические образцы из алюминиевого сплава РС-356 диаметром и высотой 52x34 и шероховатостью поверхности - Ra 6.3 (мкм). Для изучения изменения температурного поля заготовки в процессе деформации в ней было изготовлено сверление диаметром 8 мм от края заготовки, в котором крепилась термопара типа К (хромель-алюмель). Деформирование каждого образца осуществляли сжатием на 50% без кручения и с кручением при температуре нагрева заготовки 320°C. Показания значений температуры и силы сжатия записывали датчиками, показанными в п.п. 2.2.7. Технологическая схема процессов представлены на рисунках 2.16 – 2.17.

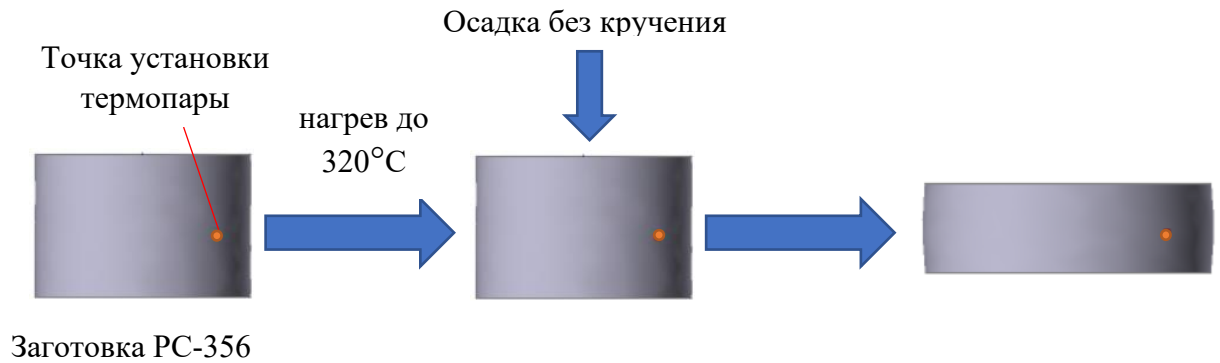


Рисунок 2.16 – Технологическая схема осадка без кручения заготовок из алюминиевого сплава РС-356 при 320°C

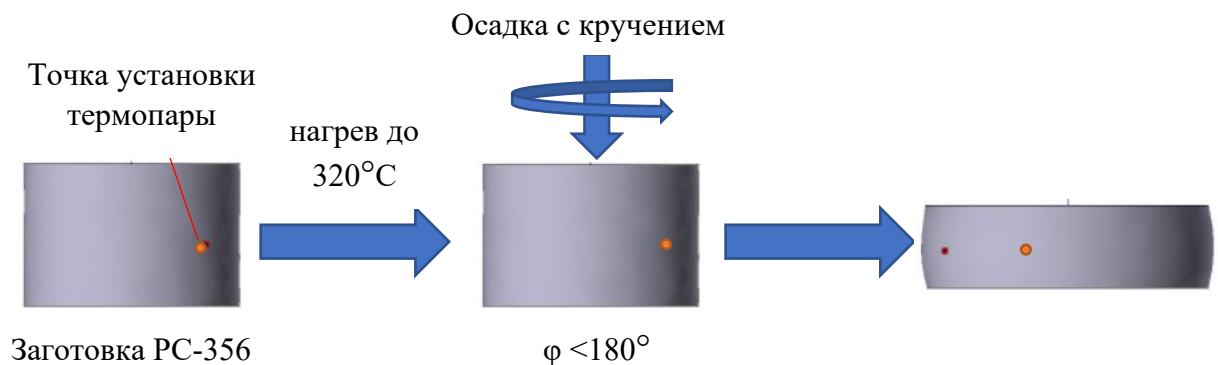


Рисунок 2.17 – Технологическая схема осадка с кручением заготовок из алюминиевого сплава РС-356 при 320°C

2.2.10. Методы получения составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Исходные заготовки из алюминиевого сплава РС-356 имели высоту 12,5 мм и диаметр 21,1 мм. Деформирование осуществляли за два перехода. На первом переходе осуществляли сжатие отдельно каждой из двух заготовок, нагретой в печи до температуры 250 °С, между плоскими бойками до высоты $\approx 5,35$ мм. Перед повторной деформацией собирали пакет из двух предварительно деформированных заготовок, который нагревали до температуры 350 °С и выполняли осадку пакета с кручением с осевой скоростью 2 мм/сек и углом поворота 144 градуса со скоростью вращения 36 градусов в секунду до толщины 2,0 мм (рисунок 2.18) [67].

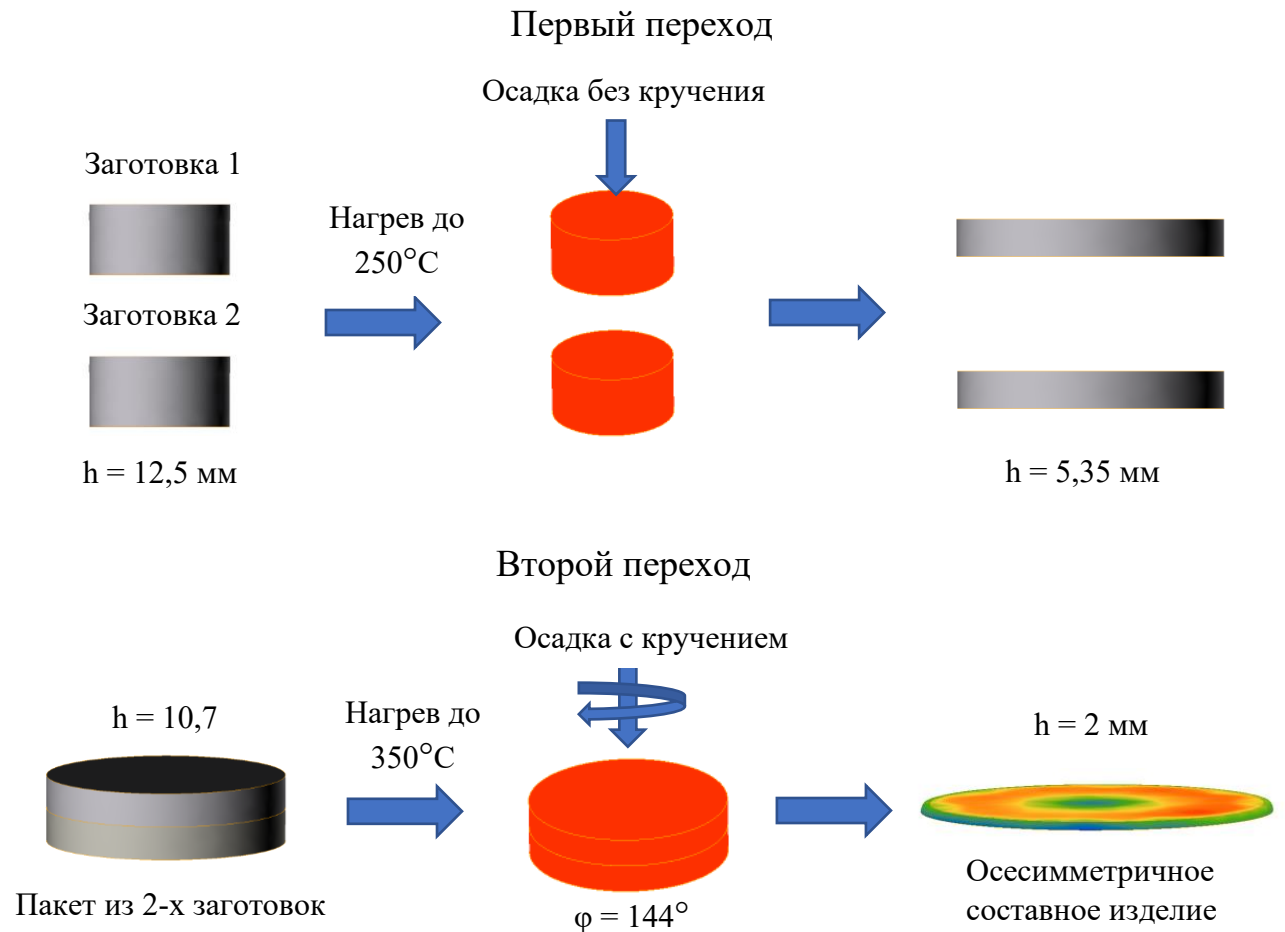


Рисунок 2.18 – Технологическая схема получения составных изделий из двух заготовок из алюминиевого сплава РС-356, $\phi = 144$ градусов

2.2.11. Методы получения составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0

Исходные цилиндрические заготовки из алюминиевого сплава РС-356 имели высоту 14 мм и диаметр 52 мм, исходные заготовки из титана ВТ1-0 были изготовлены согласно чертежу (рисунок 2.19). Перед получением составных изделий титановые заготовки подвергали обработке с целью удаления альфированного слоя согласно инструкции МИ-756 по травлению деталей из титановых сплавов - заготовки тщательно промывали в теплой, затем в холодной проточной воде, после этого травились в течение 5 – 10 минут в растворе, состоящем из смеси азотной (15-20%) и плавиковой кислот (5-10%) (остальное вода). Перед нагревом заготовки зачищали контактную поверхность наждачной бумагой и протирали спиртом. Заготовки из

алюминиевого сплава РС-356 нагревали до температуры 450 °С, матрицу с заготовками из титана BT1-0 нагревали до температуры 550 °С. После этого заготовки собирали в пакет и подвергали осадке с кручением с осевой скоростью перемещения верхнего бойка 2 мм/сек и частотой вращения 36 градусов/сек с углом поворота 108° до толщины 22,0 мм (рисунок 2.20).

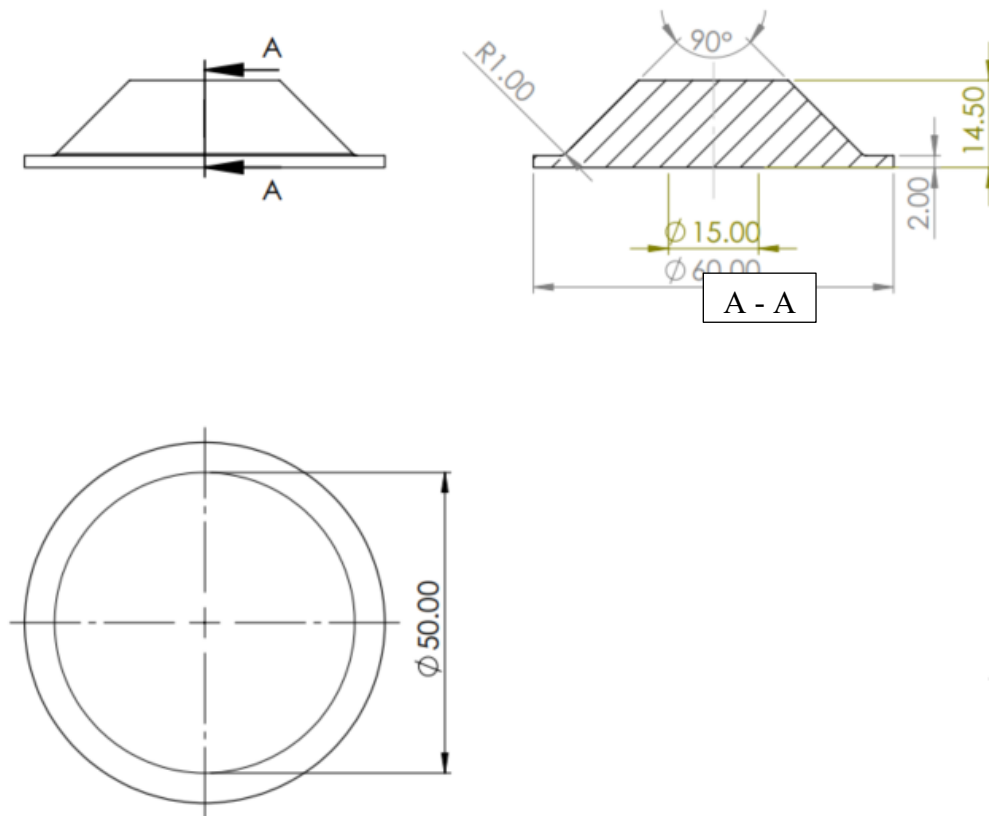


Рисунок 2.19 – Исходная заготовка из титана BT1-0

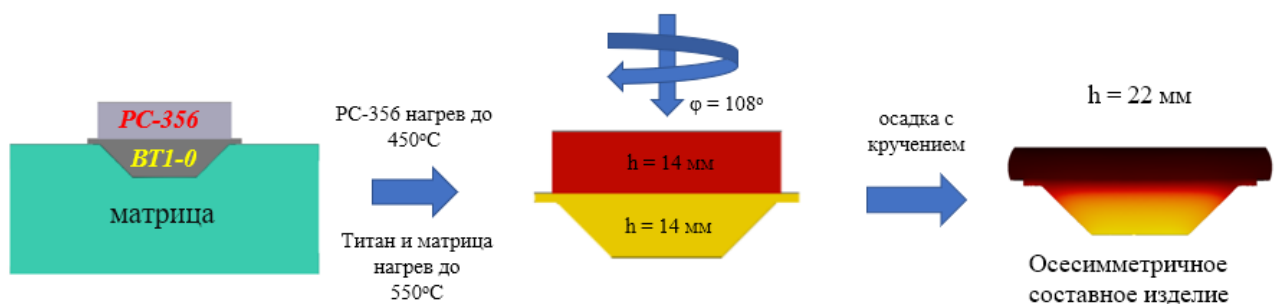


Рисунок 2.20 – Технологическая схема получения осесимметричных составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0 осадкой с кручением, угол поворота верхнего бойка $\varphi = 108$ градусов

Выводы по 2 главе

1. Представлены химический состав и основные физико-механические свойства изучаемого алюминиевого сплава РС-356.
2. Представлены сведения о применяемом высокотехнологичном исследовательском и испытательном оборудовании, используемом для проведения экспериментальных исследований.
3. Представлены методы определения энергосиловых и температурных параметров процессов формообразования заготовок и изделий из исследуемых материалов с помощью датчиков силы, хромель-алюмелевых термопар типа К, датчиков перемещения и угла поворота.
4. Выполнено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов. В качестве реологических моделей применяли зависимости Хензеля–Шпиттеля, реализованные в программной среде QForm.
5. Показаны экспериментальные методы изучения энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356 при температуре 320 °С, как без кручения, так и с кручением.
6. Представлен метод получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 на гидравлическом прессе ДБ-2432 с предварительным нагревом заготовок до 250°С на первом переходе (осадка без кручения) и до 350°С на втором переходе (осадка с кручением).
7. Построена технологическая схема получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 методом осадки с кручением с предварительным нагревом заготовок из алюминиевого сплава РС-356 до температуры 450 °С и заготовок из титана ВТ1-0 до температуры 550 °С.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

3.1. Разработка реологической модели алюминиевого сплава РС-356

При построении математических моделей для аппроксимации экспериментальных кривых "напряжение текучести – деформация" в контексте сопротивления деформации применяют разнообразные математические зависимости. Эти зависимости отражают влияние термомеханических параметров, таких как температура, деформация и скорость деформации, на напряжение текучести. Обычно используют степенные или экспоненциальные функции, а также зависимости, основанные на термомеханических коэффициентах.

Существует множество моделей, описывающих взаимосвязь между напряжением и деформацией, среди которых можно выделить модели Смирнова–Аляева [68], уравнения, предложенные А.И. Целиковым, А.Д. Томленовым и В.И. Зюзиным [69], математическую модель Воуса [70], а также формулу Рамберга–Осгуда [71] и другие. Наибольшую популярность получили модели Хензеля и Шпиттеля [65], включающие 5 или 9 коэффициентов, зависящих от температуры, величины и скорости деформации.

Пластической деформации подвергли 36 цилиндрических образцов из алюминиевого сплава РС-356 диаметром и высотой 10 x 10 мм в диапазоне температур от 20 до 450 °С при постоянной скорости деформации в диапазоне от 0,001 до 0,4 с⁻¹. Выбор температурного интервала обусловлен характерными значениями температуры пластической деформации, принятыми при холодной, полугорячей и горячей штамповке сплава РС-356. Выбор диапазона значений скорости деформации обусловлен характерными значениями номинальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_i^{\text{НОМ}}$ при выполнении обработки давлением на гидравлических и механических прессах. С другой стороны, при выборе значений скорости деформации в натурном эксперименте руководствовались также характерными значениями $\dot{\epsilon}_i^{\text{НОМ}}$ принятыми при

проведении лабораторных исследований сопротивления деформации в обработке давлением.

В случае горячей деформации образцы предварительно нагревали в печи около 25 минут до необходимой температуры, после чего помещали на неподвижный стол испытательной установки и проводили испытания согласно установленному режиму нагружения. При холодной деформации образцы алюминиевого сплава РС-356 испытывали при комнатной температуре.

«Изотермическая» кривая текучести исследуемого сплава построена на основе экспериментальных данных, полученных в результате проведения экспериментов. Последовательность построения «изотермической» кривой текучести представлена на рисунке 3.1.

На рисунке 3.2 показаны образцы исследуемого сплава после их сжатия. При сжатии цилиндрических образцов смазку не использовали; в последующих расчетах принимали, что трение на контактной поверхности максимальное, т.е. фактор трения равен 1,0, что приводит к искажению боковой поверхности образца.

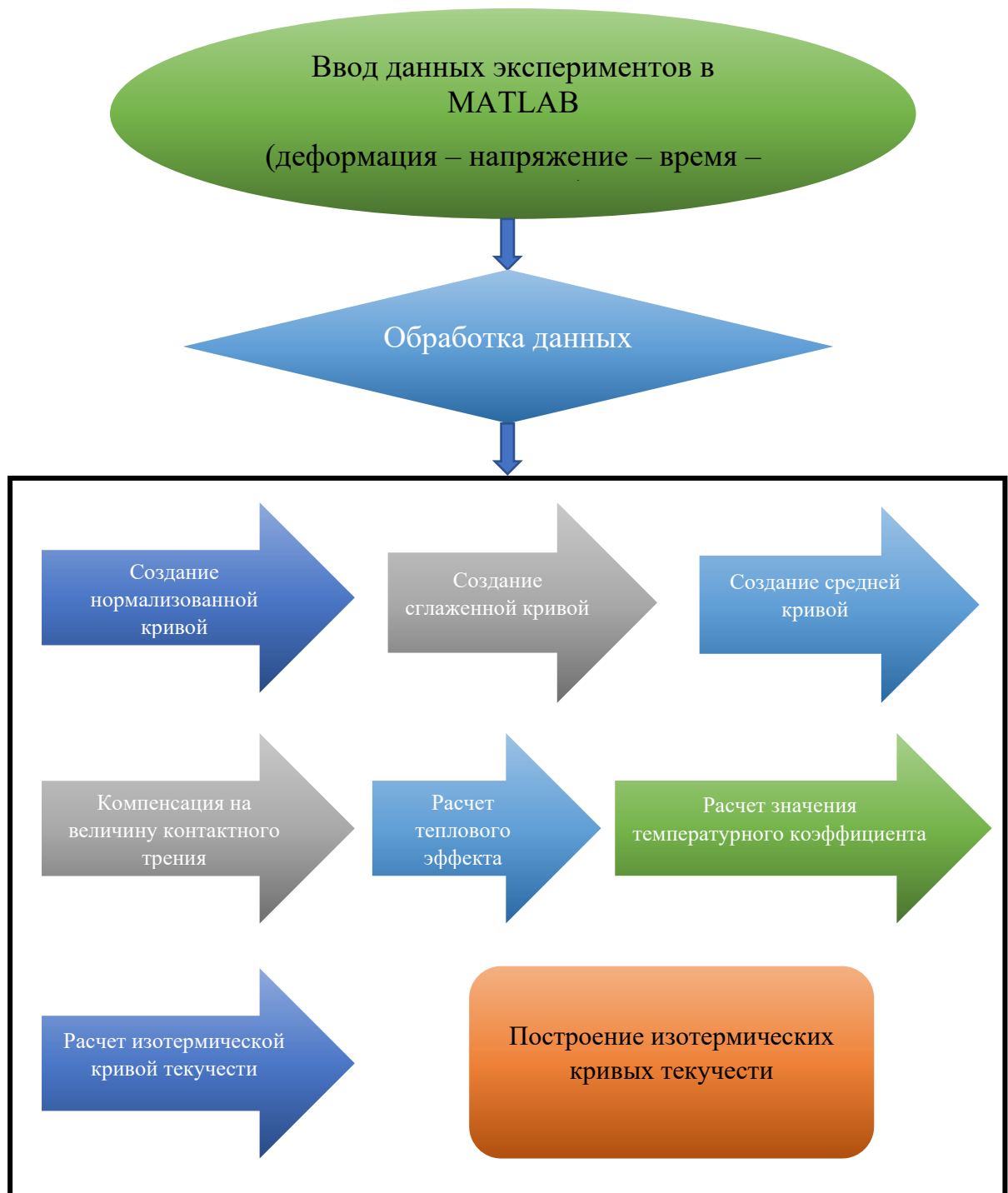


Рисунок 3.1 – Схема построения «изотермической» кривой текучести

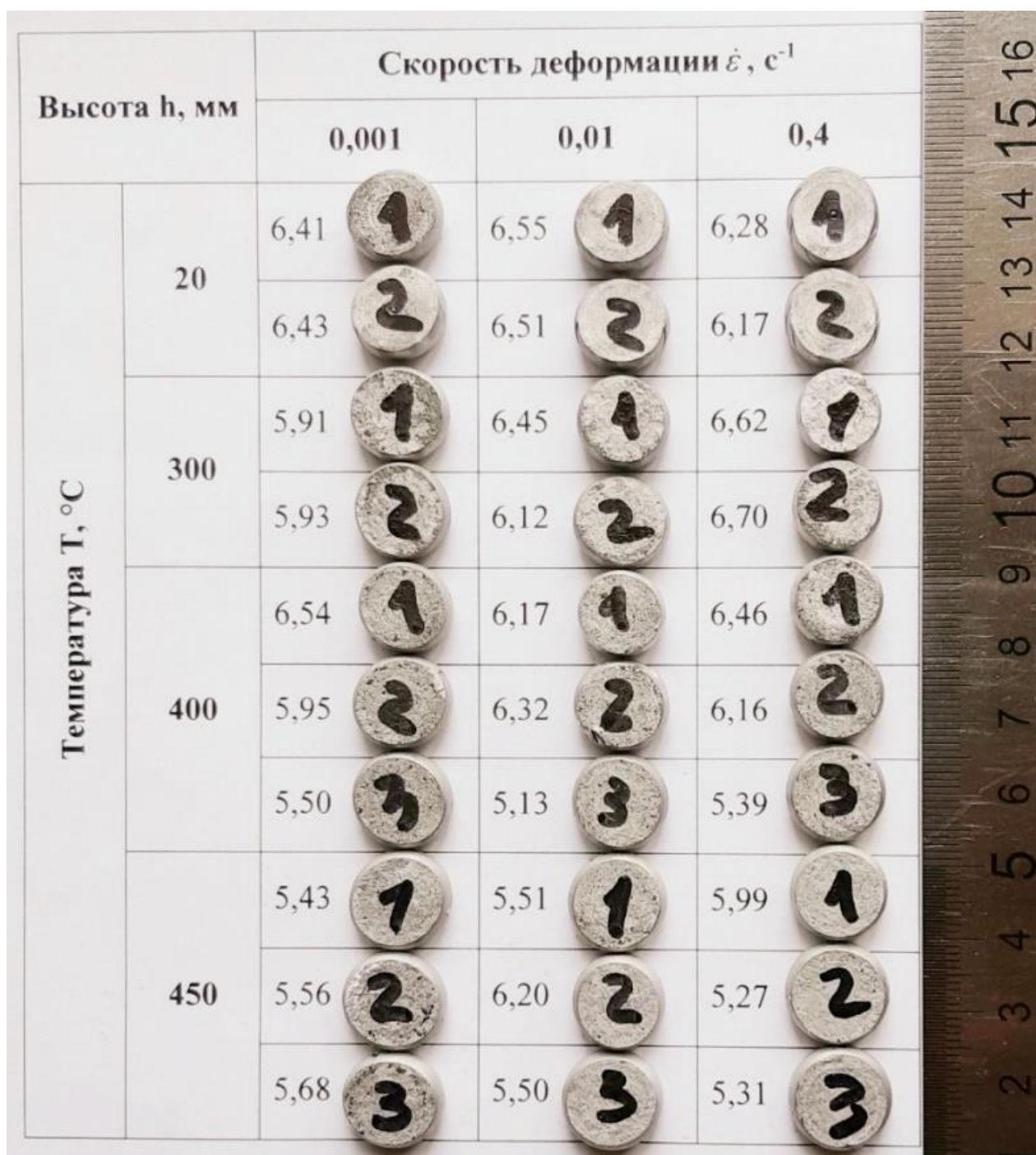


Рисунок 3.2 – Внешний вид образцов после деформации до высоты h в заданных температурно-скоростных условиях деформирования

Полученные испытанием на сжатие зависимости напряжения текучести от деформации при различных температурах и скоростях деформации представлены на рисунке 3.3. Полученные зависимости являются изотермическими кривыми, которые могут быть использованы для разработки математической модели сопротивления сплава РС-356 пластической деформации.

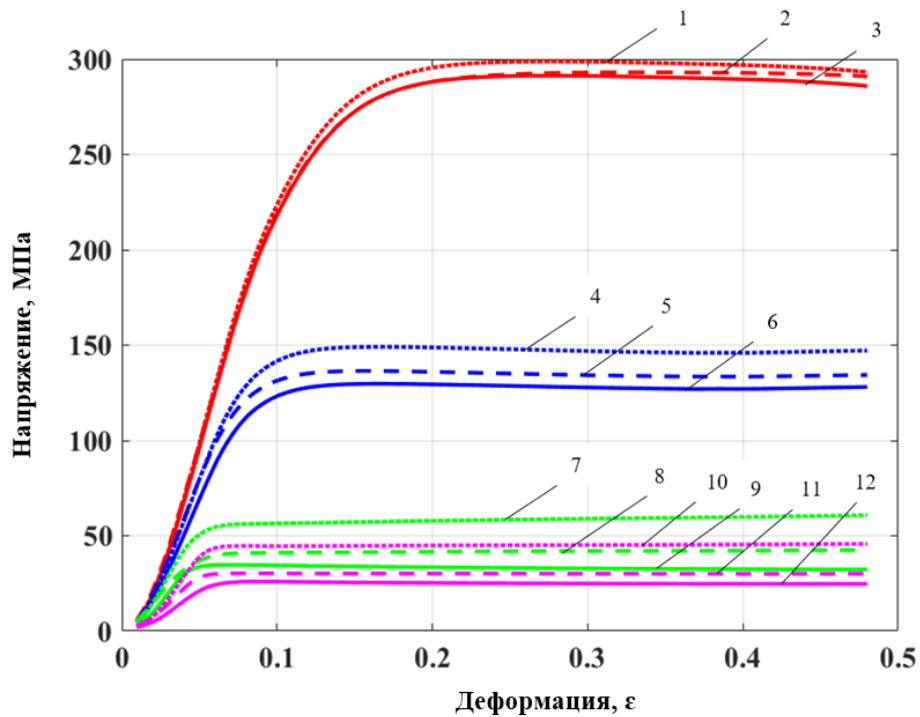


Рисунок 3.3 – Экспериментальные зависимости напряжения текучести сплава РС-356 от деформации и температуры

1, 2, 3 – при температуре 20 °C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 (с⁻¹),
 4, 5, 6 - при температуре 300 °C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 (с⁻¹),
 7, 8, 9 - при температуре 400 °C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 (с⁻¹),
 10, 11, 12 - при температуре 450 °C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 (с⁻¹)

При холодной деформации рекристаллизация и разупрочнение отсутствуют, происходит только упрочнение. Поэтому влияние скорости деформации на сопротивление деформации в большинстве случаев невелико. При высоких температурах влияние скорости деформации на напряжение текучести становится все более ярко выраженным. Напряжение текучести увеличивается примерно на 10 МПа при увеличении скорости деформации в 10 раз (рисунок 3.3).

«Изотермические» кривые текучести алюминиевых сплавов РС-356 были рассчитаны выше. Видно, что для исследуемого сплава скорость упрочнения возрастает с увеличением температуры испытаний. Так, например, при температуре 300 °C и величине деформации 0,5 увеличение

скорости деформации с 0,001 до 0,4 с⁻¹ приводит к повышению напряжения текучести в 1,2 раза (с 125 до 150 МПа), а при температуре 450 °С – в 2 раза (с 25 до 50 МПа). Интенсивность разупрочнения сплава заметно уменьшается с ростом температуры испытаний с 300 до 450 °С.

По окончании вычислительного эксперимента и достижению заданной точности расчета (критерий (3.3)) можно говорить о завершении определения изотермической кривой текучести исследуемого сплава (рисунок 3.3) для данной температуры и скорости деформации. Как будет показано далее, полученные кривые текучести являются исходными данными для определения математической модели алюминиевого сплава РС-356 в диапазоне температур 20-450 °С и диапазоне скоростей деформации 0,001-0,4 с⁻¹.

На основе проведенного анализа, в качестве прототипа для построения математических моделей исследуемых сплавов выбрана эмпирическая модель Хензеля-Шпиттеля. Уравнение представляет собой зависимость напряжения текучести от температуры, накопленной деформации и скорости деформации. Выбор обусловлен широким применением модели в штамповочных процессах и её гибкостью — благодаря большому числу параметров она позволяет точно аппроксимировать кривые текучести при различных условиях деформации [64]:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T}, \quad (3.1)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_7 , m_8 , m_9 – коэффициенты.

Значения неизвестных коэффициентов в формуле (3.1) находят из решения задачи оптимизации. В качестве исходных данных для решения этой задачи используют результаты натурных экспериментов. Определение неизвестных коэффициентов модели (3.1) выполнялось методом Левенберга-Маркарда в программе MATLAB, который реализован в стандартной функции «lsqcurvefit»; результаты представлены в таблице 3.1. Расчетные кривые зависимостей напряжения течения от температуры заготовок и скоростей деформации представлены на рисунках 3.4-3.5.

Таблица 3.1 – Коэффициенты математической модели сопротивления деформации данного сплава.

Температура деформации	A	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₇	m ₈	m ₉
20 °C – 300 °C	214,0419	-0,0021	-0,3945	0,003	-0,0994	-0,0028	0,3474	$6,77 \times 10^{-5}$	0,0501
400 °C – 450 °C	10,597	-0,0086	-0,082	0,3438	-0,0204	-0,0026	0,8587	-0,0006	0,8813

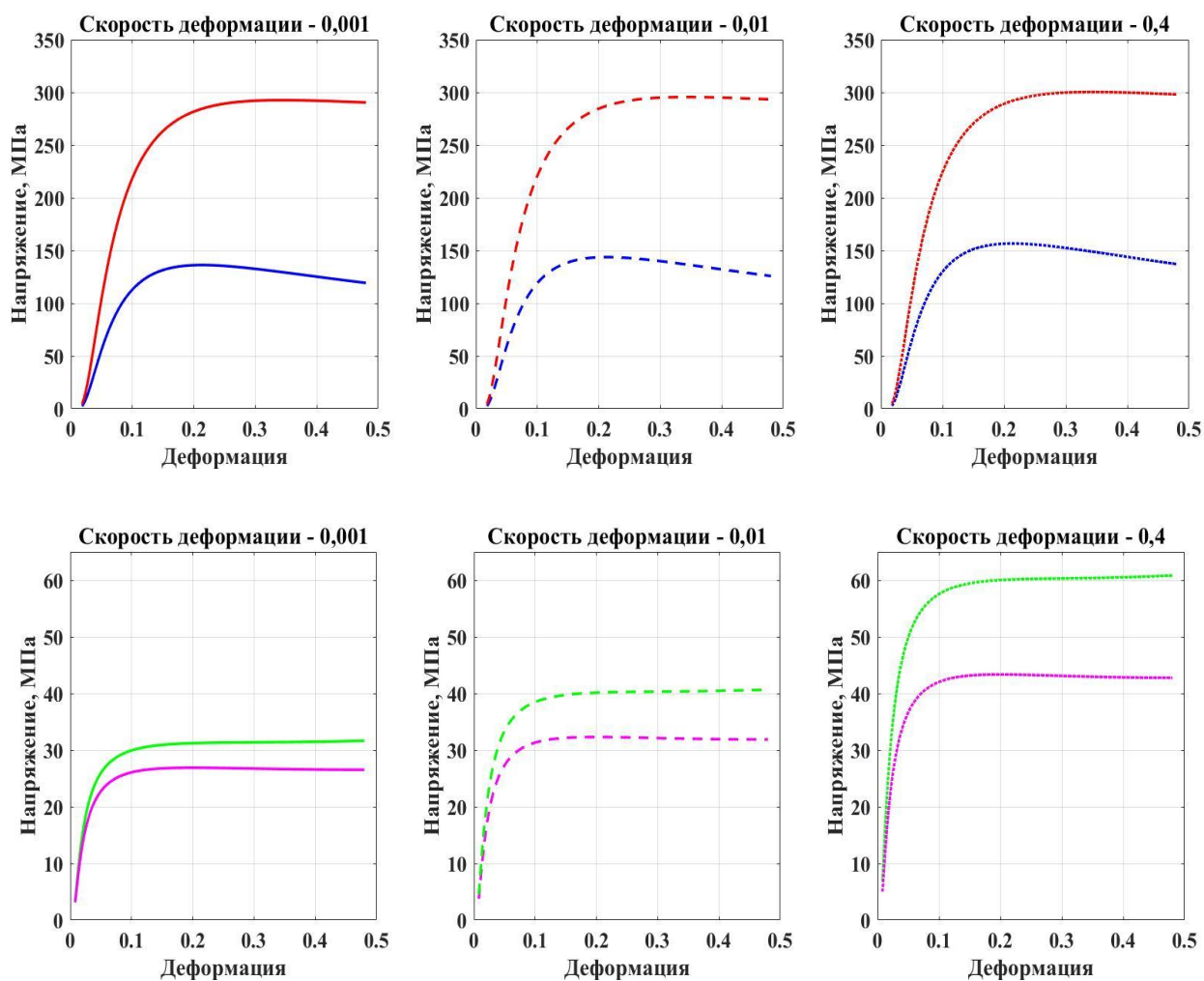


Рисунок 3.4 – Расчётные значения напряжений текучести по уравнению Хензеля - Шпиттеля с 9-ю неизвестными коэффициентами (формула 3.1):

- результаты расчета по формуле (3.1) при 20 °C
- результаты расчета по формуле (3.1) при 300 °C
- результаты расчета по формуле (3.1) при 400 °C
- результаты расчета по формуле (3.1) при 450 °C

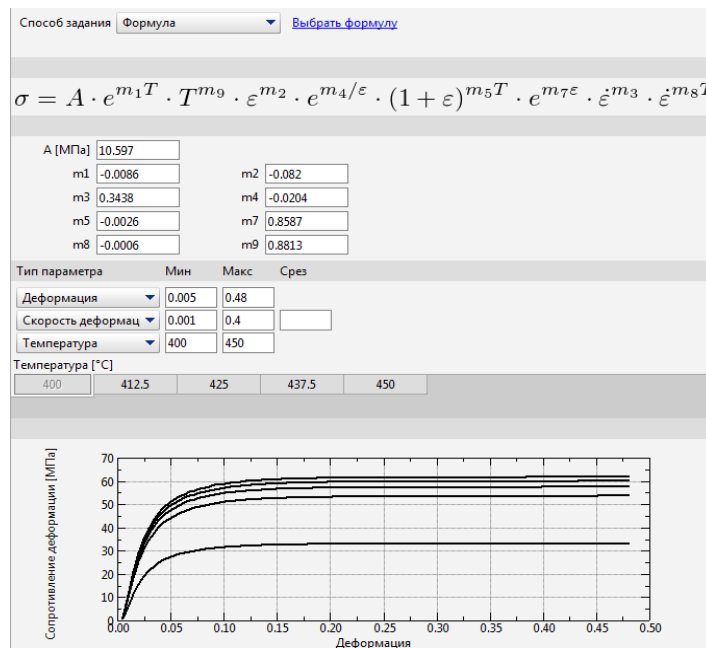


Рисунок 3.5 – Математические модели с найденными коэффициентами в программе QFORM 11

В качестве второй математической модели была выбрана модель Хензеля–Шпиттеля с 5-ю неизвестными коэффициентами, которая описывается формулой [64]:

$$\sigma_i = A \epsilon_i^{m_2} \exp(-m_4 \epsilon_i) \dot{\epsilon}_i^{m_3} \exp(-m_1 T) \quad (3.2)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – неизвестные коэффициенты.

Уравнение (3.2) решается аналогично формуле (3.1). Найденные коэффициенты приведены в таблице 3.2, а рассчитанные зависимости напряжения текучести от температуры образцов и скорости деформации — на рисунке 3.6.

Таблица 3.2 - Значения коэффициентов модели Хензеля–Шпиттеля с 5-ю неизвестными коэффициентами.

Тип деформации	A	m_1	m_2	m_3	m_4
20 – 300 °C	3021,0675	0,0025	0,9756	0,0086	3,3721
400 – 450 °C	1832,3114	0,0056	0,4317	0,0966	1,7197

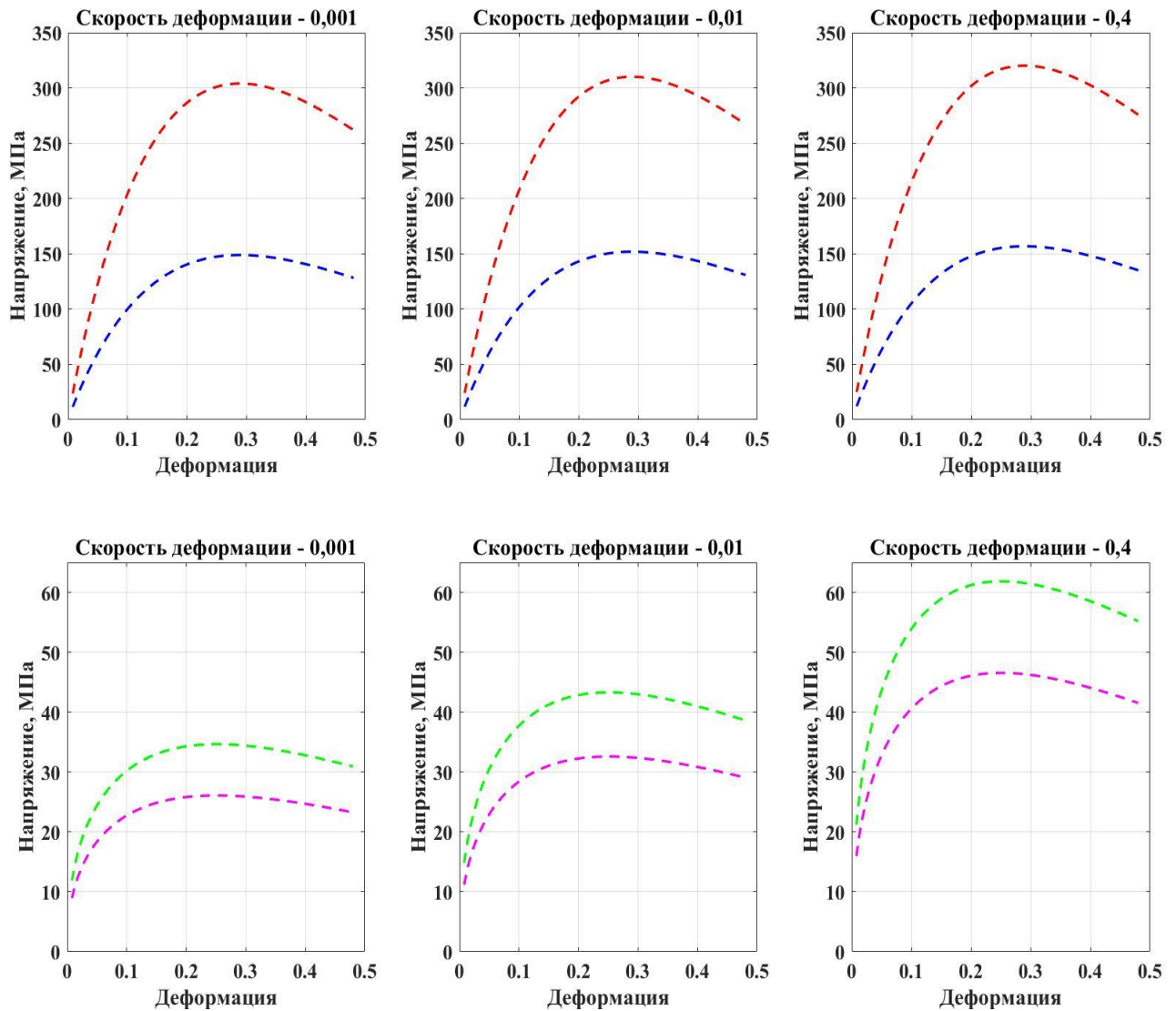


Рисунок 3.6 – Расчётные значения напряжений текучести по уравнению Хензеля - Шпиттеля с 5-ю неизвестными коэффициентами (формула 3.2):

- результаты расчета по формуле (3.2) при 20 °C
- результаты расчета по формуле (3.2) при 300 °C
- результаты расчета по формуле (3.2) при 400 °C
- результаты расчета по формуле (3.2) при 450 °C

Точность разработанных реологических моделей сплава РС-356 была подтверждена с помощью численного моделирования процесса осадки цилиндрических образцов с размерами (диаметр × высота) 10×10 мм при температуре 20 °C и 450 °C. Результат представлен на рисунках 3.7 и 3.8.

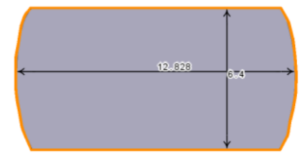
а) $D=12,81$ мм $D_3=12,81$ ммб) $D=12,82$ мм

Рисунок 3.7 - Форма образующей при сжатии цилиндрического образца при температуре 20 °C: (а) модель материала - формула (3.1); (б) модель материала – формула (3.2)

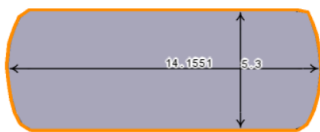
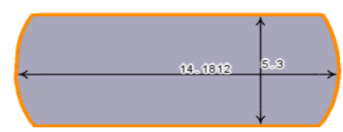
а) $D=14,18$ мм $D_3=14,17$ ммб) $D=14,15$ мм

Рисунок 3.8 - Форма образующей при сжатии цилиндрического образца при температуре 450 °C: (а) модель материала - формула (3.1); (б) модель материала – формула (3.2)

Проверка полученных «изотермических» кривых текучести выполнена методом постановки обратной задачи [72]. Данный метод предполагает проведение вычислительного эксперимента, соответствующего натурным испытаниям.

Вычислительный эксперимент, связанный со сжатием образцов сплава РС-356 выполнили с применением конечно-элементной программы QFORM. Вычислительный эксперимент основывается на итерационном подходе. Конечная цель этого эксперимента – достигнуть заданной точности при расчете силы деформирования в сравнении с её экспериментальным значением во всех вычислительных экспериментах, выполненных при определенных температурах в диапазоне от 20 до 450 °C и скоростях деформации $0,001 \text{ с}^{-1}$; $0,01 \text{ с}^{-1}$; $0,4 \text{ с}^{-1}$. Критерий оценки точности моделирования [73]:

$$\delta = \left| \frac{P_{FEM} - P_{\text{эксн}}}{P_{\text{эксн}}} \times 100\% \right| \leq 5\%, \quad (3.3)$$

где δ – относительная погрешность измерений; P_{FEM} – сила деформирования по результатам расчета в конечно-элементной программе; $P_{\text{эксн}}$ – сила деформирования, измеренная в опыте.

Если условие (3.3) не выполняется, то полученные кривые текучести корректируются и моделирование повторяется. Расчеты в конечно-элементной программе выполняют до тех пор, пока условие (3.3) не будет удовлетворено. Включение в методику вычислительного эксперимента позволяет учесть факторы, которые не учитываются при обработке данных, полученных из натурного эксперимента.

В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина:

- средней ошибки (S):

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}_i|}{|\sigma_i|} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

- коэффициента детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SE}{SE_{\text{сред}}}, \quad (3.5)$$

$$SE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_i)^2; \quad SE_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{ср}})^2 \quad (3.6)$$

где n – объем выборки, σ_i – i -е экспериментальное значение напряжения текучести, полученное в эксперименте при деформации ε_i и фиксированном значении скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$ и температуре T_i , $\bar{\sigma}_i$ – i -е расчетное значение напряжения текучести, полученное по формулам 3.1 и 3.2 с учетом значений коэффициентов (см. таблицы 3.1 и 3.2); $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение напряжения текучести по полученным в эксперименте данным.

Коэффициент детерминации R^2 для оценки качества математической модели представлен формулой (3.5 и 3.6) и позволяет оценить какая доля

дисперсии, которая может быть предсказана моделью в известных экспериментальных данных. Считается, что при R^2 принимающим значение от 0,8 до 1,0 – математическая модель хорошего качества [74].

3.2. Расчет теплового эффекта при пластической деформации.

Температура металла увеличивается в процессе пластической деформации из-за выделения тепла при выполнении механической работы [75, 76, 77]. Механическая энергия, передаваемая на объем (обозначаемая как w), которая расходуется на деформацию и вызывает повышение температуры металла, определяется площадью под кривой напряжение-деформация [78].

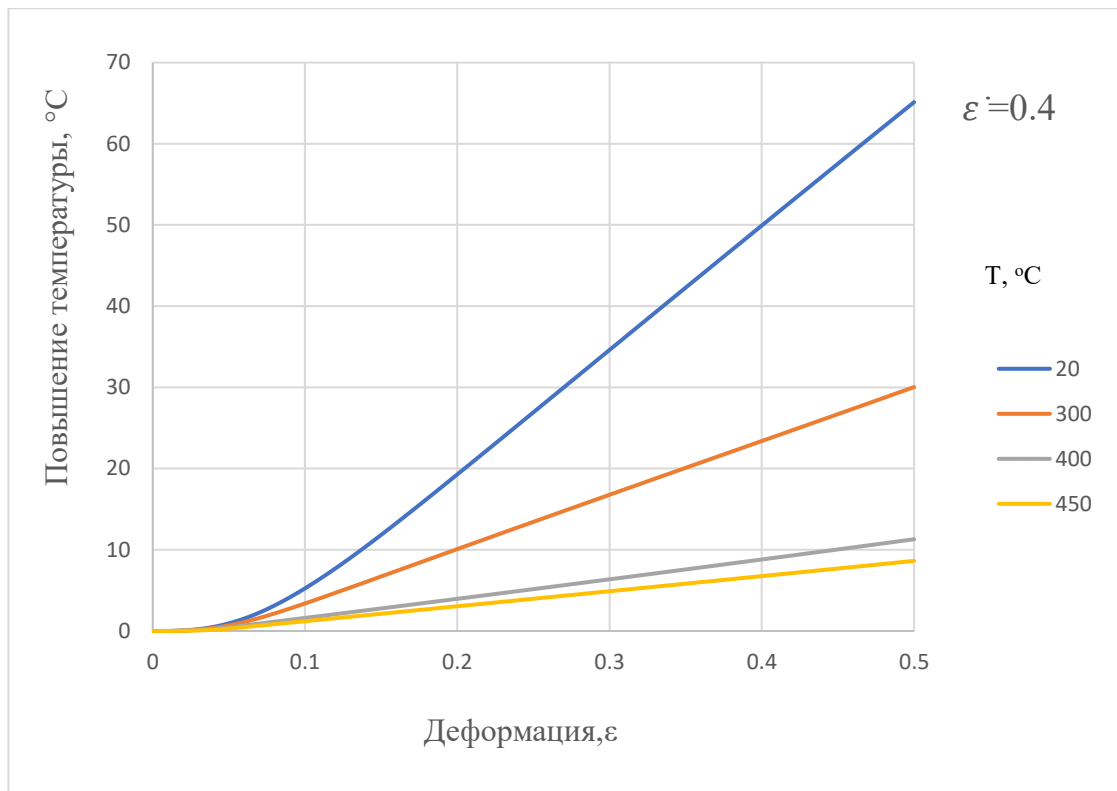
$$w = \int_0^{\bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}, \quad (3.7)$$

Лишь небольшая часть этой энергии накапливается, преимущественно в форме дислокаций и вакансий. Этот долевой процент снижается с примерно 5% на начальном этапе до 1 – 2% при больших деформациях. Остальная часть энергии выделяется в виде тепла. В случае, если деформация является адиабатической, то есть отсутствует теплопередача в окружающую среду, повышение температуры определяется уравнением [79].

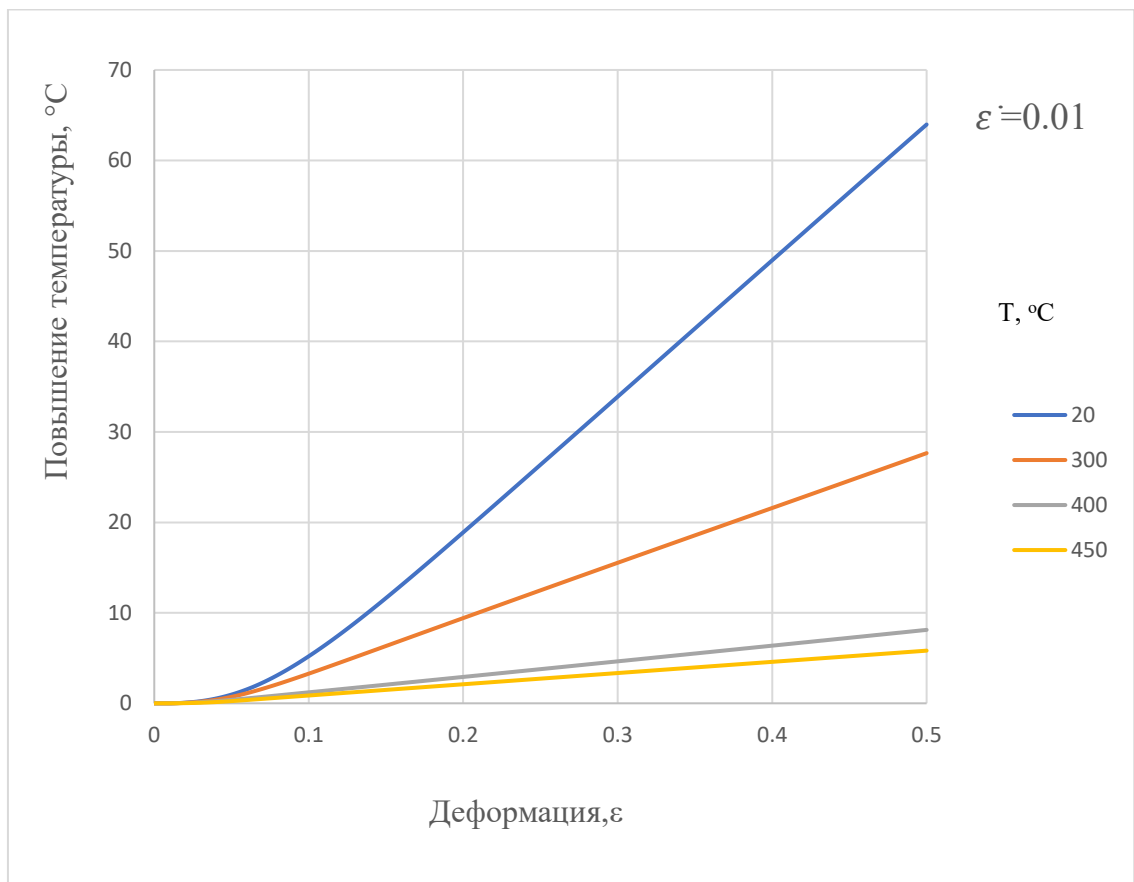
$$\Delta T = \frac{\alpha \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{\rho C} = \frac{\alpha \bar{\sigma}_a \bar{\epsilon}}{\rho C}, \quad (3.8)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее значение σ за интервал деформации от 0 до ϵ , ρ – плотность, C – массовая теплоемкость, а α – доля накопленной энергии (0,98).

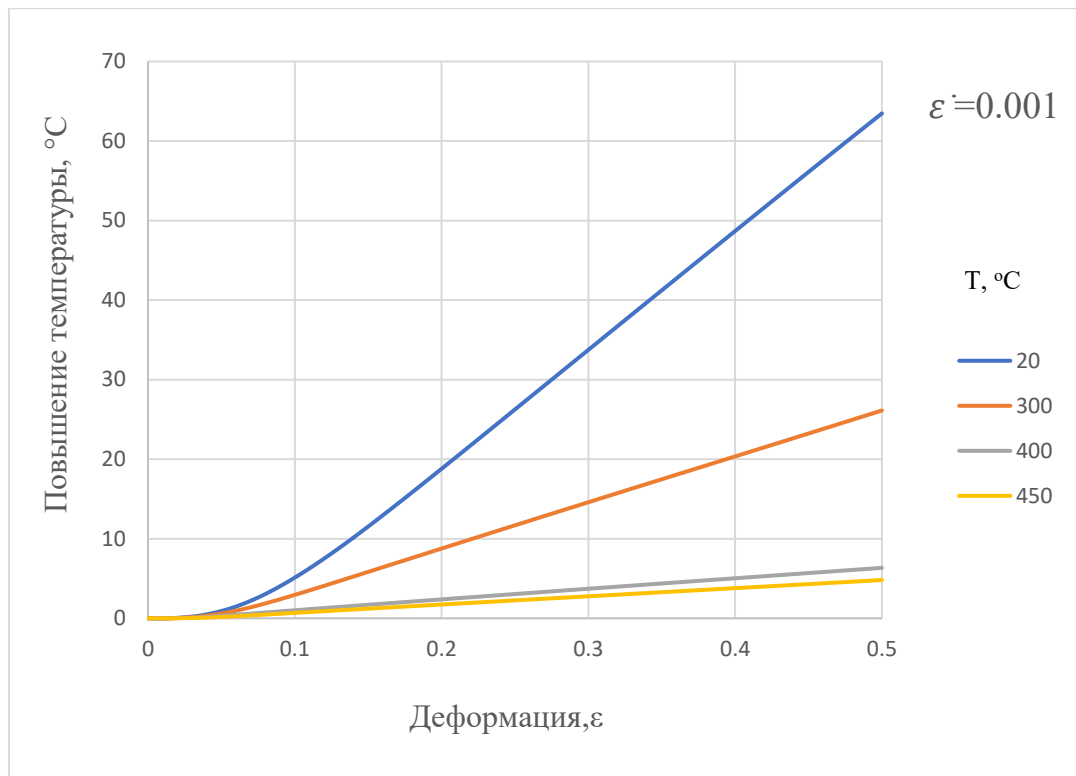
Полученные испытанием на сжатие зависимости увеличения температуры заготовки от величины деформации при различных температурах и скоростях деформации $\dot{\epsilon}$ представлены на рисунках 3.9 и 3.10 [80].



а)

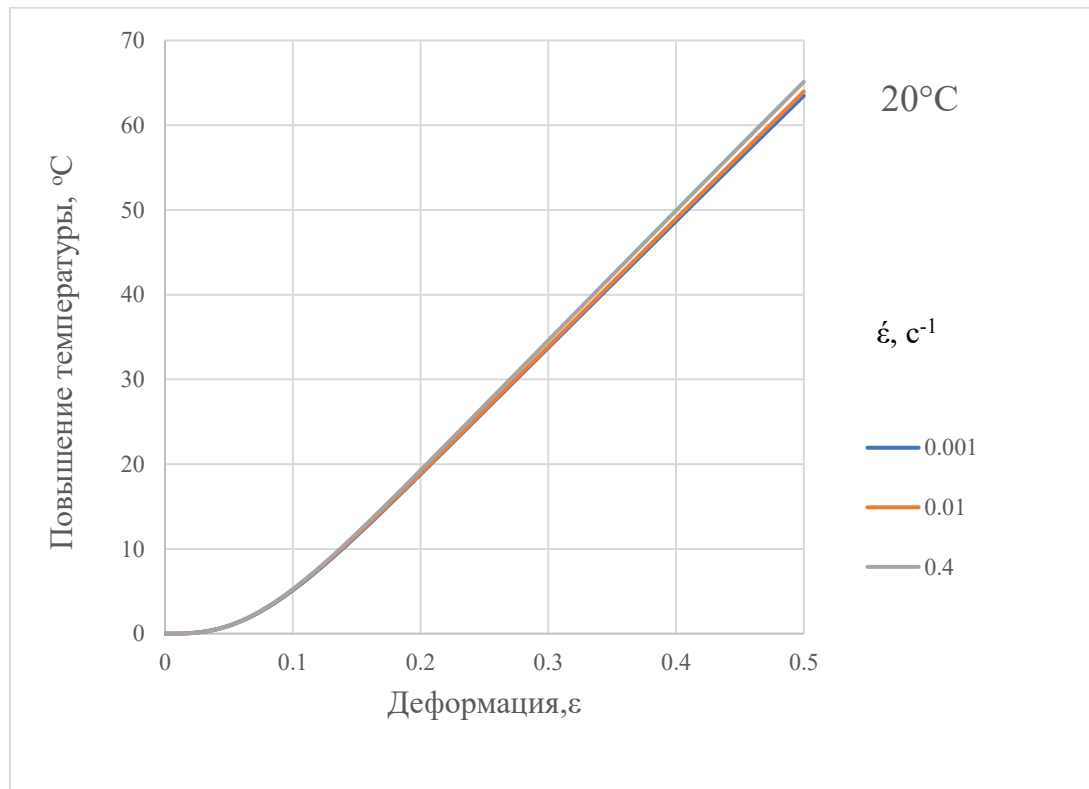


б)

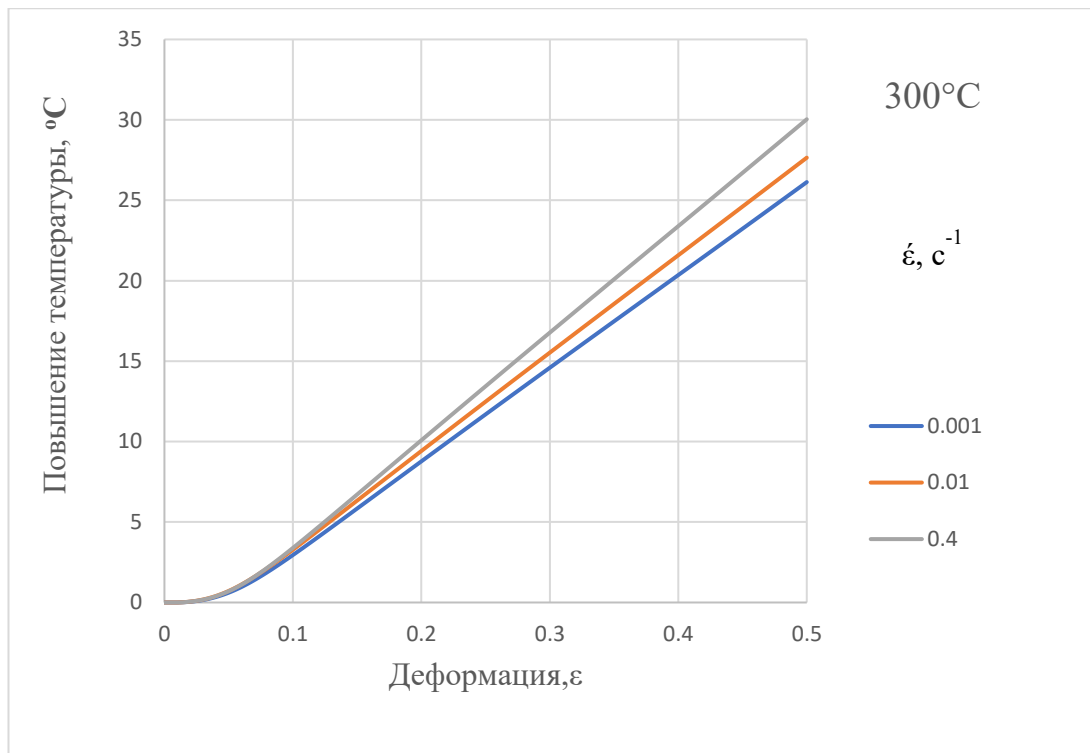


в)

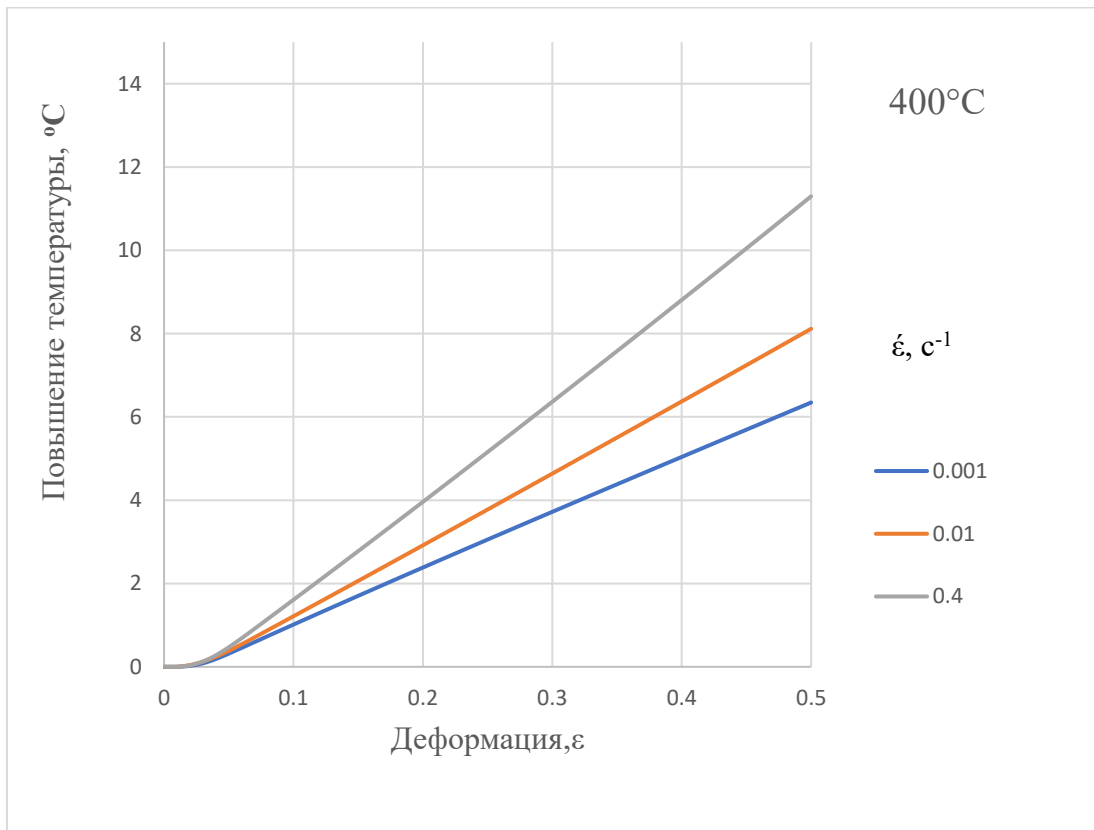
Рисунок 3.9 – Зависимости повышения температуры заготовки от величины деформации при различных температурах



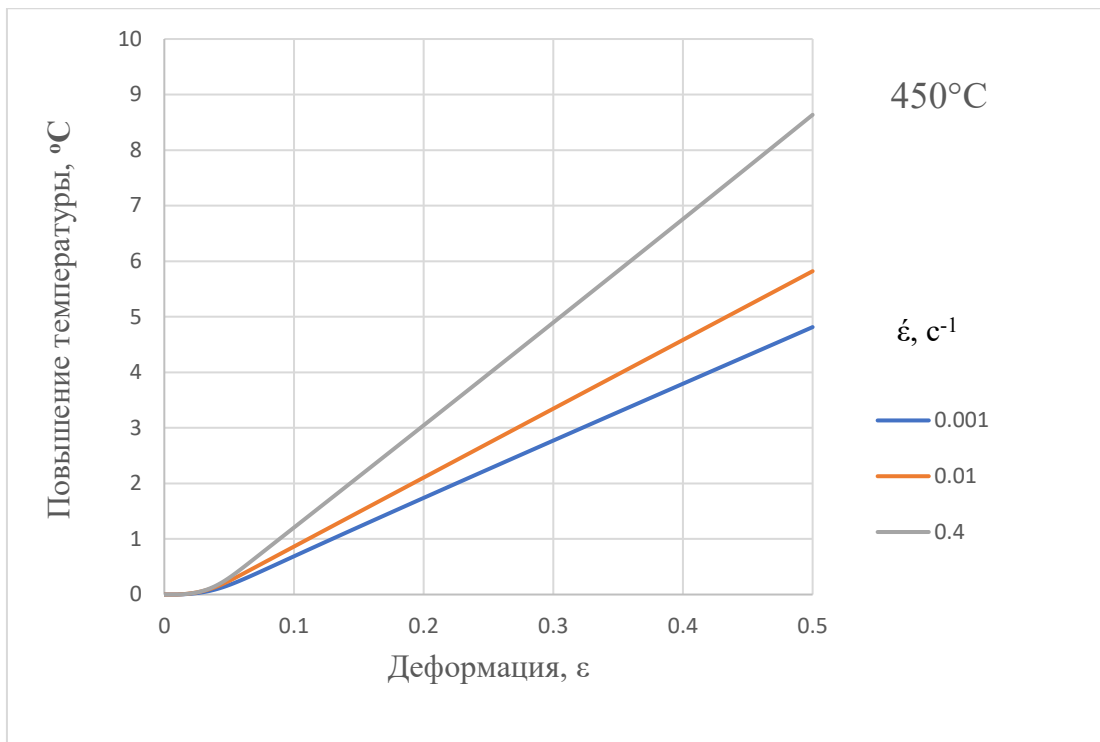
а)



б)

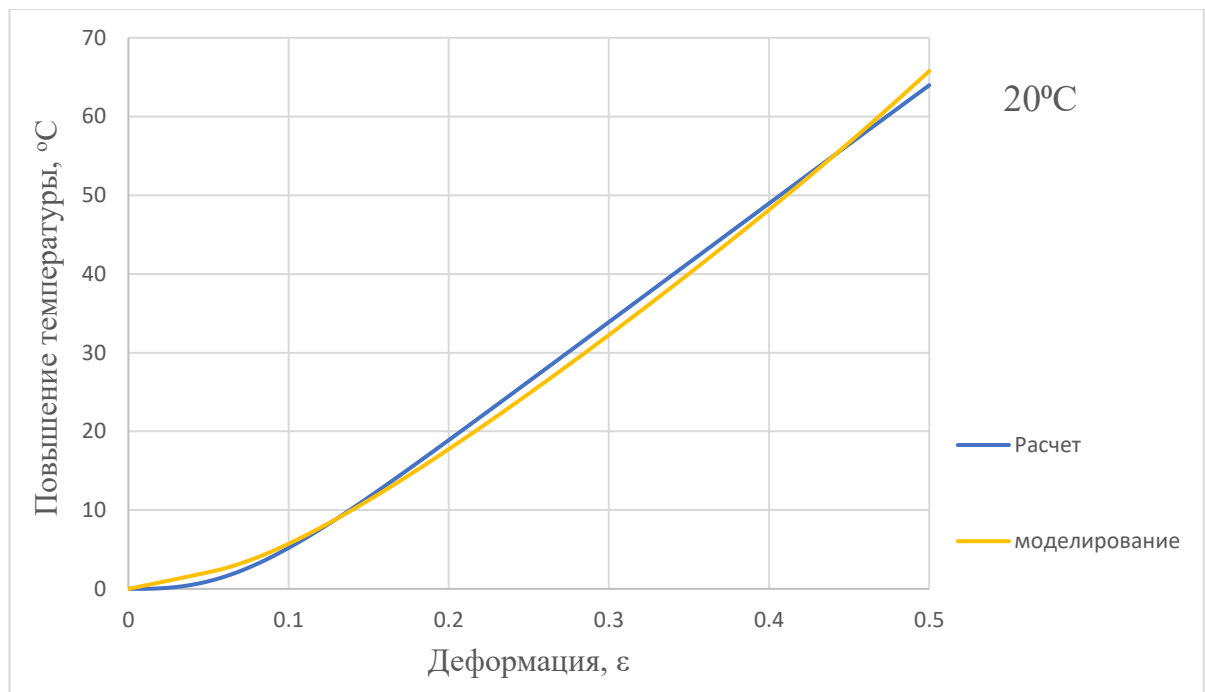


в)

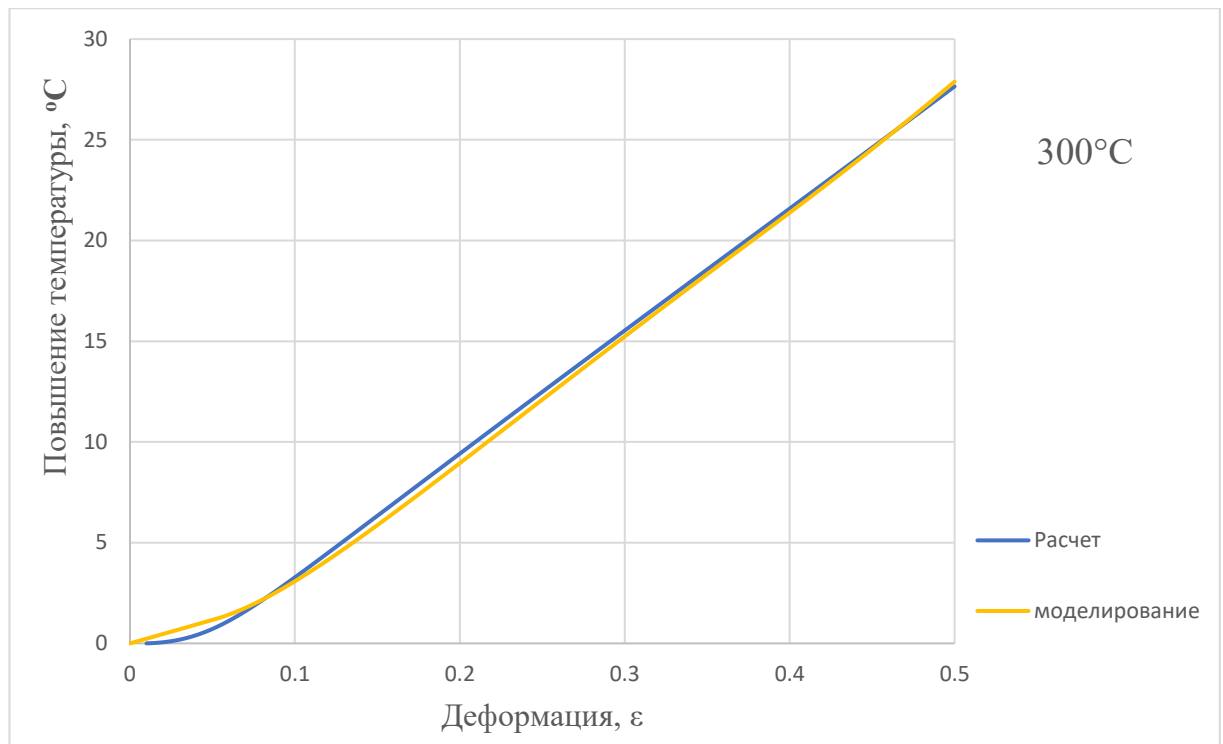


г)

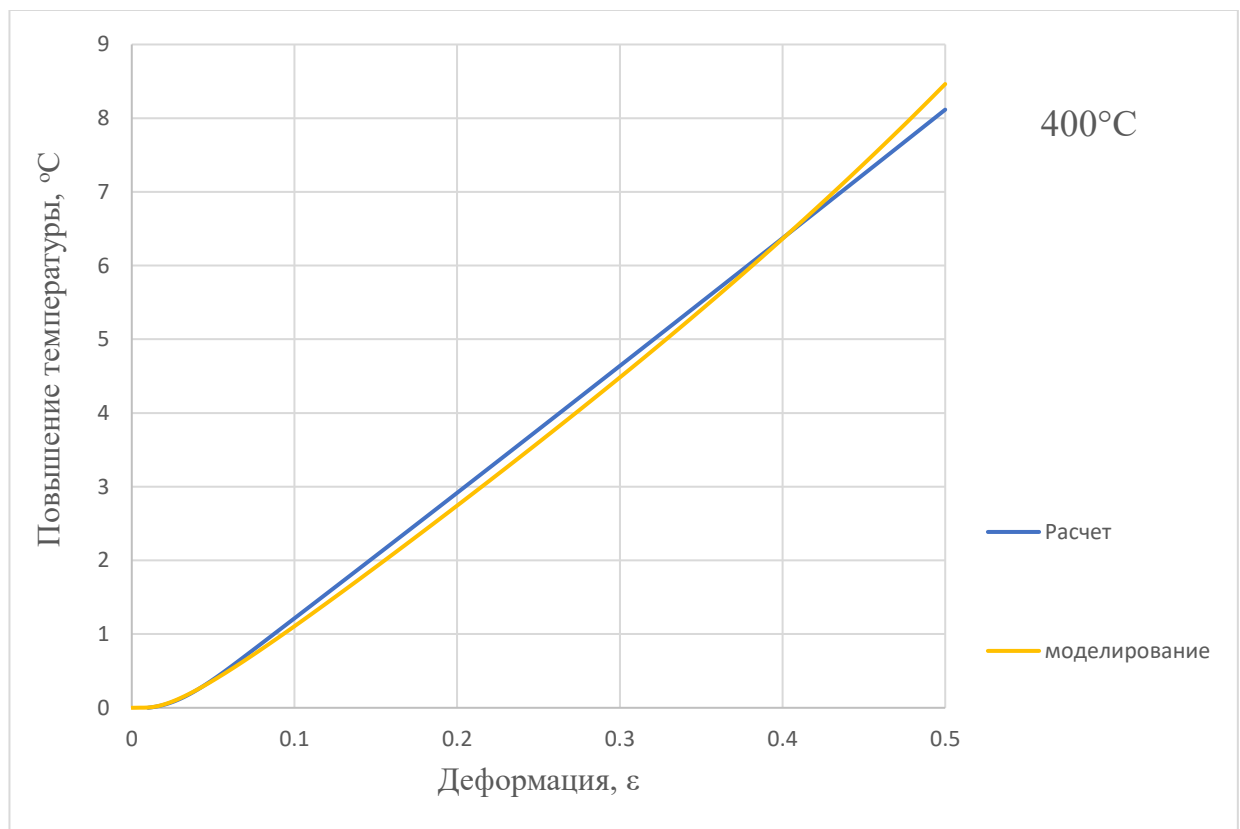
Рисунок 3.10 – Зависимости повышения температуры заготовки от величины деформации при различных скоростях деформации



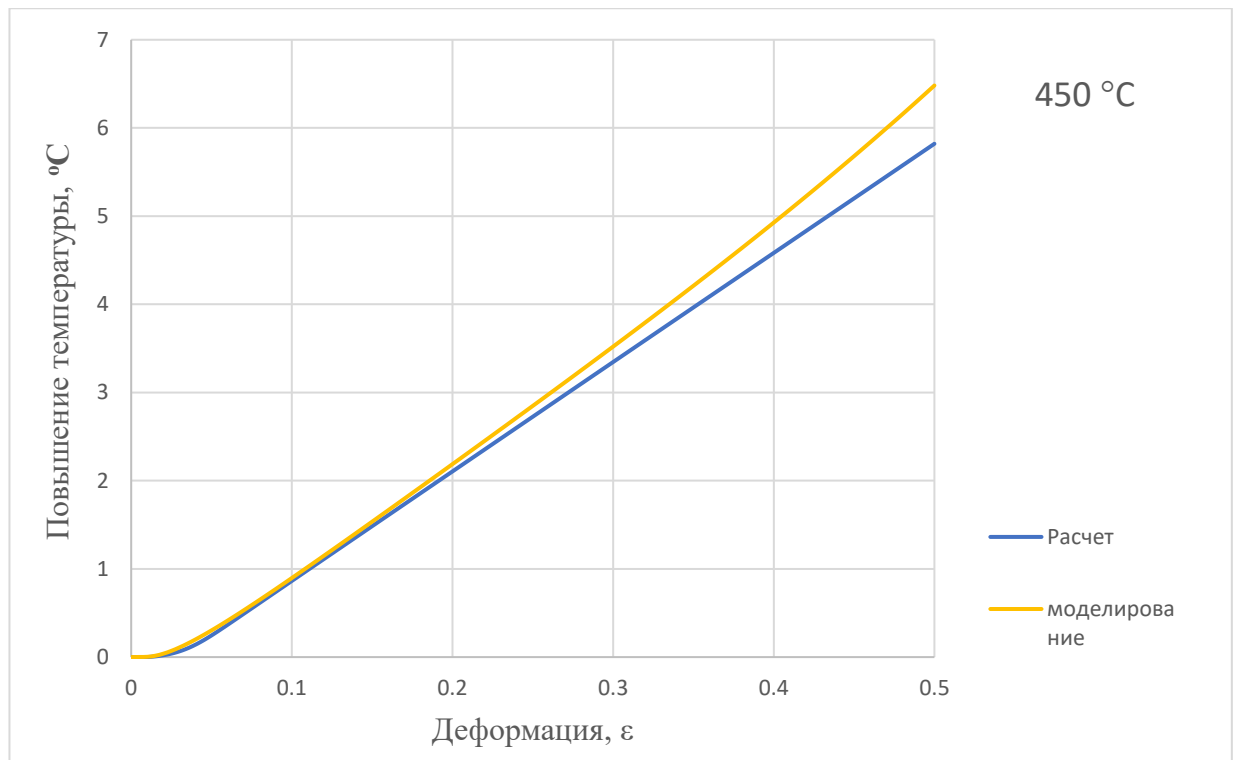
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных изменения температуры заготовки в зависимости от величины деформации

Как видно на рисунке 3.11, результаты определения температуры моделированием процесса формообразования алюминиевого сплава РС-356 с применением найденных коэффициентов (таблица 3.1-3.2) дают хорошее совпадение с экспериментальными данными с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,94$.

3.3. Расчет энергетических затрат при осадке заготовок из алюминиевого сплава РС-356 без кручения и с кручением

Для оценки энергетических затрат при осадке заготовок из алюминиевого сплава как без кручения, так и с кручением, был проведён расчет работы, выполненный на экспериментальном оборудовании.

Было принято, что общая энергия, необходимая для процесса деформирования определяется на основе уравнения баланса работ [43, 81]:

- при осадке без кручения

$$A = A_{\Pi} = \varepsilon P h_0 \quad (3.9)$$

- при осадке с кручением

$$A = A_{\Pi} + A_k \quad (3.10)$$

$$A_{\Pi} = \varepsilon \sigma V = \varepsilon P h_0 \quad (3.11)$$

$$A_k = M \omega t \quad (3.12)$$

где A - работа полной деформации; A_{Π} - работа ползуна прессы; A_k - работа кручения; $\varepsilon = \ln(h_0/h)$ - деформация; h_0, h - исходная и текущая высота образца (мм); σ - напряжение (МПа), зависящее от температуры, величины и скорости деформации; P - сила деформирования; M - крутящий момент, Н.м; ω - угловая скорость, рад/с; t - время деформации; V - объем очага деформации

На основе кинематического анализа и уравнений состояния в соответствии с теорией течения в работе [82] получены соотношения для расчета касательного напряжения τ [83]:

$$\tau = \sigma_0 \frac{\gamma(1 - \varepsilon)}{3R\varepsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot \rho \quad (3.13)$$

где σ_0 - интенсивность напряжений; ε - относительная деформация осадки; ρ - расстояние от оси z до рассматриваемой точки в поперечном сечении заготовки; γ - угловая деформация на поверхности заготовки ($\rho = R$), Δ - коэффициент накопленной деформации

$$\Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma^2(1 - \varepsilon)^2}{R^2 \varepsilon^2} \rho^2} \quad (3.14)$$

$$\gamma = \frac{\omega t}{h_0 - h} \cdot R \quad (3.15)$$

Деформирующие нагрузки — сила сжатия P и крутящий момент M , в соответствии со статическими уравнениями равновесия [84], принимают вид:

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma \rho d\rho \quad (3.16)$$

$$M = 2\pi \int_0^R \tau \rho^2 d\rho \quad (3.17)$$

При $\rho = R$ текущий радиус заготовки равен,

$$R = R_0 \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (3.18)$$

где R_0 - исходный радиус заготовки;

Формулы (3.14), (3.15) принимают вид:

$$\Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2}} = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\omega^2 t^2 R_0^2}{h_0^2 \varepsilon^2 (1-\varepsilon)}} \quad (3.19)$$

$$\gamma = \frac{\omega t}{h_0 (1-\varepsilon)} \cdot R_0 \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (3.20)$$

Крутящий момент примет вид:

$$M = \frac{2\pi}{9} \sigma_0 \gamma \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot R_0^4 \quad (3.21)$$

3.4. Моделирование процесса осадки составных изделий из алюминиевого сплава РС-356.

В соответствии с методикой, представленной в разделе 2.2.10, было проведено численное моделирование процесса осадки составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356 с использованием программного комплекса QForm. При этом применялись предварительно определённые девять коэффициентов модели Хензеля–Шпиттеля (таблица 3.1). Полученные результаты представлены на рисунках 3.12–3.14.

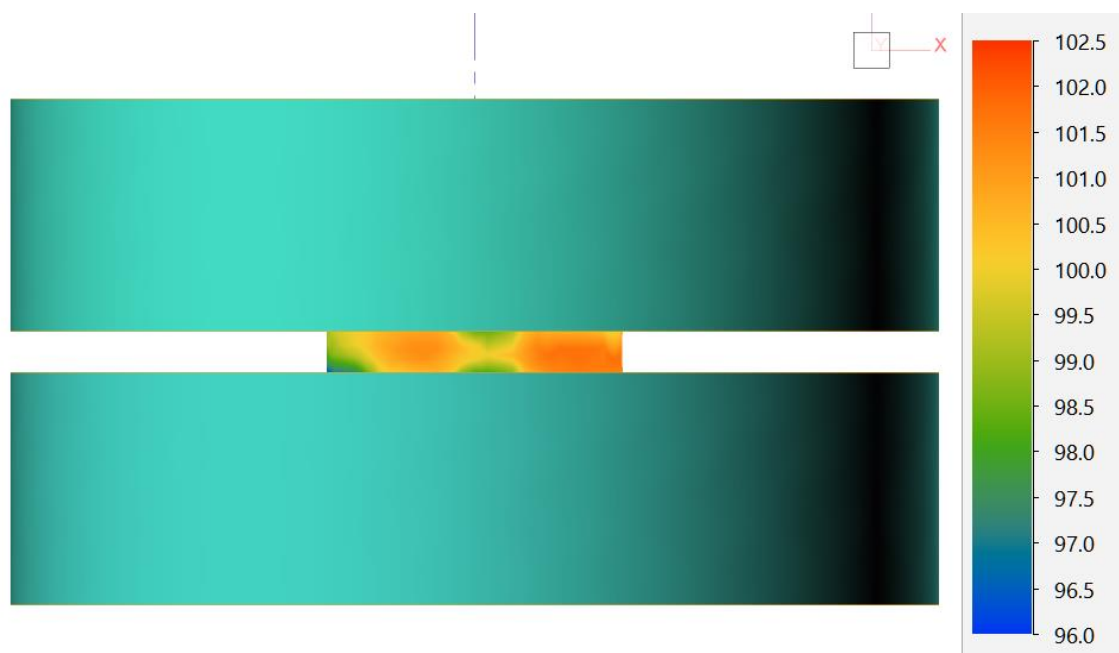


Рисунок 3.12 – Распределение температуры заготовки после первого перехода (нагрев до 250 °С, осадка до высоты 5,35 мм)

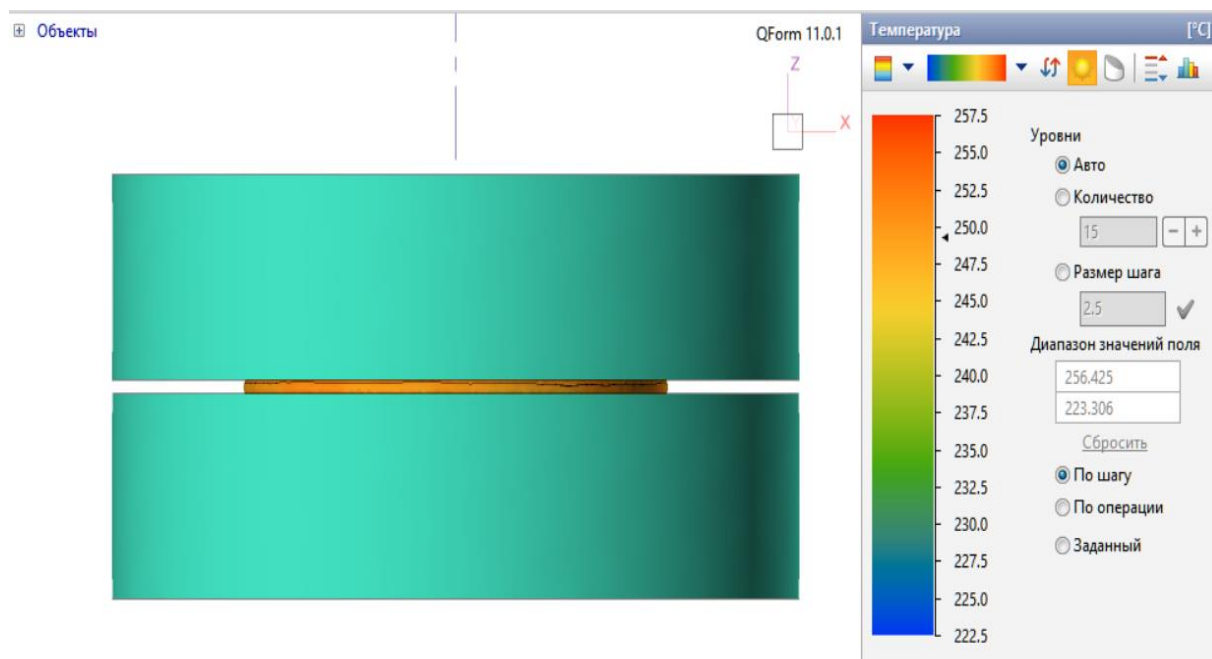


Рисунок 3.13 – Второй переход (нагрев до 350 °С, осадка до высоты 2 мм)

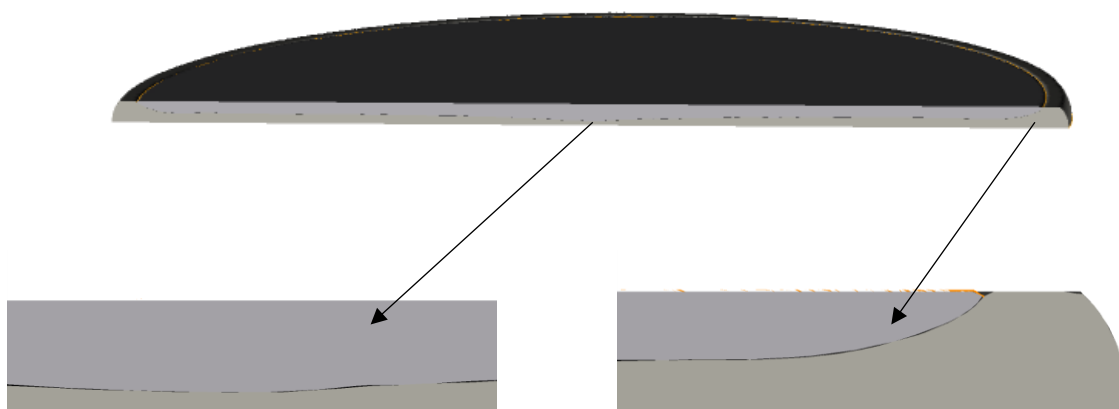


Рисунок 3.14 – Составное изделие из алюминиевого сплава PC-356
(моделирование)

Результаты численного моделирования процесса осадки с кручением составных заготовок из алюминиевого сплава PC-356 представлены на рисунках 3.15 и 3.16, которые включают данные о силовых характеристиках процесса - распределение температуры (а) и интенсивности напряжений (б) [85].

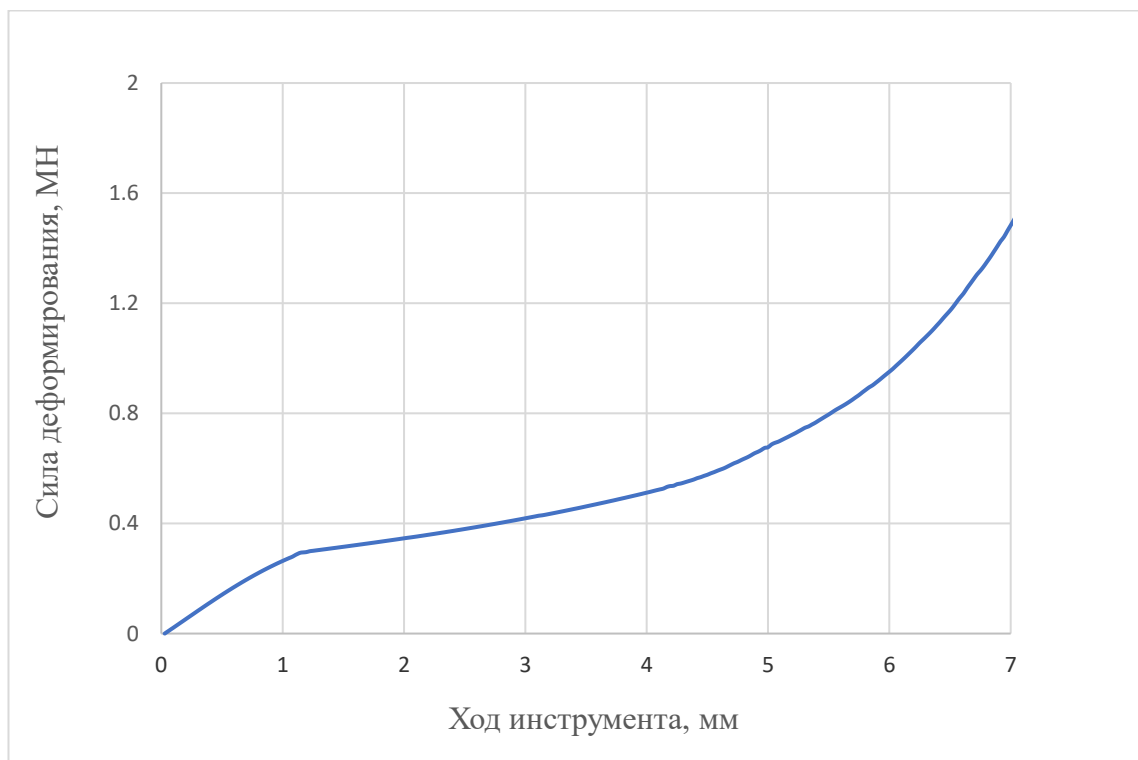
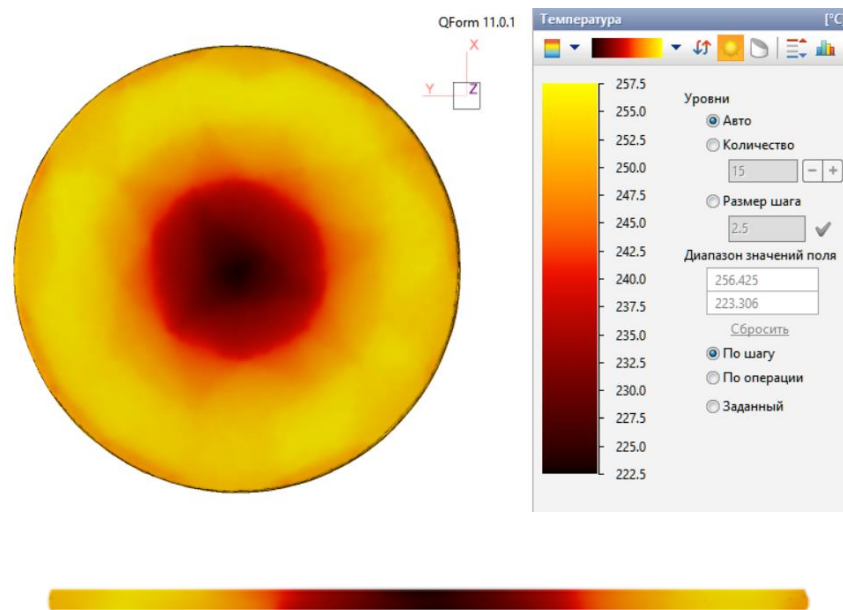
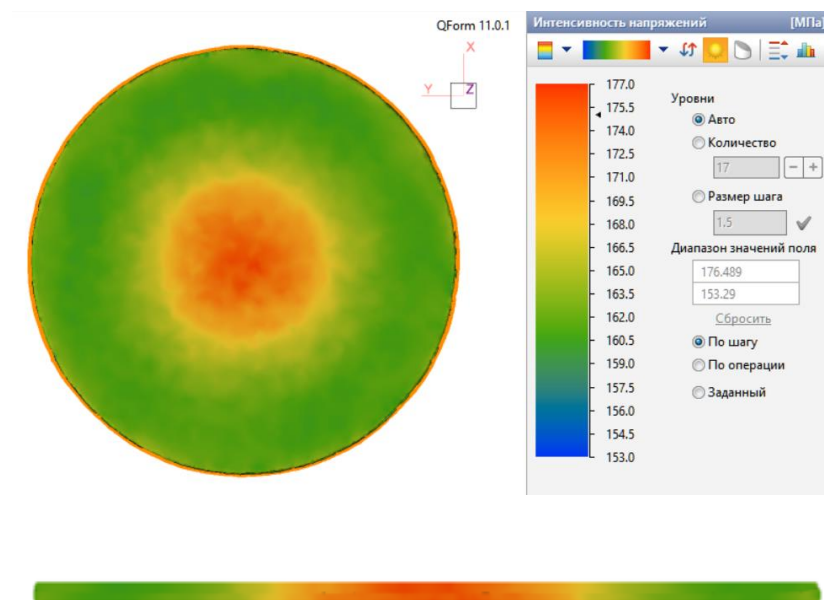


Рисунок 3.15 – Расчетные силы инструмента при моделировании



а)



б)

Рисунок 3.16 – Распределение температуры (а) и интенсивности напряжений (б) составной заготовки из алюминиевого сплава РС-356 при осадке с кручением.

При осадке составных заготовок из РС-356 до 2 мм, сила достигает 1,55 МН (рисунок 3.16), что позволяет проводить эксперименты на прессе модели ДБ-2432А силой в 1,6 МН (п.п 2.2.6). Температура в центре заготовка ниже,

чем в периферийной зоне, что связана с меньшей величиной деформации – 2,1 и 1,4 соответственно.

3.5. Моделирование процесса осадки с кручением составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0

Результаты моделирования процесса с использованием реологической модели алюминиевого сплава РС-356 с девятью неизвестными коэффициентами уравнения Хензеля – Шпиттеля (таблица 3.1) и модели титана BT1-0 [29] в программе QForm, выполненного в соответствии с методикой, описанной в главе 2 (подпункт 2.2.11), показаны на рисунках 3.17 – 3.20.

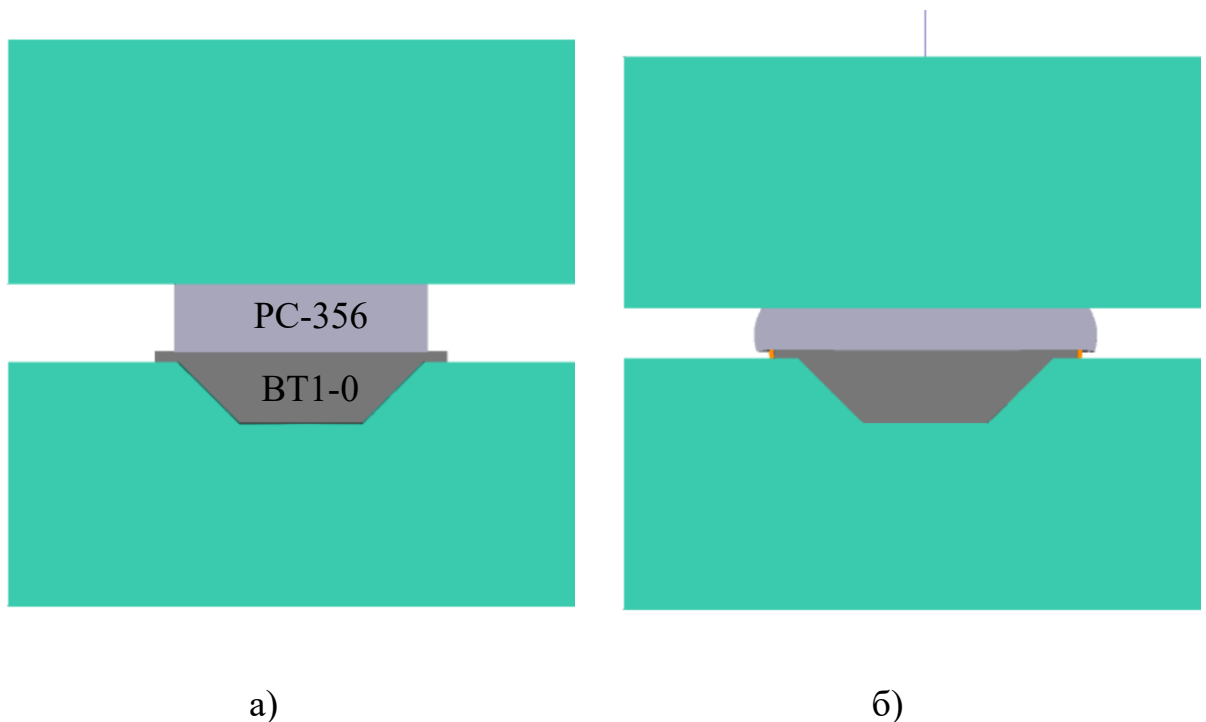


Рисунок 3.17 – Моделирование осадки с кручением составного изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0 до (а) и после (б) осадки

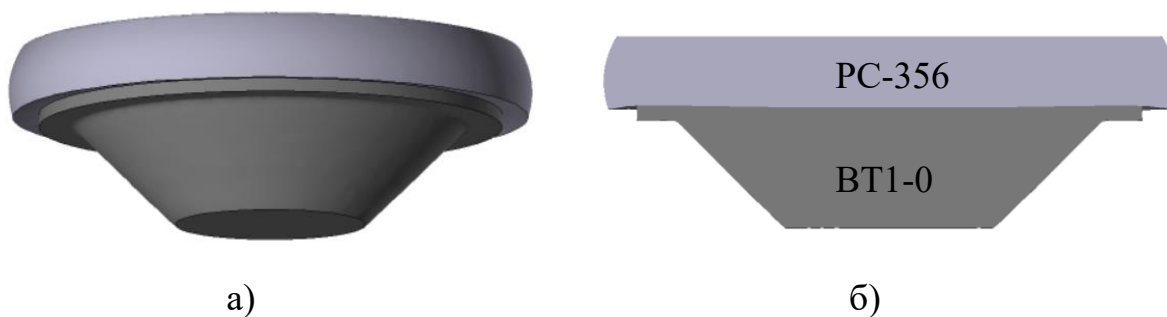


Рисунок 3.18 – Составное изделие из алюминиевого сплава PC-356 и титана BT1-0 при моделировании (а) и его сечение (б)

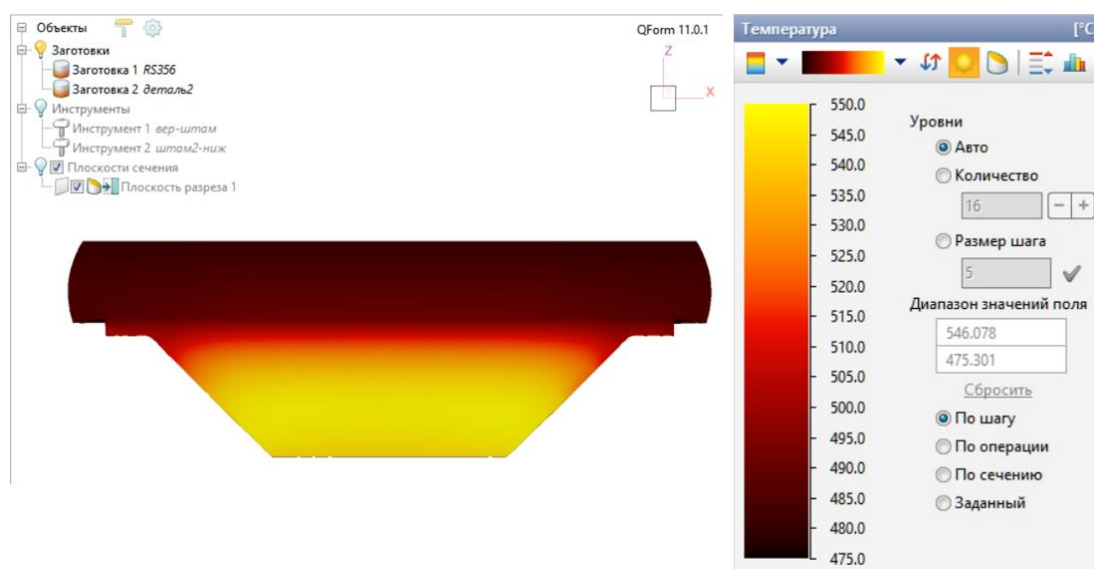


Рисунок 3.19 – Распределение температуры составного изделия из алюминиевого сплава PC-356 и титана BT1-0

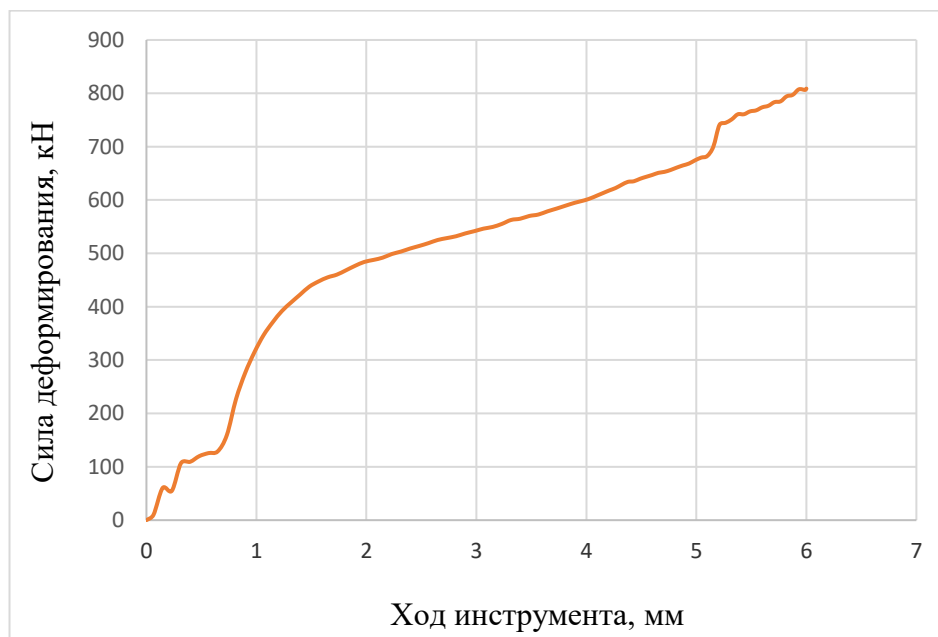


Рисунок 3.20 – Расчетная сила деформирования (моделирование)

Как видно на рисунке 3.19, температура верхней заготовки (РС-356) снижается за счет теплопередачи тепла верхнему инструменту, а титан ВТ1-0 находится в нагреваемой матрице, что позволяет сохранить высокую температуру. Сила осадки достигает 800 кН.

Выводы по 3 главе

1. Построены реологические модели алюминиевого сплава РС-356 на основе уравнения Хензеля – Шпиттеля с использованием пяти и девяти коэффициентов. Проведена проверка точности моделей с применением оценочных критериев (3.3–3.5).

2. Определены расчетные значения температуры заготовок в процессе пластической деформации методом осадки с кручением.

3. Представлены результаты конечно-элементного моделирования в программной среде QForm, а также рассчитаны силовые и температурные параметры процесса формообразования составных заготовок из сплава РС-356 с использованием моделей Хензеля – Шпиттеля.

4. Выполнено моделирование процесса осадки с кручением составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0. Получены расчётные значения силовых параметров и температур в среде QForm.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Получение индикаторных диаграмм алюминиевого сплава РС-356.

По результатам проведения испытаний образцов сплава РС-356 сжатием (подпункт 3.1) были получены индикаторные диаграммы «сила деформирования» – «перемещение траверсы испытательной машины» (рисунок 4.1).

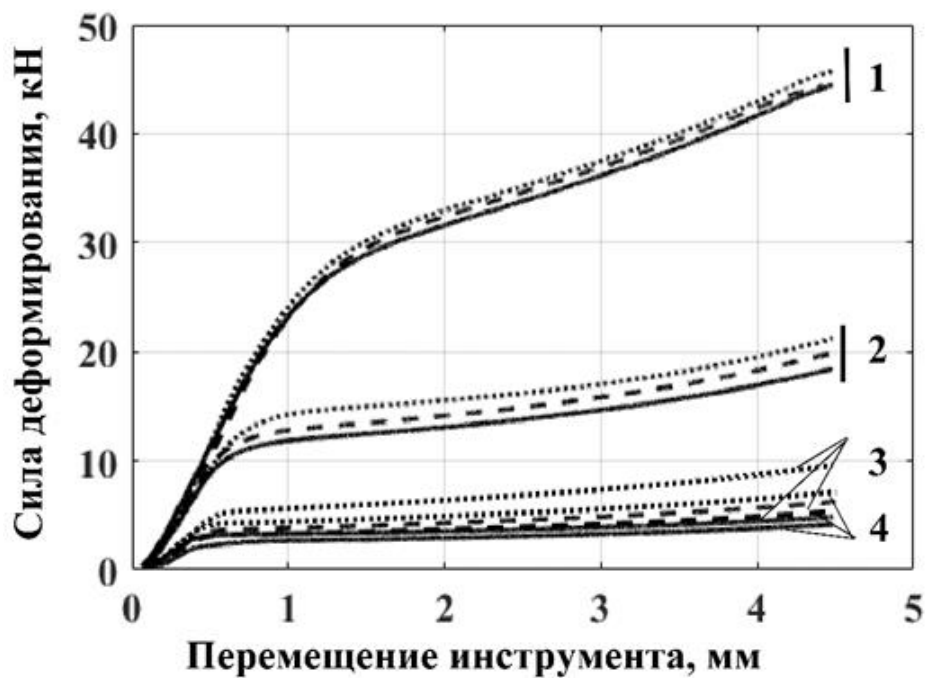


Рисунок 4.1 – Индикаторные диаграммы, полученные при сжатии образцов из сплава РС-356

1 – 20 °C; 2 – 300 °C; 3 – 400 °C; 4 – 450 °C;

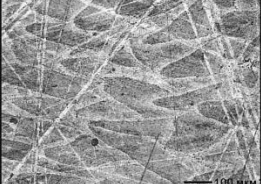
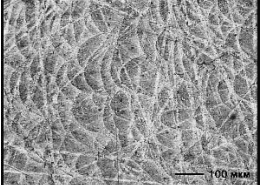
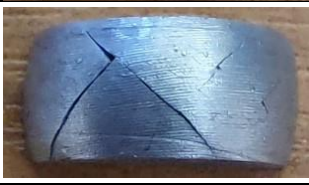
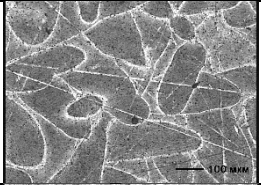
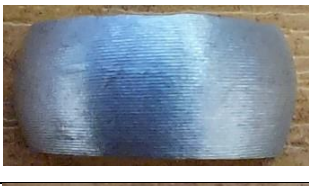
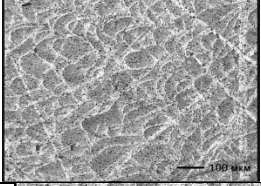
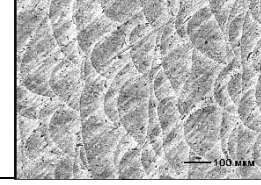
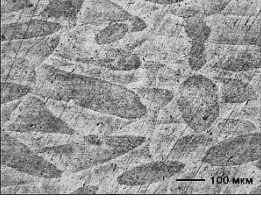
— - 0,001 c⁻¹; - - - 0,01 c⁻¹; - 0,4 c⁻¹

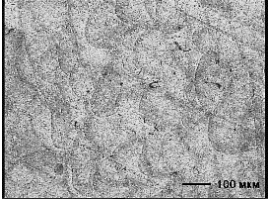
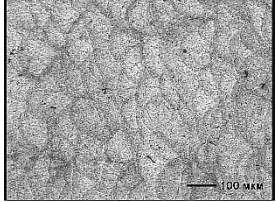
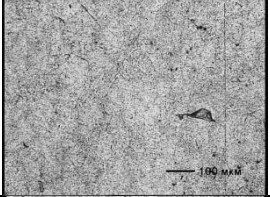
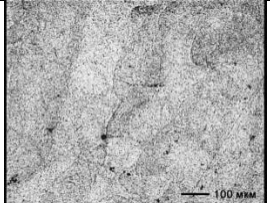
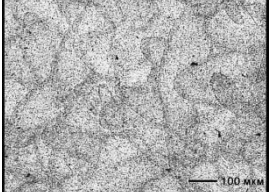
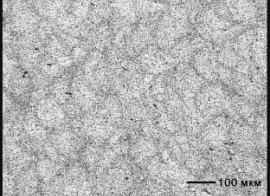
Кривые текучести, рассчитываемые по индикаторным диаграммам, скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения [46].

4.2. Изучение изменения структур при пластической деформации заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Результаты исследования структурообразования при пластической деформации заготовок из алюминиевого сплава РС-356 показаны на таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние термомеханических режимов осадки на структуру алюминиевого сплава РС-356

№ образца	Фото образца после испытания на сжатие	Температура образца, °C	Величина деформации, ε	Скорость деформации, $\dot{\varepsilon}$	Микроструктура, увеличение x100
1		20	0,48	0,001	
2		20	0,45	0,01	
3		20	0,48	0,4	
4		300	0,56	0,001	
5		300	0,46	0,01	
6		300	0,31	0,4	

7		400	0,46	0,001	
8		400	0,34	0,01	
9		400	0,48	0,4	
10		450	0,63	0,001	
11		450	0,62	0,01	
12		450	0,54	0,4	

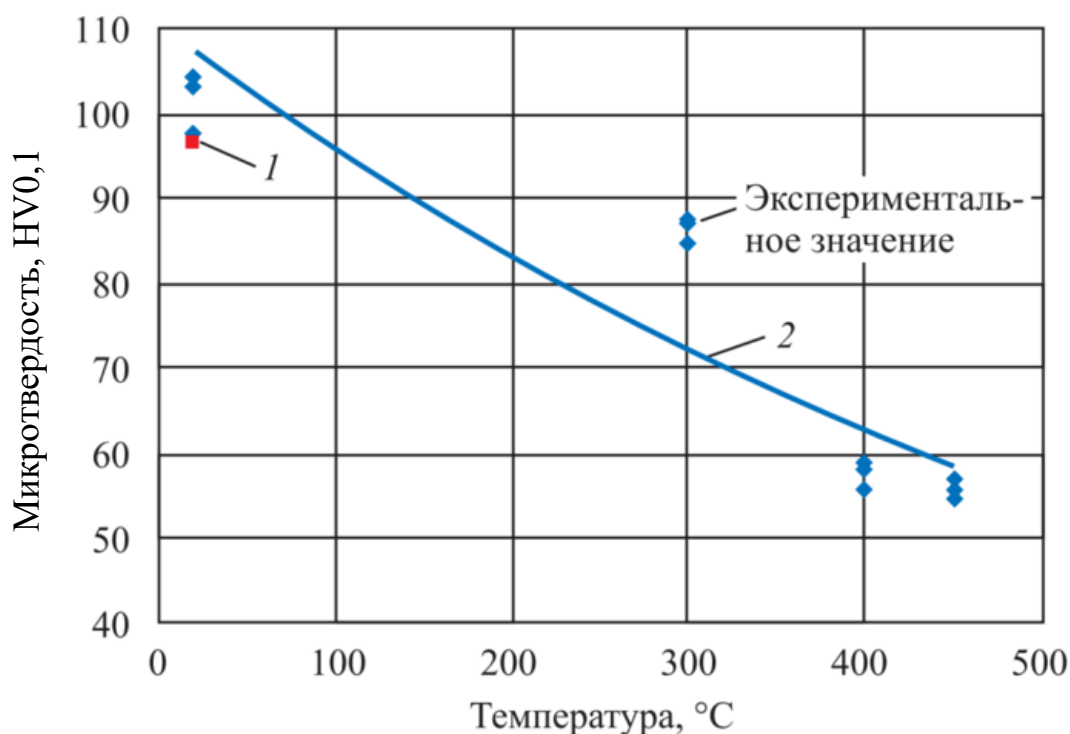


Рисунок 4.2 – Изменение микротвердости в зависимости от температуры осадки:

1 – твердость исходного образца при 20 °C (маркер красного цвета);

2 – твердость образцов после испытаний (аппроксимация)

Исследование микротвердости по методу Виккерса с нагрузкой на индентор 100 г показало существенное влияние температуры, при которой деформировались заготовки (рисунок 4.2). Так, например, при температуре деформирования заготовки 450 °C твердость снижается практически в 2 раза. Показатели твердости согласуются с данными других авторов [86]. Зависимость микротвердости ($HV_{0,1}$) от температуры (T) пластической деформации может быть аппроксимирована функцией вида:

$$HV_{100} = 110,85e^{-0,001T} \quad (4.1)$$

Точность аппроксимации оценивается величиной коэффициента детерминации $R^2 = 0,8274$, что позволяет описать 82,74 % наблюдений в диапазоне температуры от 20 до 450 °C.

4.3. Исследование энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Результаты исследования энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356, проведенного согласно представленной в подпункте 2.2.9 методике, показаны в рисунках 4.3 – 4.6.

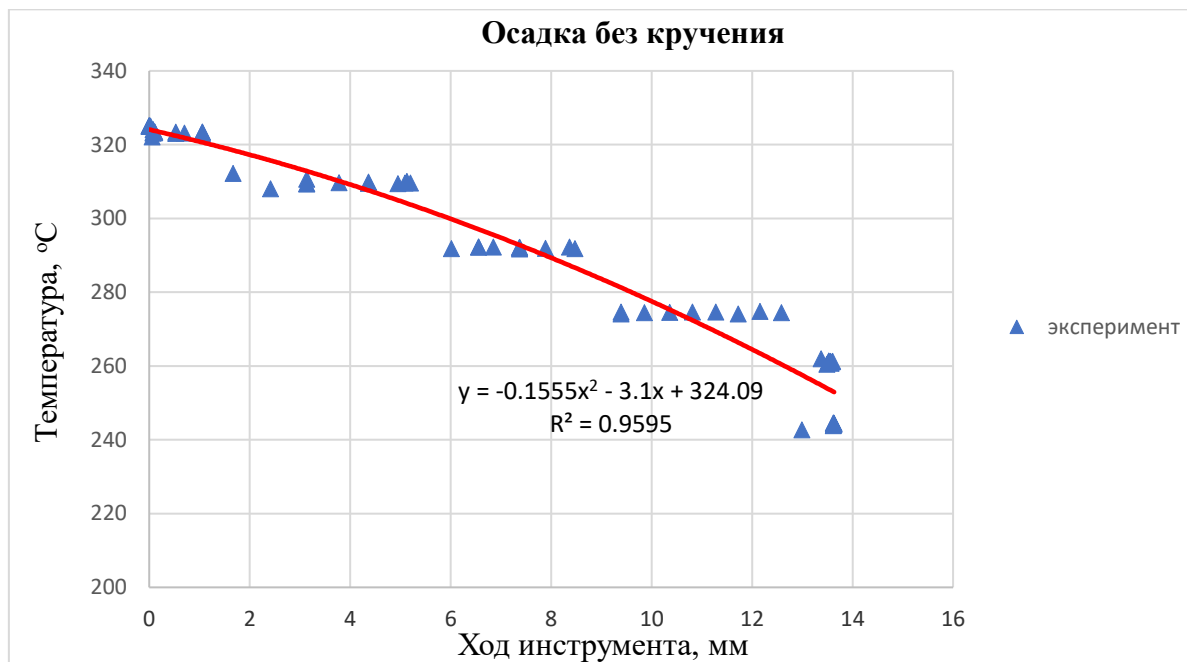


Рисунок 4.3 – Тепловой эффект процесса осадки заготовок без кручения из алюминиевого сплава РС-356

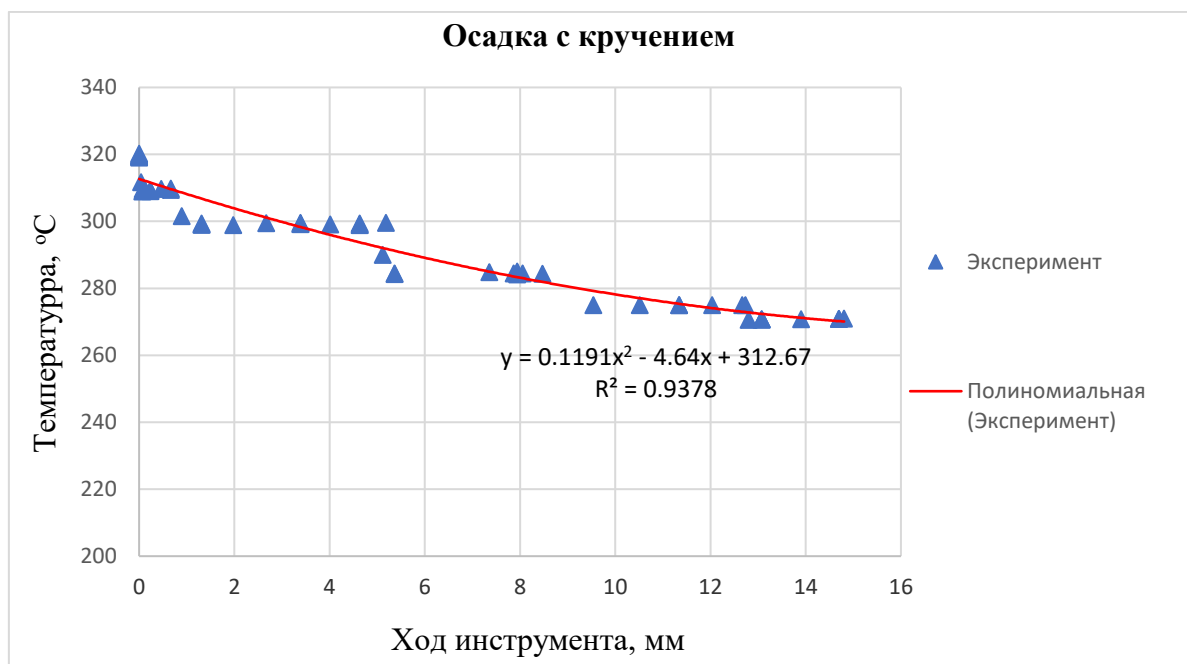


Рисунок 4.4 – Тепловой эффект процесса осадки с кручением заготовок из алюминиевого сплава РС-356

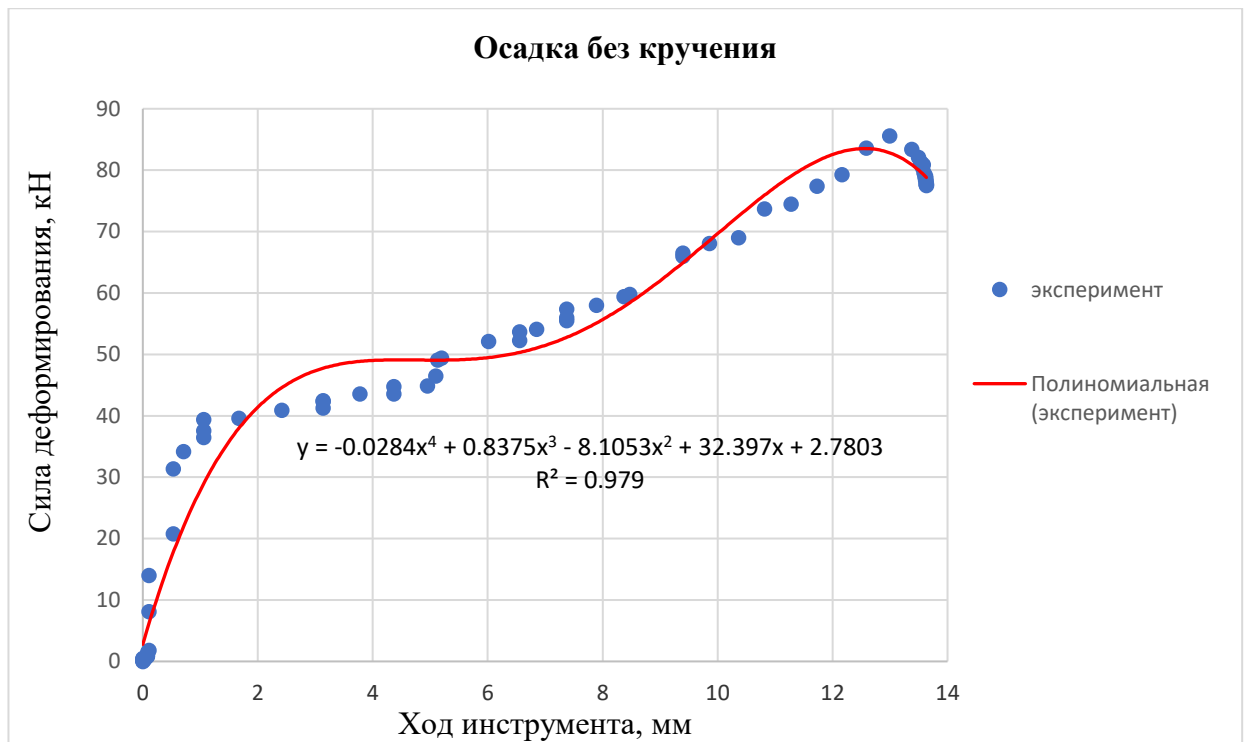


Рисунок 4.5 – График силовых параметров процесса осадки без кручения заготовок из алюминиевого сплава РС-356

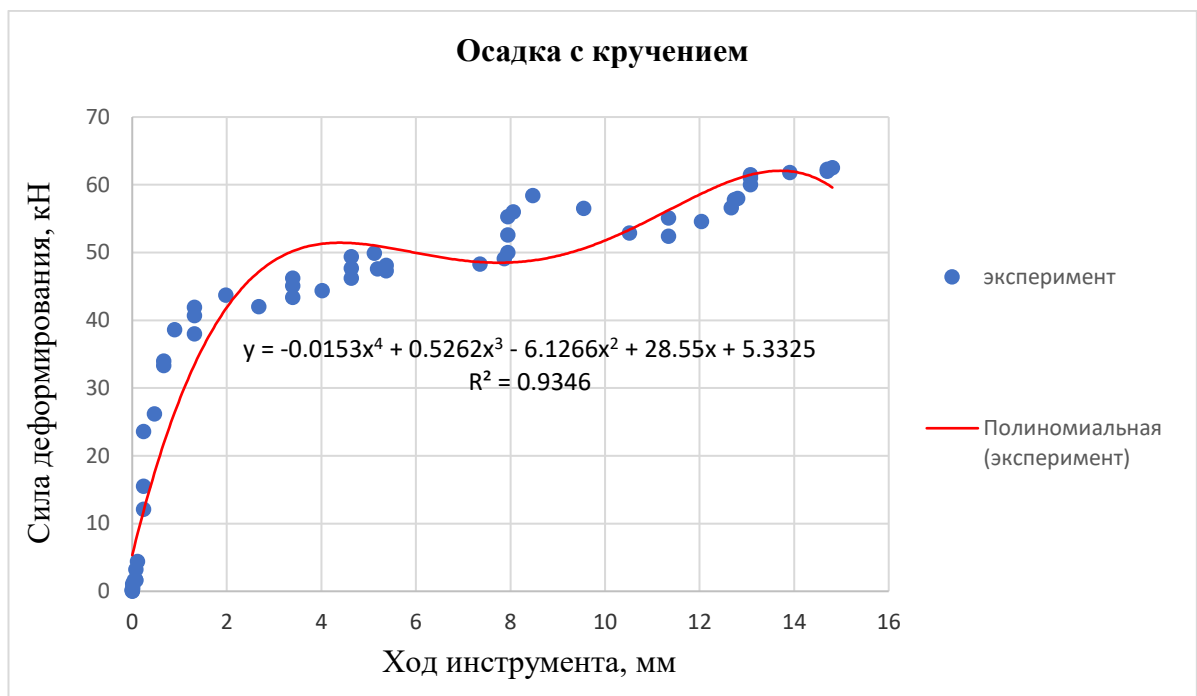


Рисунок 4.6 – График силовых параметров процесса осадки с кручением заготовок из алюминиевого сплава РС-356

При осадке с кручением температура заготовок в конце процесса более высокая (270 °С) по сравнению с осадкой без кручения (250 °С), что позволяет снизить силы осадки на 30%.

4.4. Получение составных изделий из алюминиевого сплава РС-356

Эксперименты по получению составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 проведены по методике, представленной в подпункте 2.2.9. На рисунке 4.7 показаны полученные составные изделия.

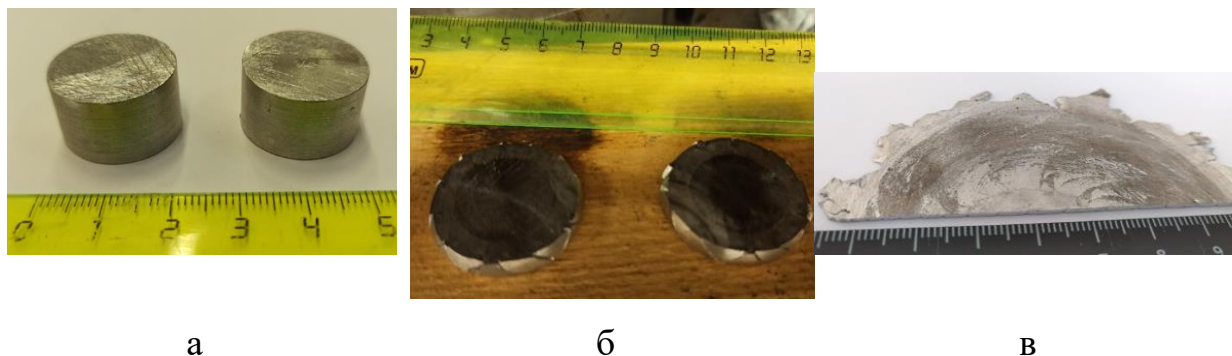


Рисунок 4.7 – Заготовки из алюминиевого сплава РС-356 до (а) и после (б) первого перехода, сечение составного изделия (в)

На основании данных эксперимента построен график зависимости силы деформации от хода инструмент (рисунок 4.8), которая достигает величины 1,2 МН.

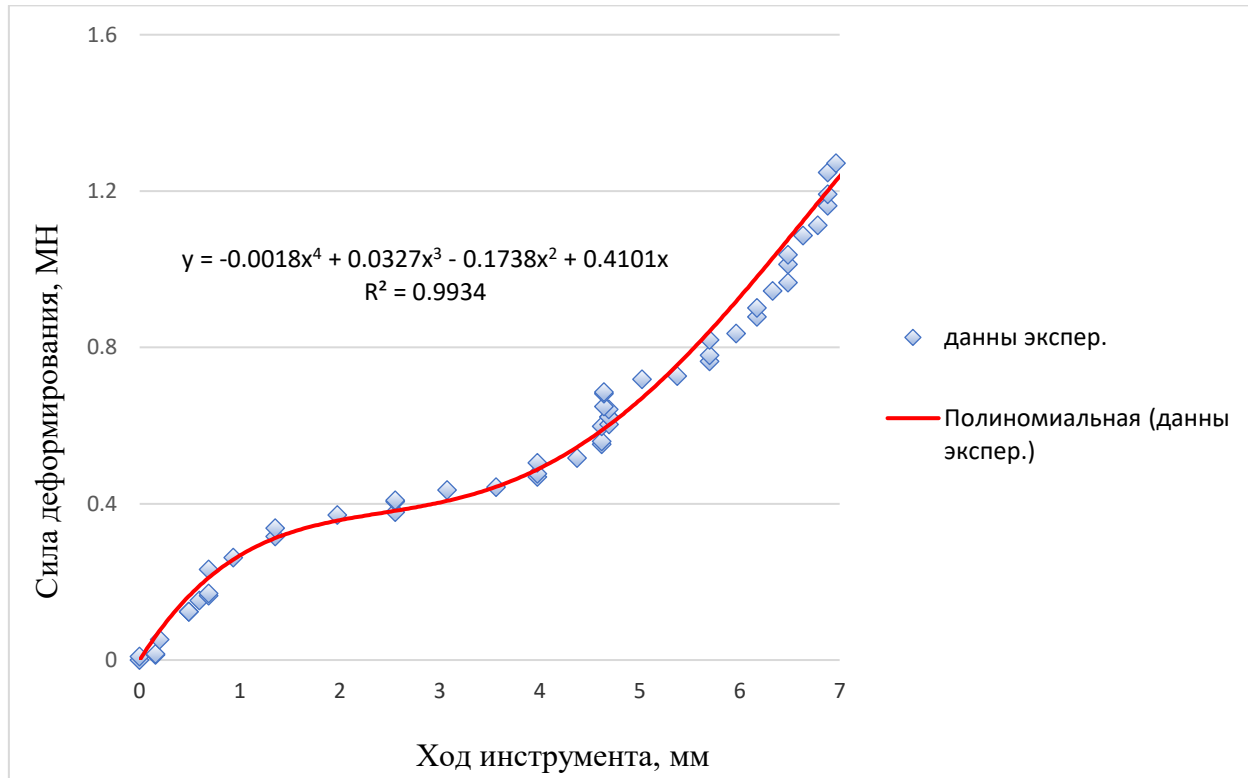


Рисунок 4.8 – График экспериментальных значений силы деформирования от хода инструмента при получении составных изделий из сплава РС-356

4.5. Изготовление составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0

На рисунке 4.9 показаны составные изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0, полученные согласно методике, представленной в подпункте 2.2.11.

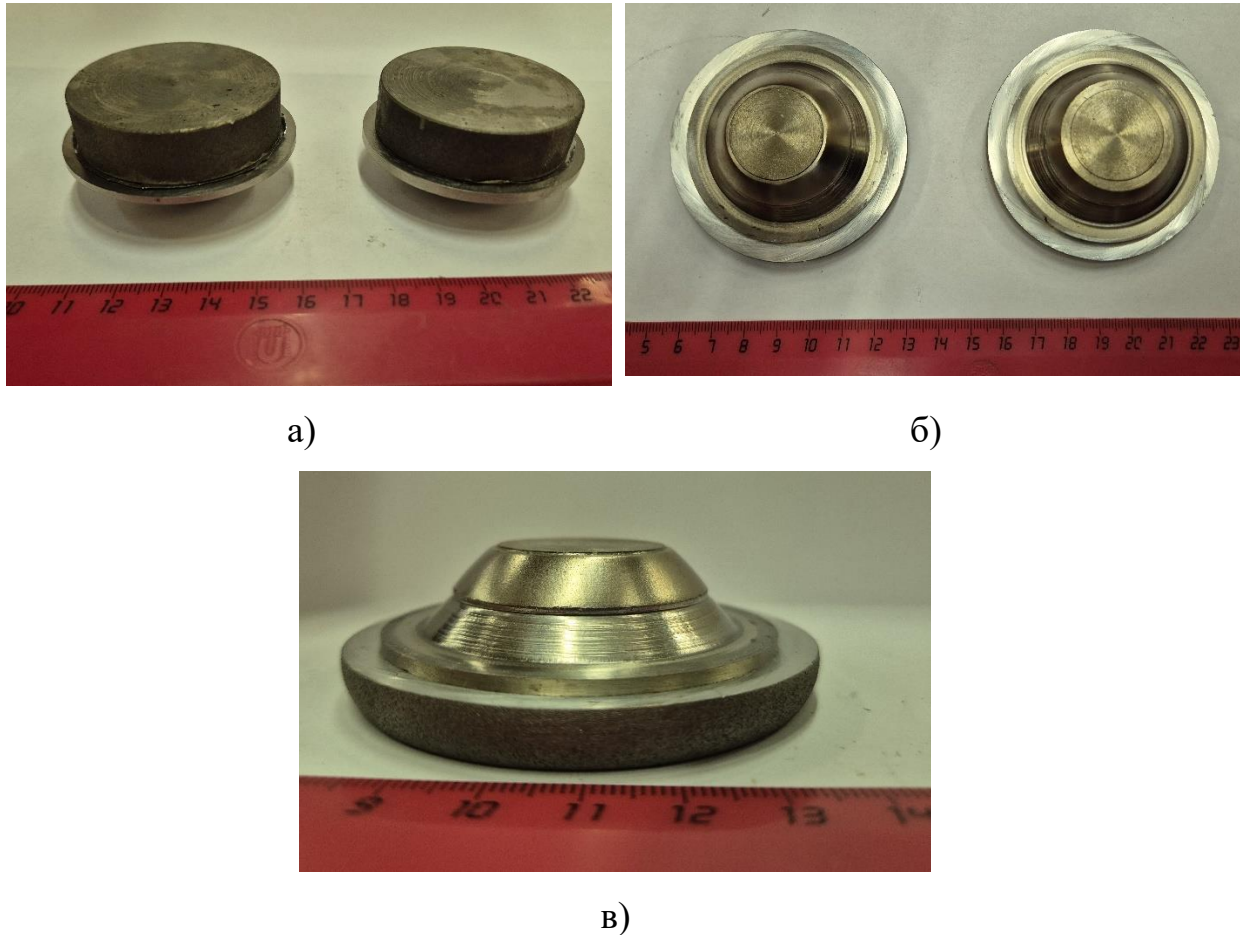


Рисунок 4.9 – Заготовки из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 до осадки (а) и изделия после осадки с кручением (б,в)

На основании данных эксперимента построен график зависимости силы деформирования от хода инструмента (рисунок 4.10) при формообразовании изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0.

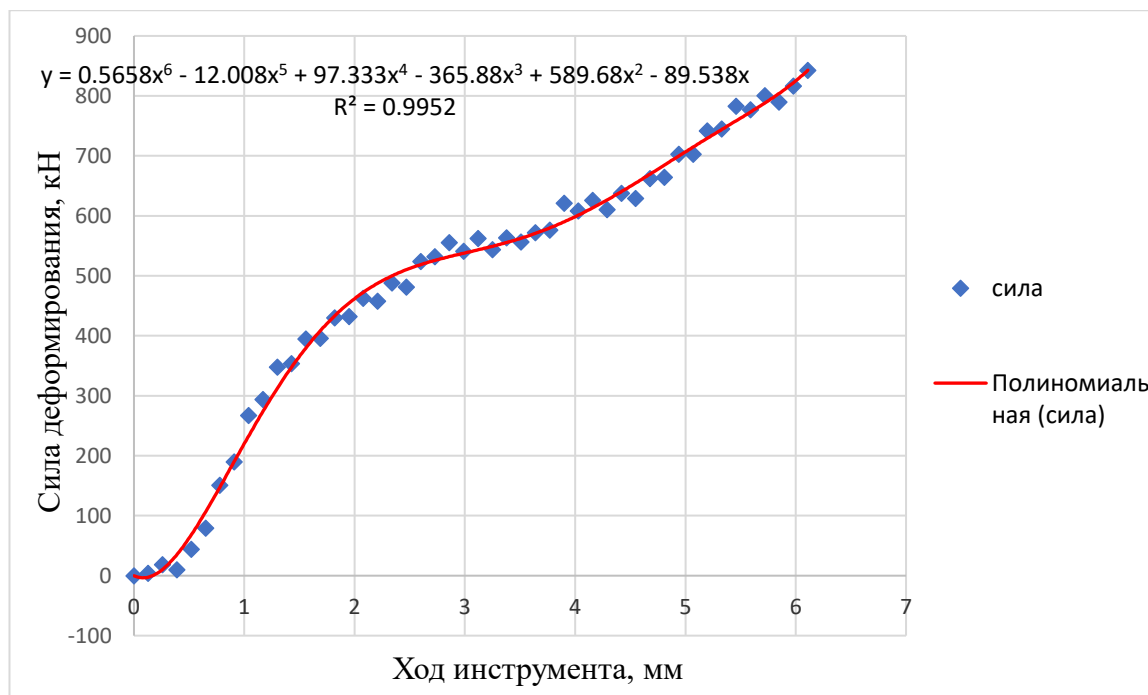


Рисунок 4.10 – График экспериментальных значений силы деформирования от хода инструмента при формообразовании изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0.

Выводы по 4 главе

1. Показаны образцы и индикаторные диаграммы «ход» - «сила деформирования» при сжатии цилиндрических образцов из алюминиевого сплава РС-356 с различными величинами скоростей и температур.
2. Показаны микроструктуры алюминиевого сплава РС-356 после сжатия, в диапазоне температур от 20 до 450 °С при скоростях деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹. Установлено, что необходимо проводить анализ их микроструктуры как до, так и после обработки давлением при различных температурах и скоростях деформации для корректного определения режимов деформации заготовок.
3. Получены результаты изготовления составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 осадкой с кручением за два перехода, причем на

первом переходе выполняли сжатие каждого из двух образцов отдельно нагретыми в печи до температуры 250°C между плоскими бойками до высоты 5,35 мм без вращения пуансона, а перед повторной деформацией собирался пакет из двух осаженных заготовок, который нагревали до температуры 350 °C и выполнили сжатие пакета с кручением с осевой скоростью 2 мм/сек с углом поворота 144 градуса до толщины 2,0 мм.

4. Представлены результаты исследования силовых и температурных параметров процессов изготовления составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 осадкой с кручением с целью изученной их влияния на процесс пластического формообразования.

5. Получены составные изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением. Представлены результаты изучения микроструктуры и микротвердости в зоне соединения.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЕТОВ

5.1. Анализ реологических моделей алюминиевого сплава РС-356

На рисунках 5.1 и 5.2 показаны результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов со различными скоростями деформации при применении моделей с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами (формулы (3.1) и (3.2)). Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента позволил оценить значения ошибки S (формула 3.4) и коэффициента детерминации R^2 (формула 3.5).

В среднем ошибка S в диапазоне температур 20 - 300°C не превышает 6,9 %; в диапазоне температур 400 - 450°C – 9,7 %. Значения коэффициента детерминации R^2 в диапазоне температур 20-300 °C – 0,97; в диапазоне температур 400-450 °C – 0,95 (рисунок 5.1). Полученная модель позволяет достаточно точно прогнозировать напряжения при значениях скорости 0,4 – 0,01 сек⁻¹ и величине деформации до 0,5.

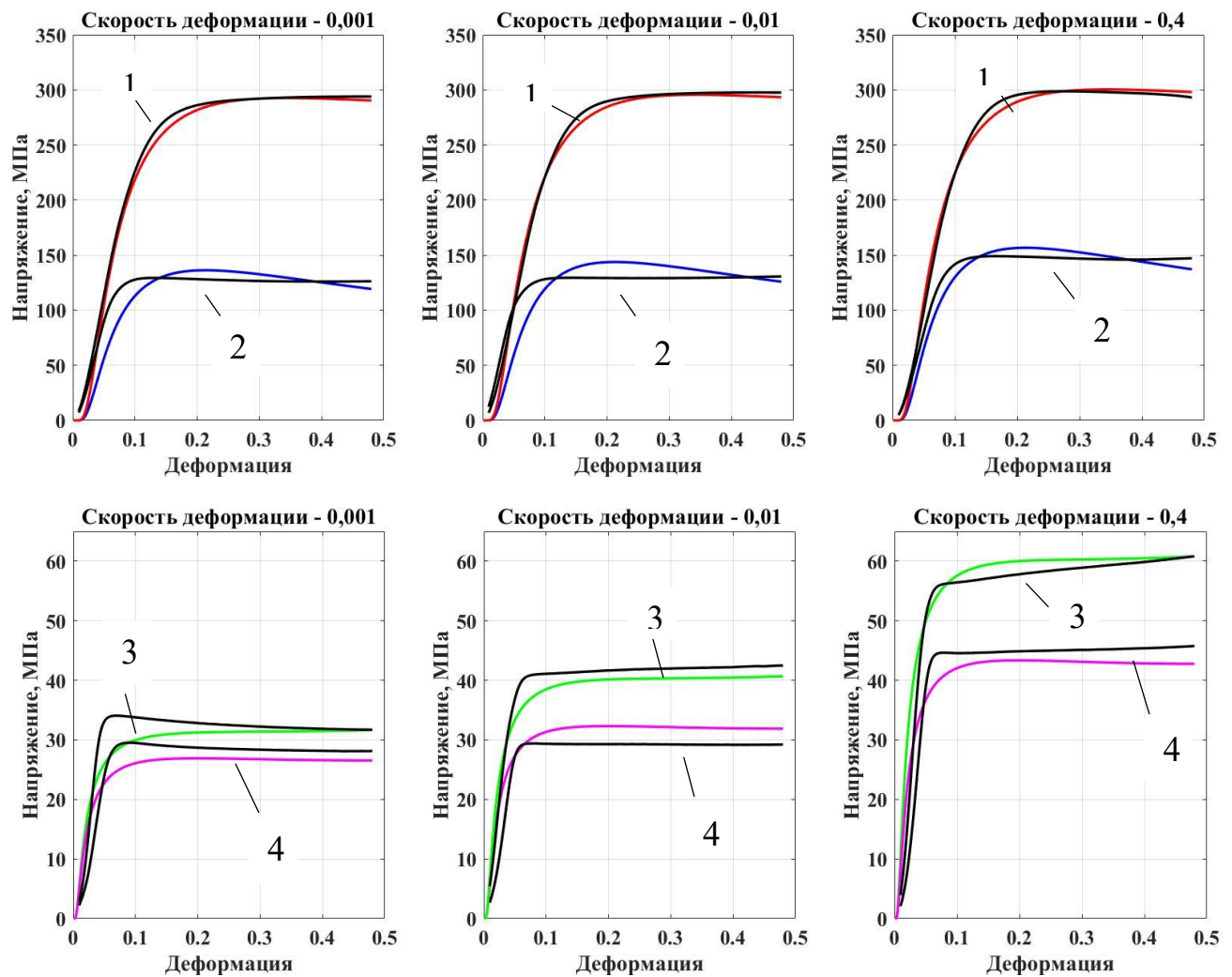


Рисунок 5.1 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений (модель с 9-ю неизвестными коэффициентами) напряжения текучести σ при сжатии образцов с различными скоростями деформации $\dot{\epsilon}$:

- данные эксперимента (1- 20 °C; 2- 300 °C; 3- 400 °C; 4- 450 °C)
- результаты расчета по формуле (2) при 20 °C
- результаты расчета по формуле (2) при 300 °C
- результаты расчета по формуле (2) при 400 °C
- результаты расчета по формуле (2) при 450 °C

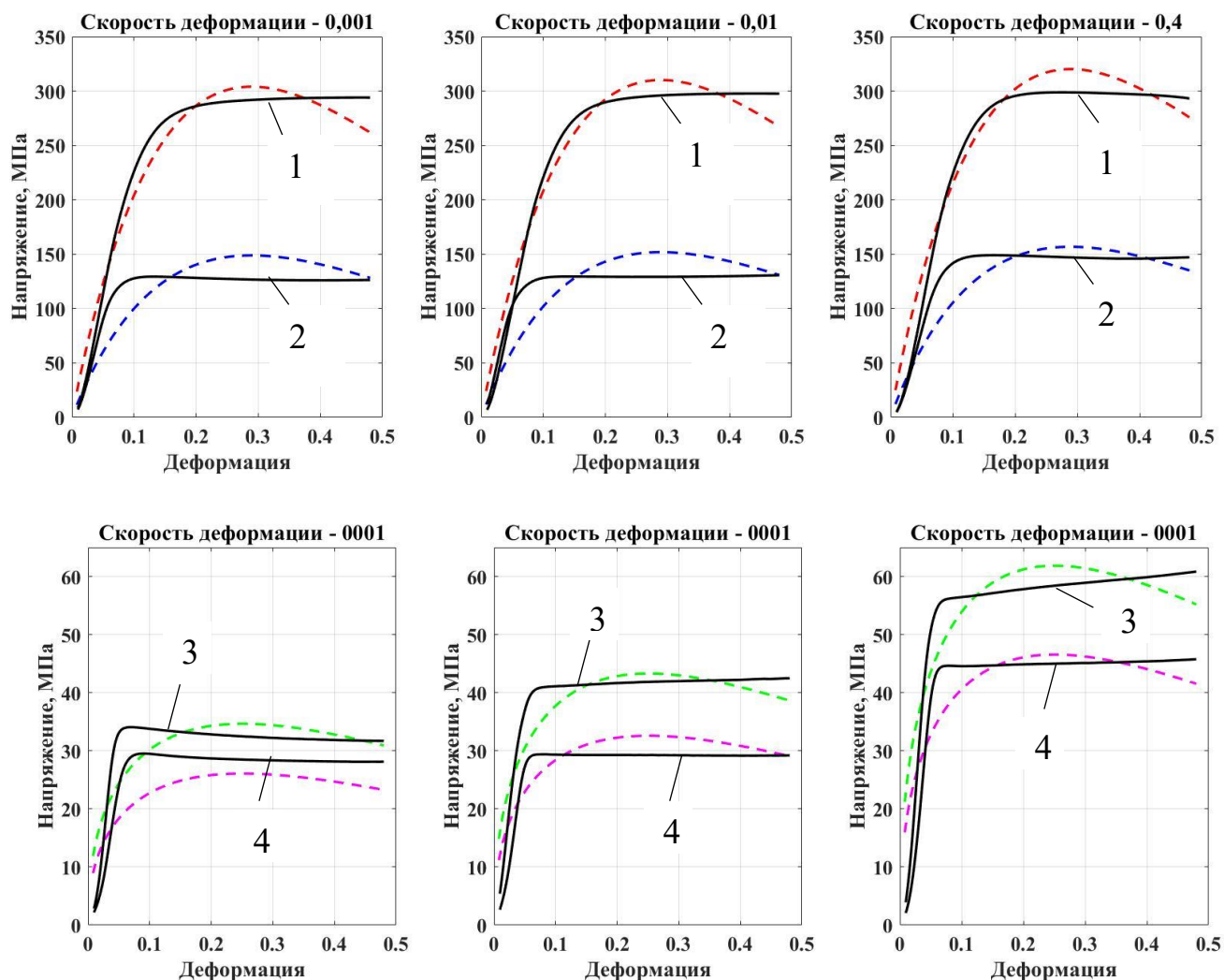


Рисунок 5.2 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений (модель с 5-ю неизвестными коэффициентами) напряжения текучести σ при сжатии образцов со различными скоростями деформации $\dot{\epsilon}$:

— данные эксперимента (1- при 20 °С; 2- при 300 °С; 3- при 400 °С; 4- при 450 °С)

--- результаты расчета по формуле (2) при 20 °С

--- результаты расчета по формуле (2) при 300 °С

--- результаты расчета по формуле (2) при 400 °С

--- результаты расчета по формуле (2) при 450 °С

Как показано на рисунке 5.2, в среднем ошибка S в диапазоне температур 20-300 °С не превышает 14,2 %; в диапазоне температур 400-450 °С – 11,7 %. Значения коэффициента детерминации R^2 в диапазоне температур 20-300 °С – 0,96; в диапазоне температур 400-450 °С – 0,92.

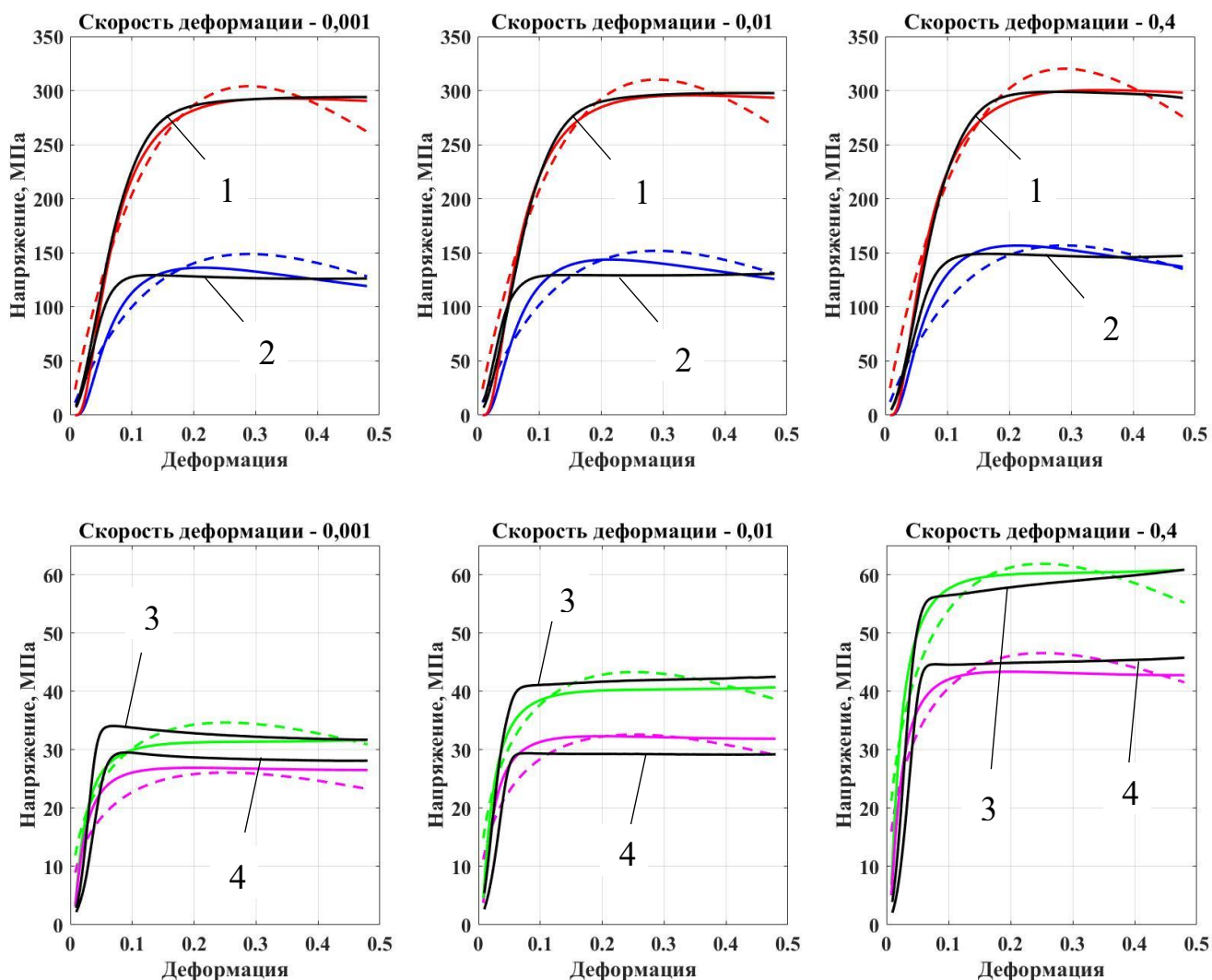


Рисунок 5.3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести σ при сжатии образцов со различными скоростями деформации $\dot{\epsilon}$:

- данные эксперимента (1- при 20 °C; 2- при 300 °C; 3- при 400 °C; 4- при 450 °C);
- расчетная кривая по формуле (2); --- расчетная кривая по формуле (5)
- (— при 20 °C; — при 300 °C; — при 400 °C; — при 450 °C)

Как видно на рисунке 5.3, в диапазоне температур 20-450 °C формулы (2) и (5) позволяют получать достаточно точные значения коэффициентов детерминации R^2 расчетных напряжений текучести, которые достигают 0,92-0,97. Однако результаты моделирования с использованием

формулы (3.2) имеют более высокие значения средней абсолютной ошибки S , которые составляют 11,7-14,2%.

Таким образом, при моделировании процессов формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356 в равной степени возможно применение математической модели напряжения текучести с 9 и 5 неизвестными коэффициентами (формулы (3.1) и (3.2)). Однако применение модели с 9-ю неизвестными коэффициентами позволяет повысить точность аппроксимации экспериментальных данных. В этом случае ошибка не превышает 9,7 %.

Кривые текучести, рассчитываемые по индикаторным диаграммам, скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения. Далее «изотермические» кривые текучести сплава проверяются и корректируются по результатам компьютерного конечно-элементного моделирования.

Для верификации полученной модели выполнена постановка виртуального эксперимента в программном комплексе QForm. В виртуальном эксперименте осуществили моделирование процесса сжатия цилиндрических образцов из алюминиевого сплава РС-356 с исходными данными, аналогичными натурному эксперименту (см. подпункт 2.2.8).

В качестве отценки критерия точности определения реологической модели материала выбрана формула средней абсолютной ошибки, представленной в формуле (3.3) (см. пункт 3), результаты которых показаны на рисунках 5.4-5.6.

На рисунке 5.4 приведен типовой результат этой проверки после выполнения ряда циклов корректировки методом постановки обратной задачи при температуре 450 °С: 1) сравнение экспериментального и расчетного графиков зависимости «сила деформирования» – «ход»; 2) относительная погрешность измерений; 3) корреляция между экспериментальным и расчетным значением силы деформирования $P_{деф}$. В общем, отклонение

расчетных индикаторных диаграмм от экспериментальных диаграмм не превышает $\pm 2\%$ для всех температурных условий деформации.

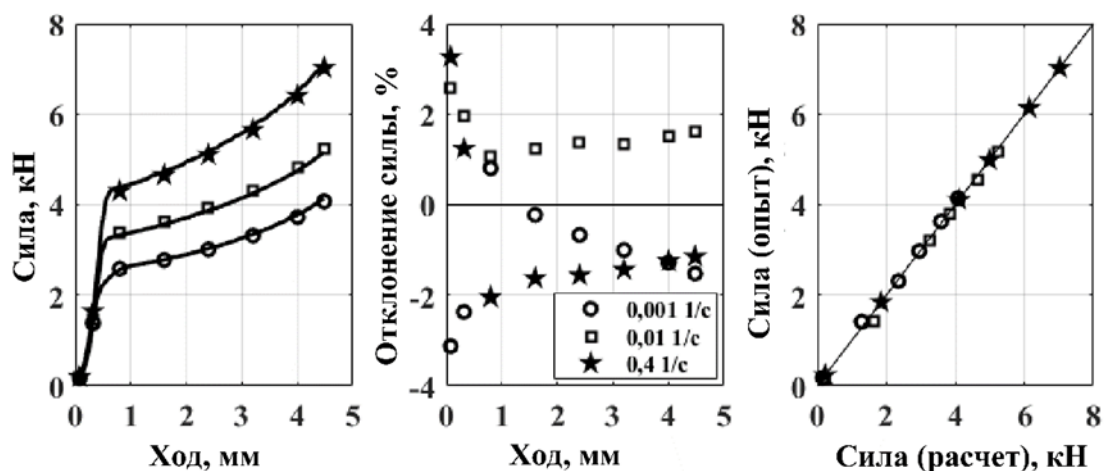
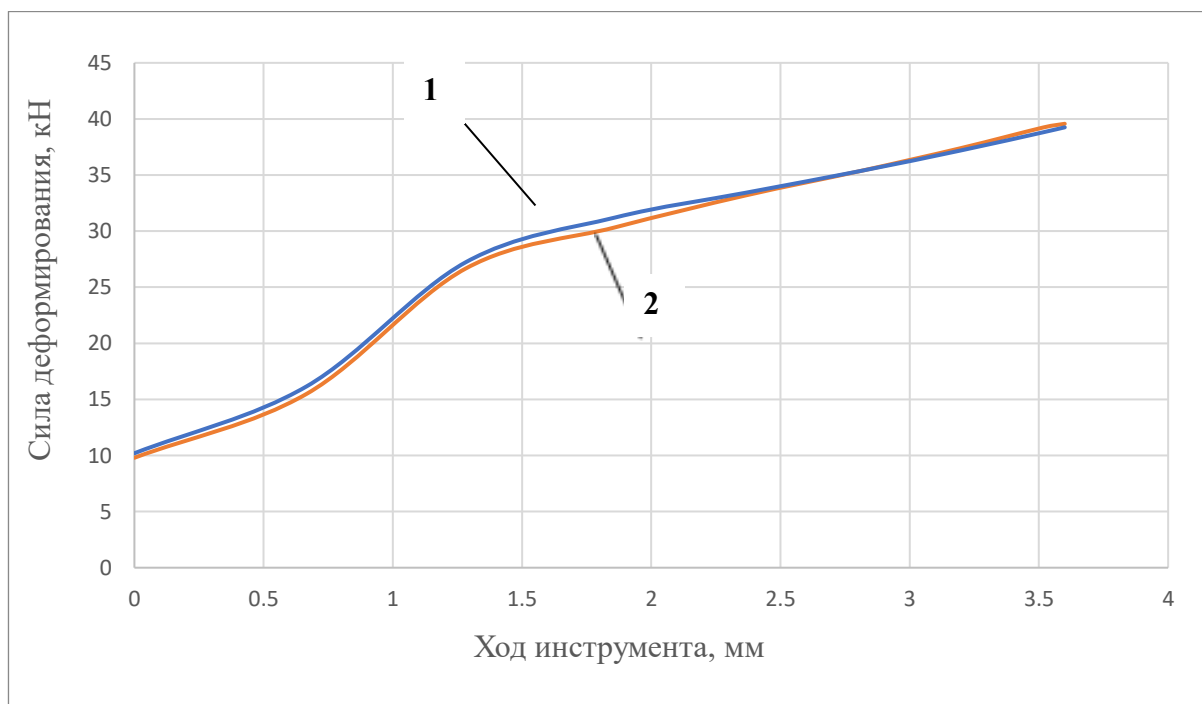


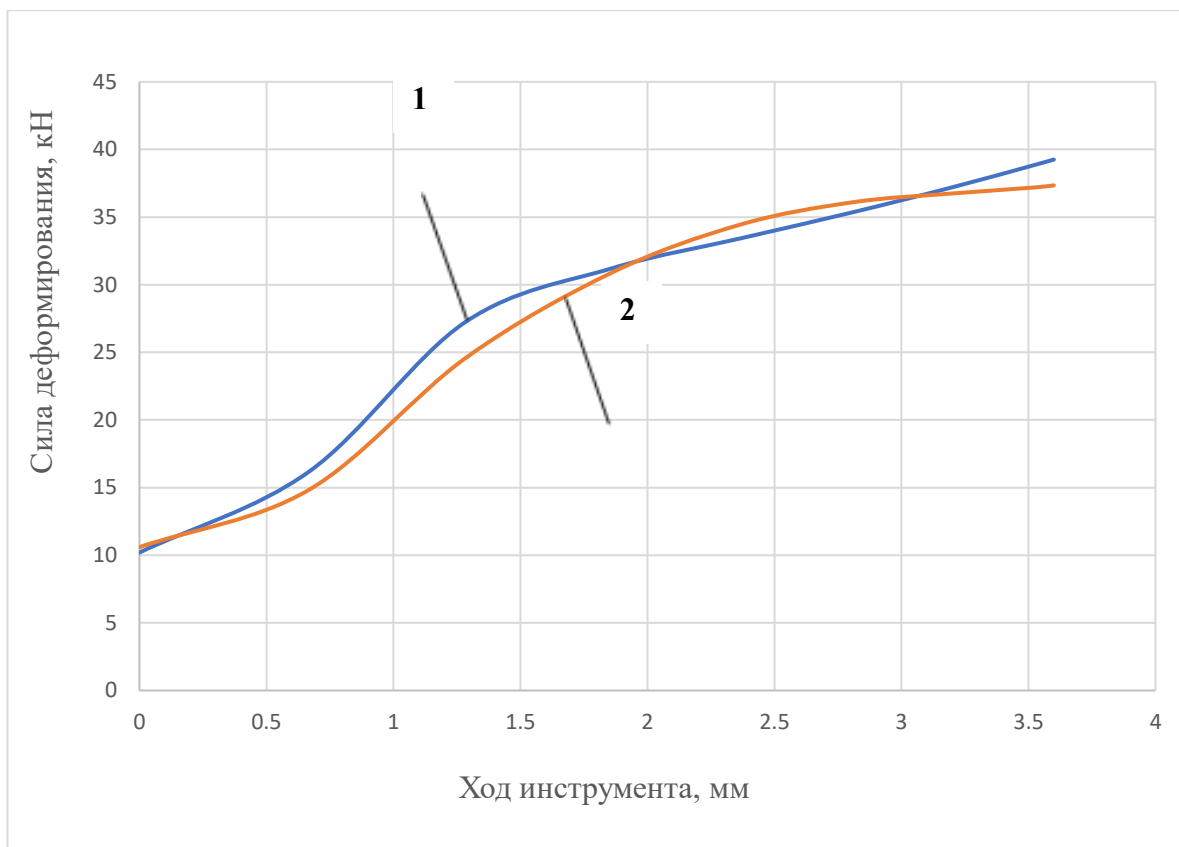
Рисунок 5.4 – Проверка точности найденных моделей сплава РС-356 (при 450 °С)

в программе QFORM 11: линия-опыт; знаки-расчет.

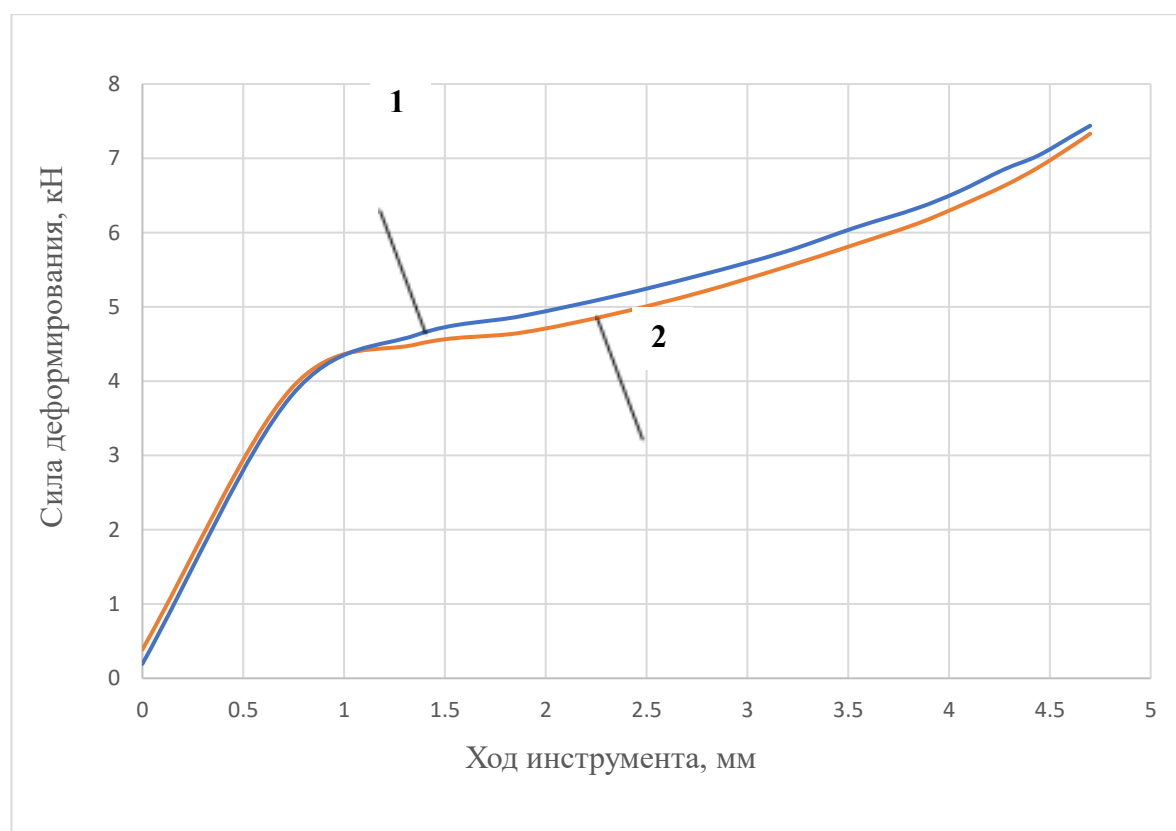
На рисунке 5.5, показаны результаты сравнения виртуального и натурального экспериментов при температуре 20 °С и 450 °С. В представленном примере видно, что применение реологической модели с 9-ю коэффициентами обеспечивает более высокую точность расчета сил деформирования.



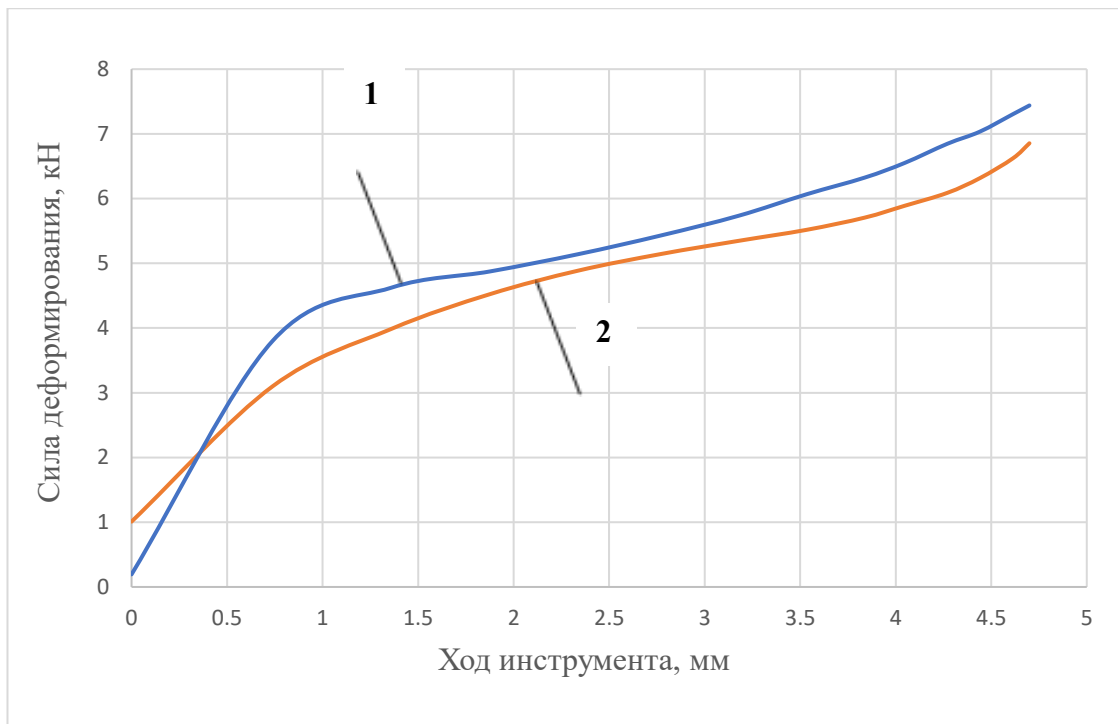
а)



б)

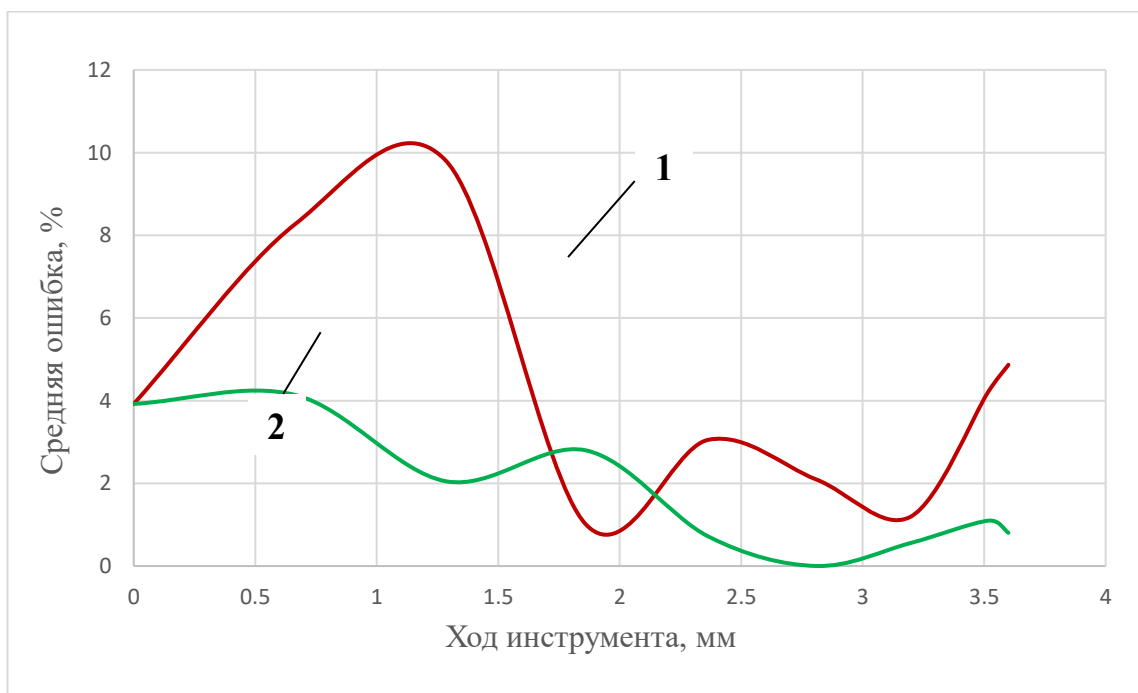


в)

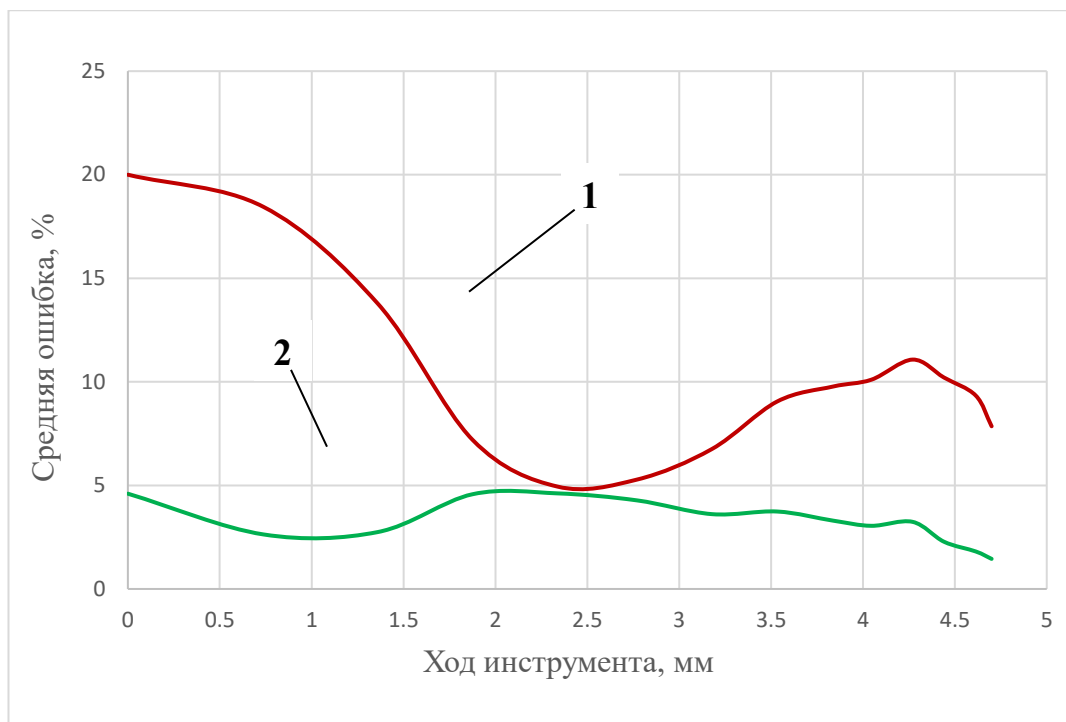


(г)

Рисунок 5.5 – Сравнение графиков «сила деформирования - ход инструмента» при моделировании сжатия образцов сплава RS356 при температурах 20 °С (а, б) и 450 °С (в, г) с применением модели материала: (а), (в) – формула с 9-ю коэффициентами; (б), (г) - формула с 5-ю коэффициентами; 1 - данные эксперимента; 2 - расчетные данные



а)



б)

Рисунок 5.6 – Величины средних ошибок сил сжатия образцов при температурах 20 °С (а) и 450 °С (б):

1 - модель – с 5-ю коэффициентами; 2 - модель – с 9-ю коэффициентами

Анализ значений сил деформирования при сжатии заготовки из сплава РС-356 при температурах 20 °С и 450 °С (рисунок 5.5-5.6) показал, что применение реологической модели материала, основанной на формуле (3.1), обеспечивает погрешность расчета не более 4,0% (при 20 °С) и не более 5,0% (при 450 °С), что соответствует условию формулы (3.3). При использовании модели по формуле (3.2) погрешность расчета превышает 10% (при 450 °С) и не более 10% (при 20 °С)

Таким образом, рекомендуется использовать реологические модели с девятью коэффициентами (формула 3.1) для моделирования поведения алюминиевого сплава РС-356 в температурном диапазоне 20–450 °С, а модели с 5-ю коэффициентами (формула 3.2) применять только для холодной деформации (формула 5.1):

$$\sigma_i = \begin{cases} \text{формула (3.1), при } T \in [20; 450] \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{формула (3.2), при } T = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.1)$$

5.2. Изучение структурообразования при пластической деформации заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Исходная структура образцов имеет чешуйчатую структуру, характерную для заготовок, полученных методом аддитивной технологии, с шириной чешуек около 100 мкм и глубиной 50 мкм (рисунок 5.7). Границы отдельных фрагментов структуры хорошо просматриваются, местами заметны несплошности. Деформация на величину $\varepsilon = 0,45 - 0,48$ при комнатной температуре со скоростями ($\dot{\varepsilon}$) = 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹ приводит к образованию дефектов, причем с повышением скорости от 0,4 до 0,001 с⁻¹ трещинообразование становится более интенсивным (таблица 4.1). При осадке образцов в температурном интервале 300-450 °С нарушения сплошности образцов не наблюдается, что связано с повышением пластических характеристик металла, однако некоторые исходные несплошности в структуре металла сохраняются. Как видно на рисунке 5.8 скорость деформации оказывает незначительное влияние на структурообразование во всем температурном интервале.

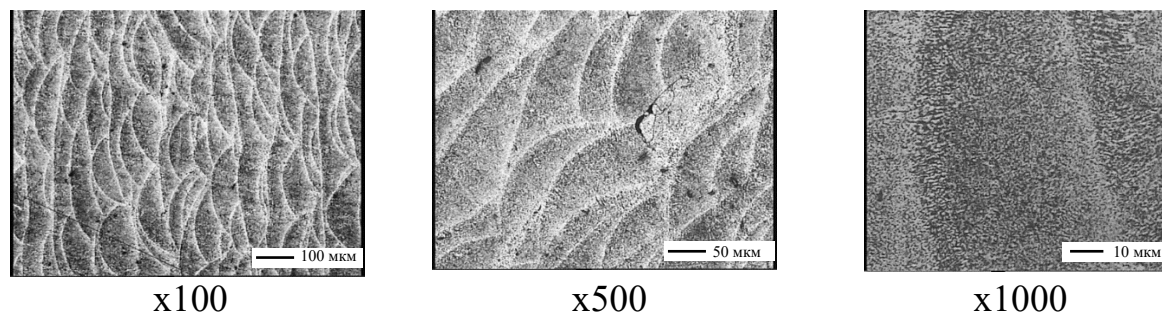


Рисунок 5.7 – Структура исходного образца из алюминиевого сплава РС-356

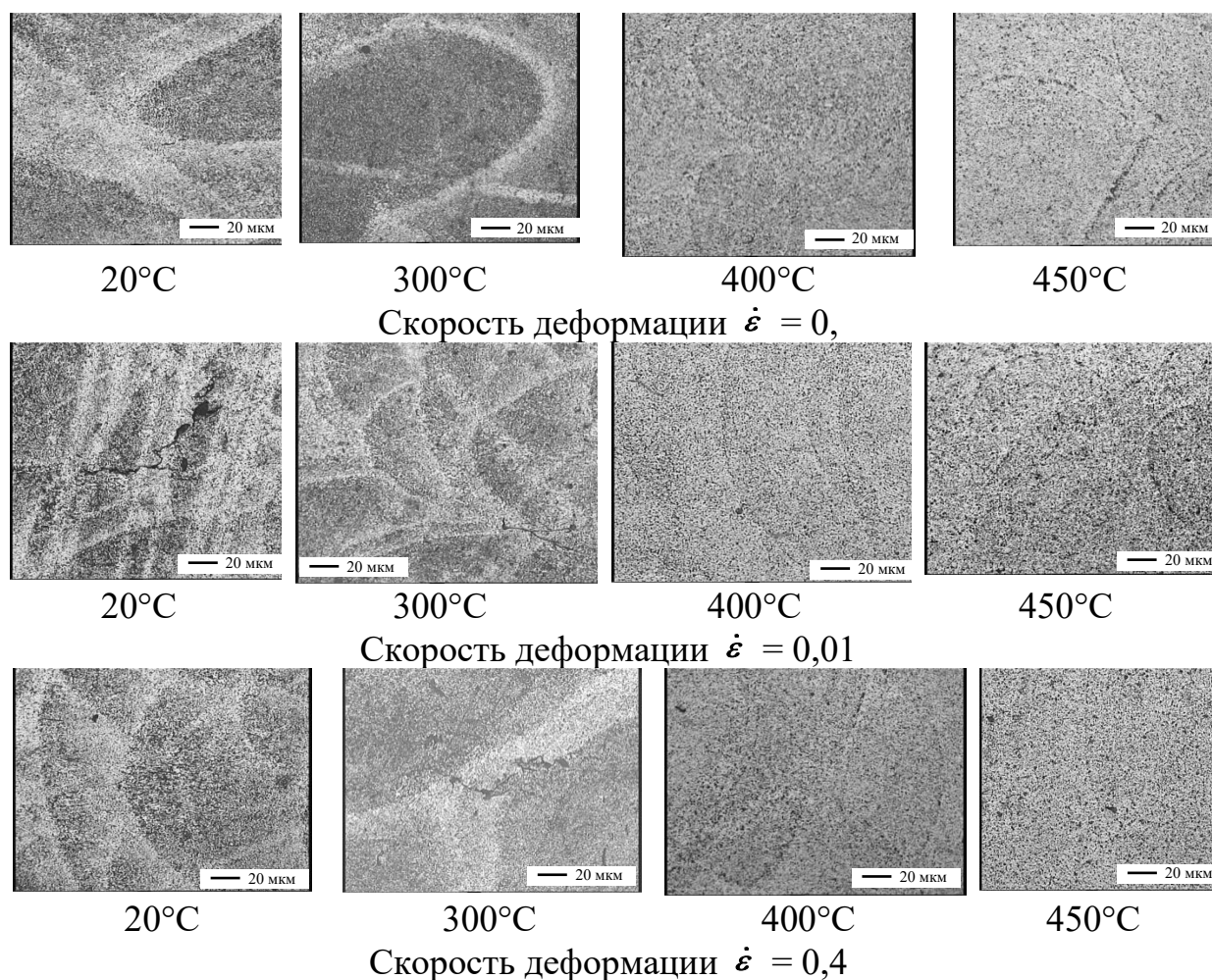


Рисунок 5.8 – Изменение микроструктуры в образцах алюминиевого сплава PC-356 в зависимости от температуры и скорости деформации (увеличение $\times 500$).

Повышение температуры деформации заготовок от 20 до 450°C позволяет существенно изменить структуру материала. В заготовке, осажденной при температуре 450°C и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0,4$, наблюдается практически однородная структура, в которой менее выражена характерная для 3D-печати слоистость (рисунок 5.8). Это явление происходит вследствие воздействия повышенной температуры деформации, так как в процессе печати формируется неравновесная метастабильная структура в синтезированном материале, которая при нагреве претерпевает существенные изменения в результате прохождения процесса диффузии. Это приводит к выделению из твердого раствора и укрупнению частиц кремния как на границе, так и в центре заготовки, что хорошо описано в работе [87].

5.3. Изучение энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Расчетные данные энергосиловых параметров процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356 при моделировании с найденными реологическими моделями программой QForm показывает хорошее совпадение с экспериментальными данными (рисунки 5.9 – 5.12), значения коэффициента R^2 равны 0,91-0,95.

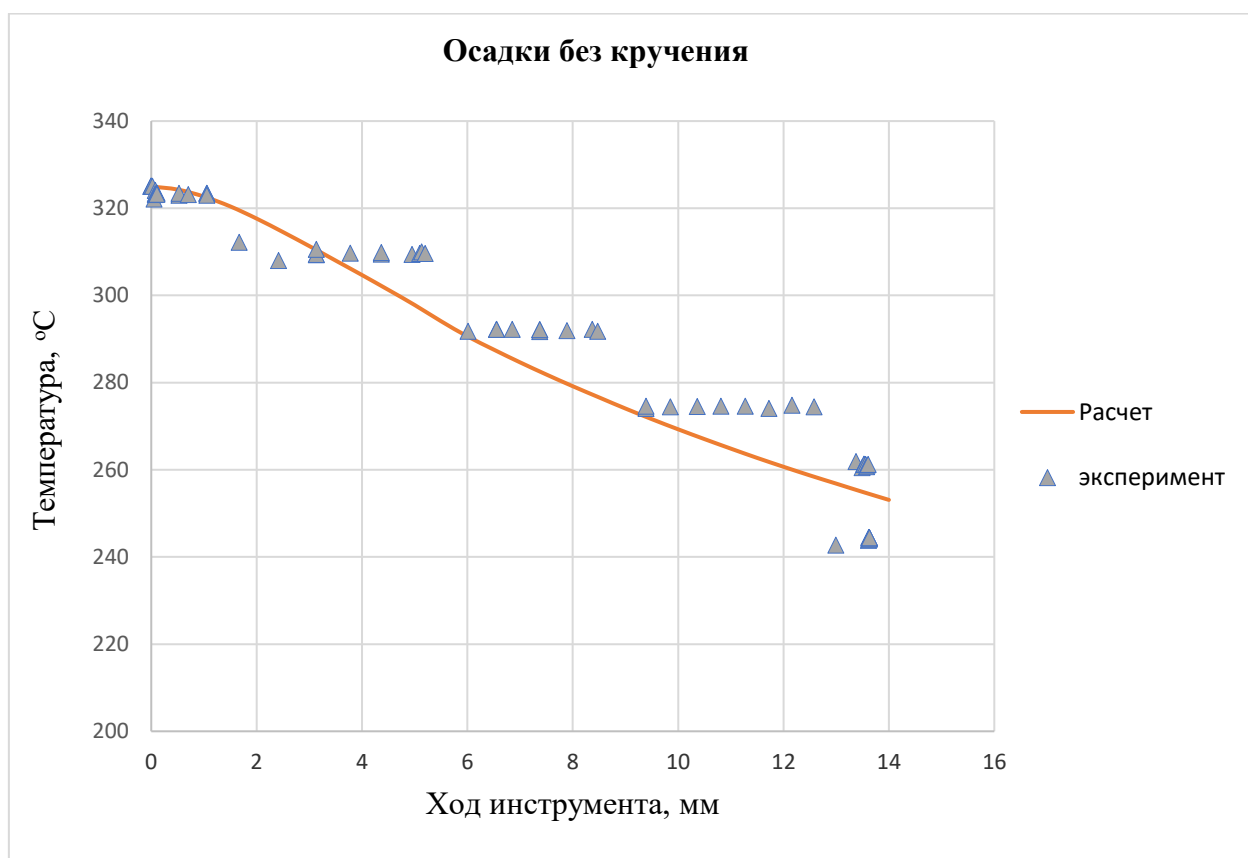


Рисунок 5.9– Сравнение экспериментальных и расчетных данных теплового эффекта процесса осадки заготовок из алюминиевого сплава РС-356

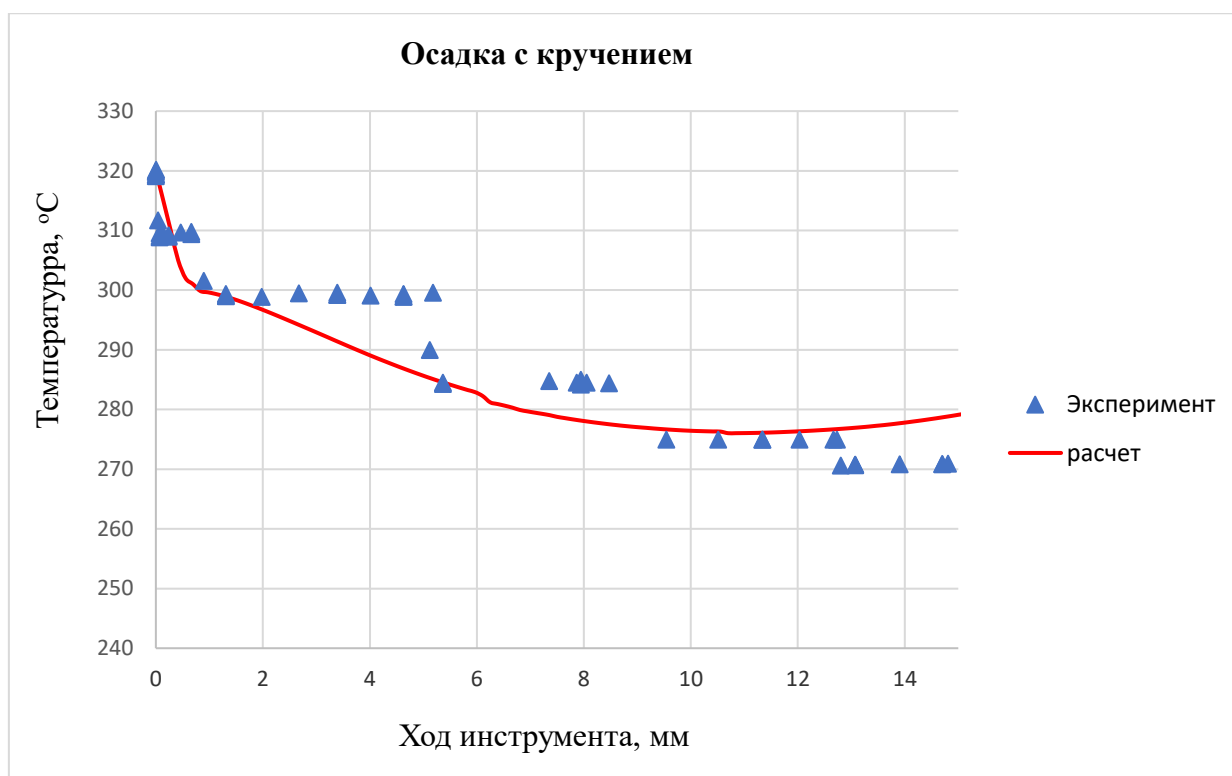


Рисунок 5.10 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных теплового эффекта процесса осадки с кручением заготовок из алюминиевого сплава PC-356

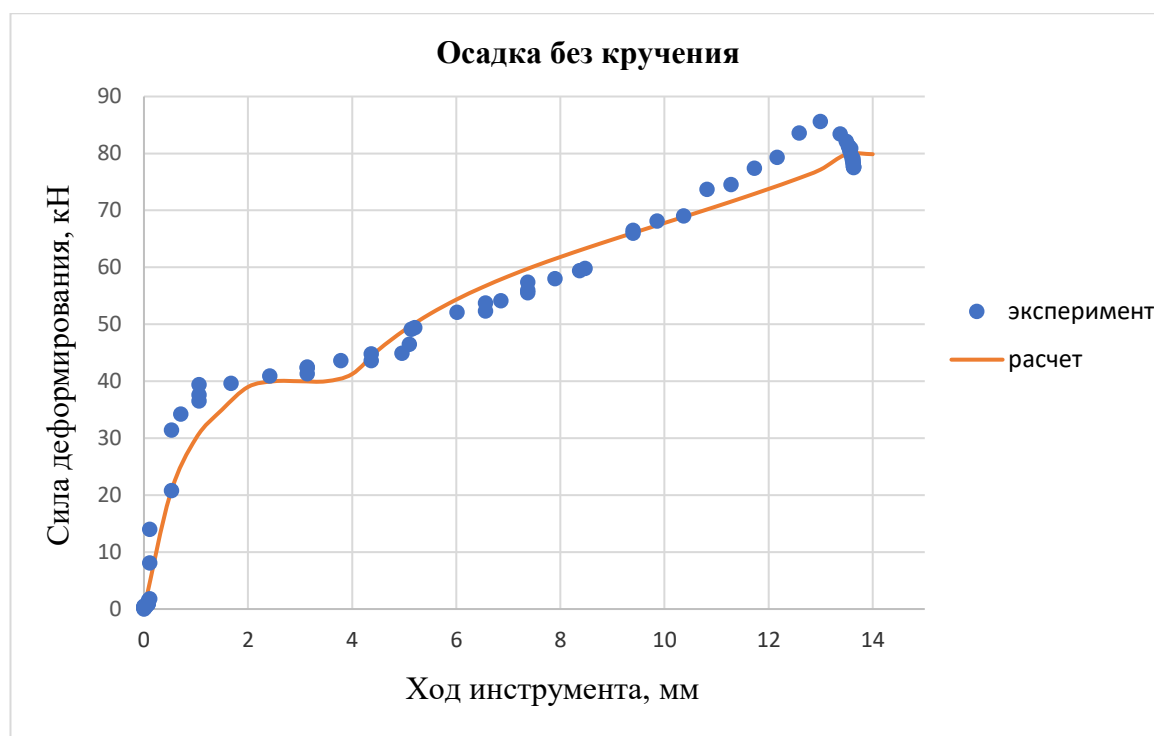


Рисунок 5.11 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных силовых параметров процесса осадки без кручения заготовок из алюминиевого сплава PC-356

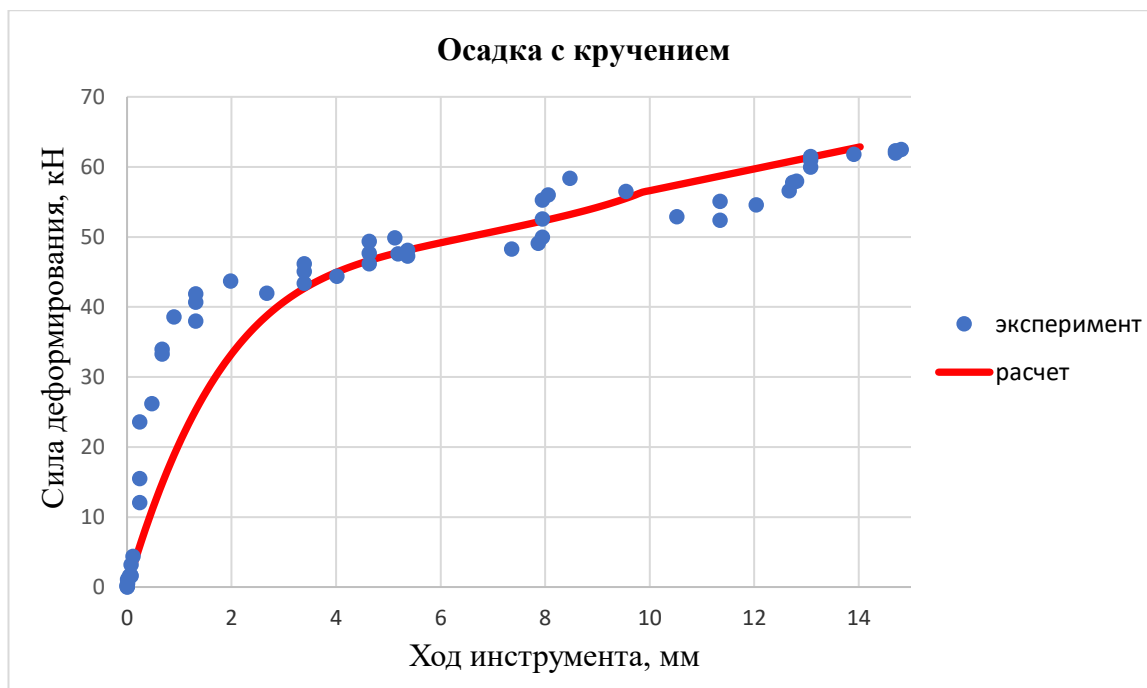


Рисунок 5.12 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных силовых параметров процесса осадки с кручением заготовок из алюминиевого сплава РС-356

Если данные эксперимента вставим в формулы (3.9) - (3.21) получим:

При осадке без кручения

$$\text{работа: } A = A_{\pi} = \varepsilon P h_0 = 0,585 \cdot 0,034 = 1,445 \quad \text{кДж}$$

При осадке с кручением

$$\gamma = \frac{\omega t}{h_0(1 - \varepsilon)} \cdot R_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \varepsilon}} = 23,01$$

$$\Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2}} = 13,32$$

$$M = \frac{2\pi}{9} \sigma_0 \gamma \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot R_0^4 = 0.013 \quad \text{кН.м}$$

$$\text{работа: } A = A_{\pi} + A_{\kappa} = 1,054 + 0,139 = 1,193 \quad \text{кДж}$$

Таким образом, изучение влияния термомеханических режимов на энергосиловые параметры показывает, что использование метода осадки с кручением при пластической деформации алюминиевых сплавов, таких как РС-356, позволяет снизить энергетические затраты до 20% по сравнению с методом осадки без кручения (рисунки 5.9-15.12).

Рисунок 5.14– Микроструктура составного изделия из сплава РС-356 в меридиональном сечении.

Металлографический анализ свидетельствует об отсутствии пор в области соединения, а также о незначительных различиях в микроструктуре в непосредственной близости от зоны соединения, что указывает на его качество (рисунок 5.15). Химический состав выделенных областей, представленных на рисунке 5.15, показан в таблице 5.1.

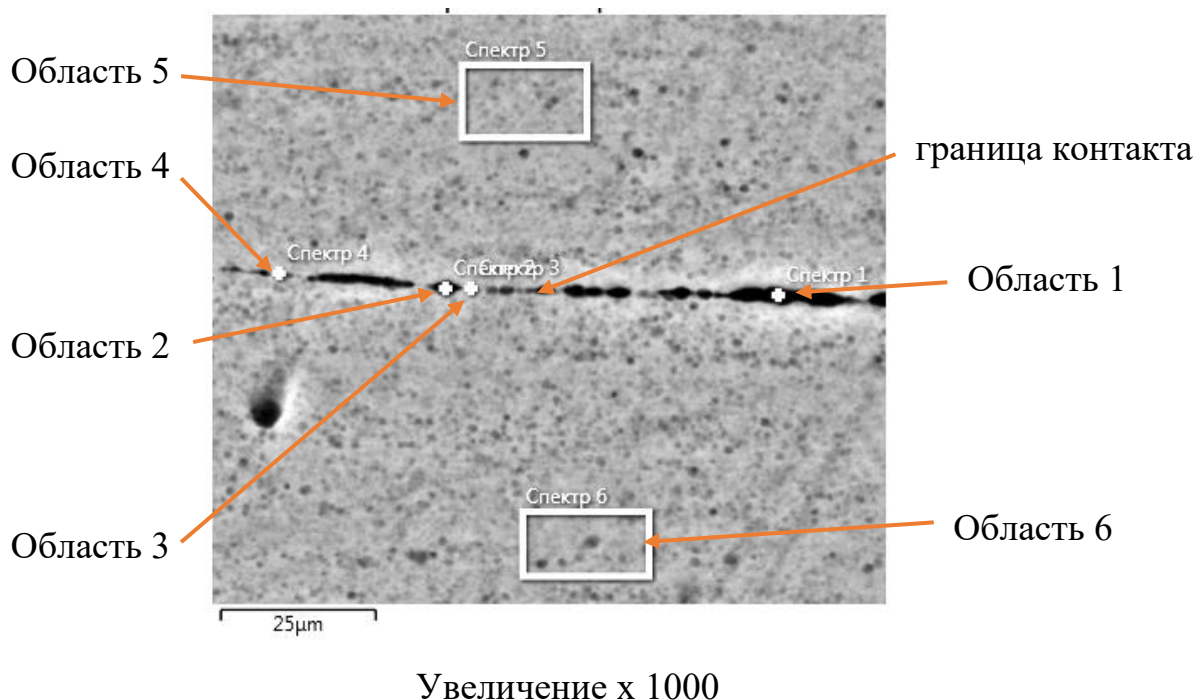


Рисунок 5.15– Микроструктура образца в зоне соединения (центр изделий)

Таблица 5.1 – Химический состав секторов областей, указанных на рисунке 5.15

Название спектра	Al	Si	Сумма	Наименование участка
Область 1	97.88	2.12	100.00	Линия контакта
Область 2	90.95	9.05	100.00	
Область 3	93.32	6.68	100.00	
Область 4	93.19	6.81	100.00	
Область 5	93.23	6.77	100.00	Деталь усл.1
Область 6	93.69	6.31	100.00	Деталь усл.2

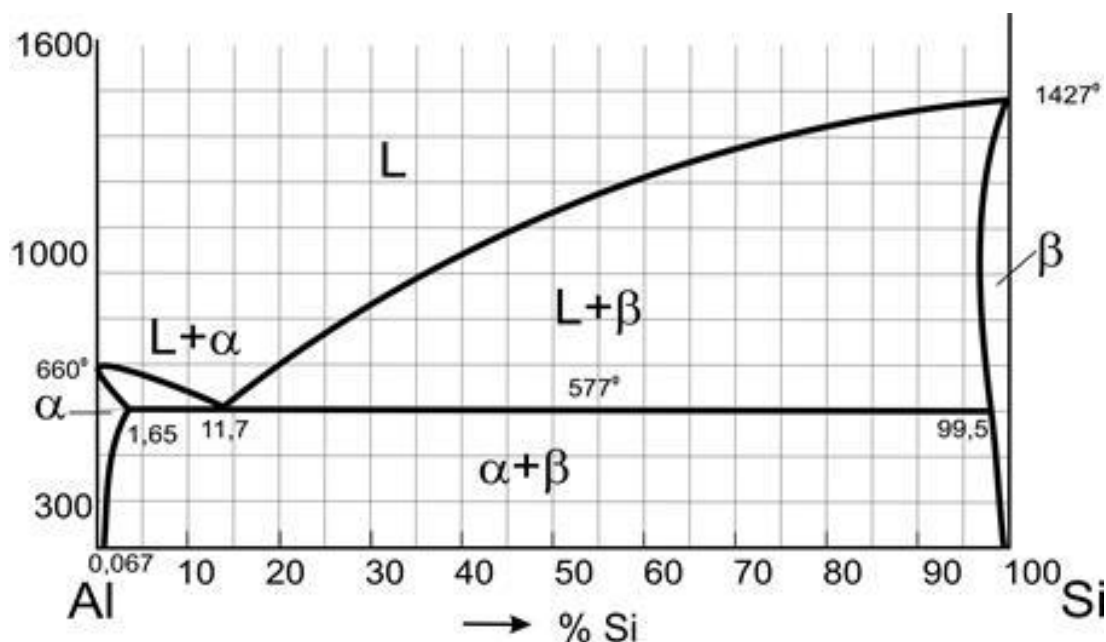


Рисунок 5.16– Фазовая диаграмма Al – Si

На основе фазовой диаграммы Al – Si (рисунок 5.16) [88] и данных химического состава секторов (таблица 5.1) можно сделать вывод о том, что фазы, образовавшиеся в процессе формообразования в зоне соединения по химическому составу существенно не отличается от исходного материала, а также выявлено отсутствие пор.

Качество соединения изделий оценивалось по микроструктурному анализу (рисунки 5.13–5.15). Зона контакта между заготовками проявляется только после травления, что свидетельствует о прочном и однородном соединении материала. В центральной зоне изделия измеренная микротвёрдость составляет $HV_{0,1} = 105\text{--}106$ единиц, в краевой зоне различие немного больше и составляет $HV_{0,1} = 90\text{--}106$ единиц, а в периферийной зоне материал практически не деформирован, и твердость составляет 60 единиц при исходной твердости 96–98 единиц, что, вероятно, связано с отпуском металла при нагреве перед деформацией.

На основании представленных данных можно заключить, что применение осадки с кручением для изготовления заготовок из алюминиевого сплава РС-356 способствует формированию плотного контакта, за исключением краевых областей. Моделирование в программе QForm с

использованием найденных реологических моделей позволяет с высокой точностью предсказывать геометрические параметры заготовок, приобретаемых ими в процессе формообразования (рисунки 3.14–3.16).

В процессе получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 осадка с кручением происходят за два перехода с последовательным нагревом заготовки до 250°C и до 350°C.

Для оценки точности расчета силовых параметров был построен график силы деформирования от хода инструмента (рисунок 5.17), рассчитанный в программе QForm 11 с применением найденных реологических моделей.

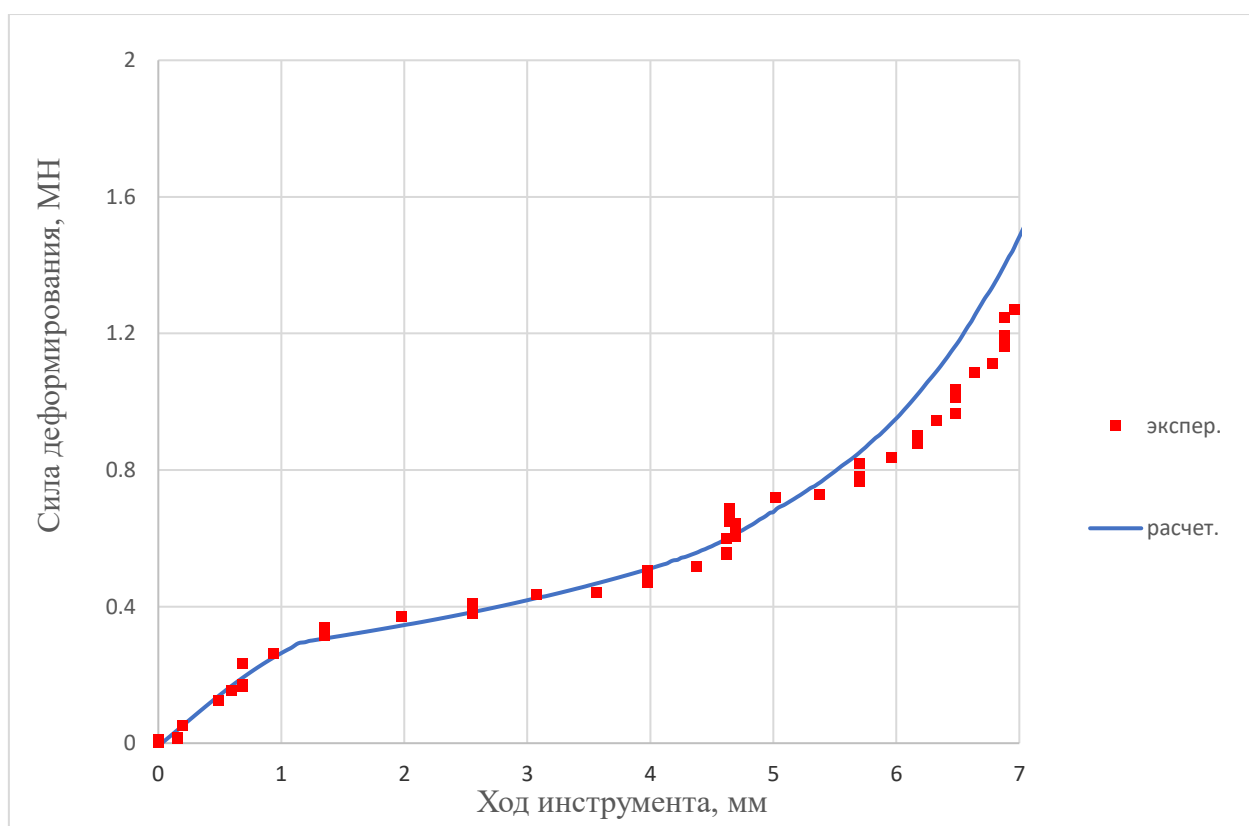


Рисунок 5.17 – Сравнение результатов расчетной и экспериментальной сил деформирования

В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина средней ошибки (S) (формула 3.4) и коэффициента детерминации R^2 (формула 3.5).

С учетом хорошего совпадения расчетных значений силы с экспериментальными данными (рисунок 5.17) математическая модель позволяет достаточно точно со средней ошибкой меньше 5% (4.63%) и со значением R^2 равным 0,98 определять силу процесса формообразования.

5.5. Отработка процесса получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0

Составные изделия из алюминиевого сплава РС-356 и технического титана BT1-0 (рисунок 5.18), полученные методом осадки с кручением в соответствии с методикой (п.п 2.2.11), обеспечивают соединение, характеризующееся однородной структурой и отсутствием пустот.

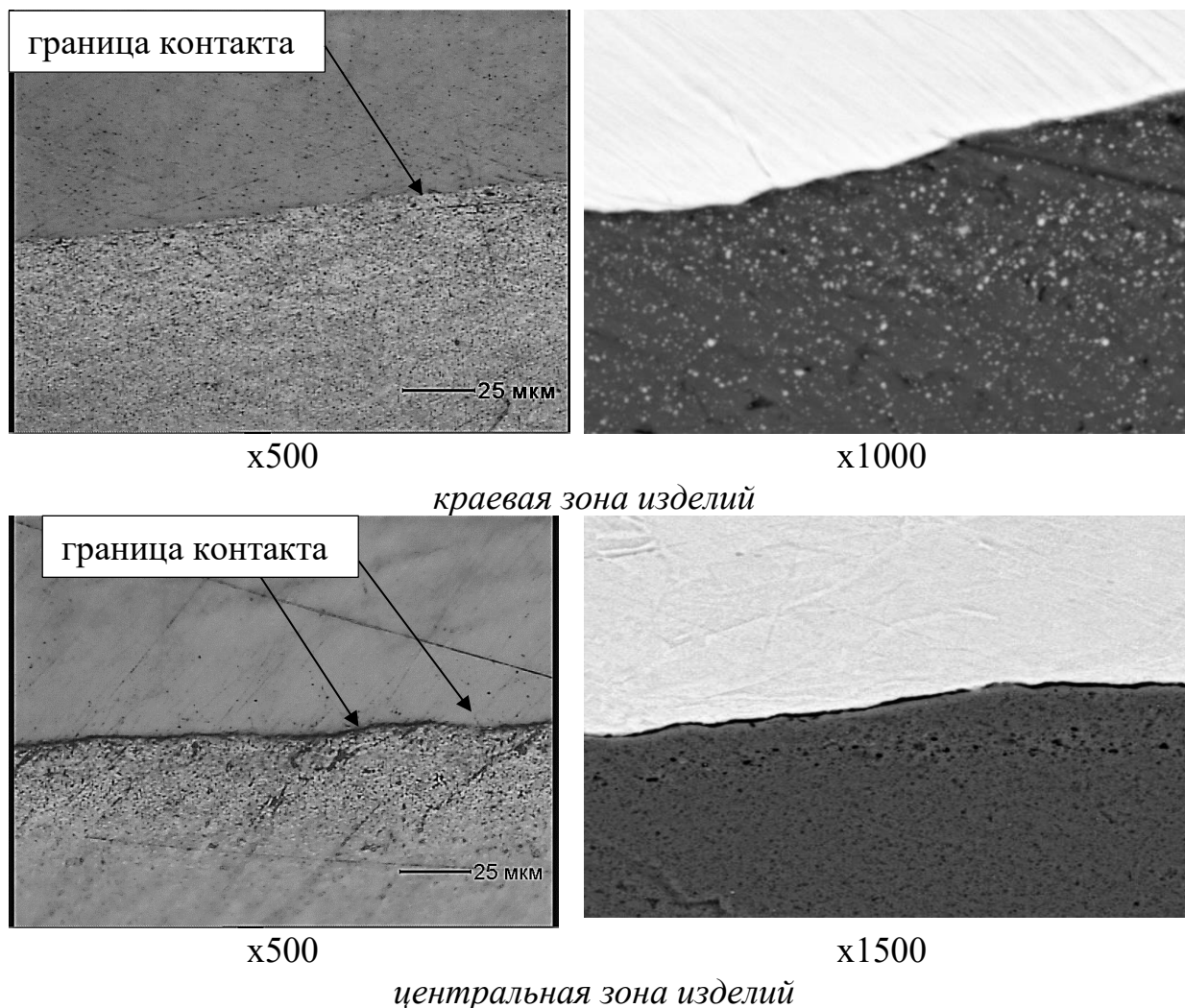


Рисунок 5.18 – Микроструктура в зоне контакта составного образца из РС-356 и BT1-0

Как видно на рисунках 5.19, микроструктура детали из титана BT1-0 имеет зеренное строение с линиями двойникования и соответствует 2-3 типу 9-ти типной шкалы микроструктур однофазных титановых сплавов с α -структурой [89, 90, 91], микроструктура заготовки из алюминиевого сплава РС-356 имеет мелкодисперсное внутризеренное строение.

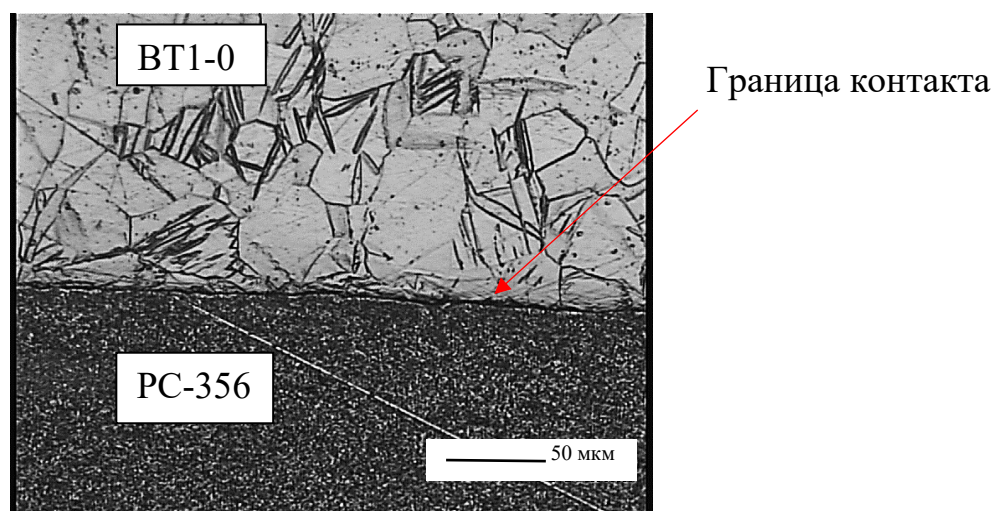


Рисунок 5.19 – Микроструктура зоны соединения составного изделия из PC-356 и BT1-0



Рисунок 5.20 – Схема исследования микротвердости вблизи границы контакта составного изделия из PC-356 и BT1-0

Таблица 5.2 – Значение микротвердости в зоне соединения по радиусу

№ точка	Расстояние от центра, мм	Значение микротвердости HV0,1
1	0	175
2	8	183
3	16	186
4	22	189
5	26	190

Микротвердость составных изделий в центре изделия в зоне соединения составляет $HV_{0,1} = 175$ единиц и увеличивается до 190 в краевой зоне, что, вероятно, связано с увеличением окружной скорости (рисунок 5.20, таблица 5.2).

На электронном микроскопе с применением метода количественного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) был исследован химический состав материалов (таблица 5.3, рисунок 5.21).

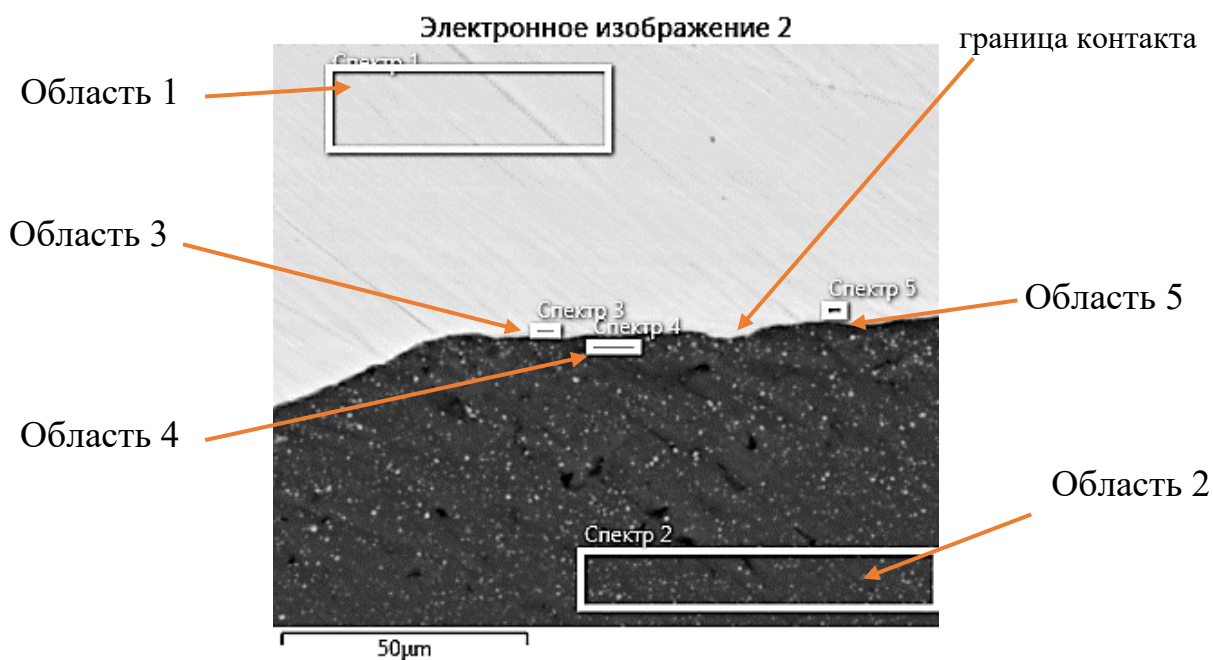


Рисунок 5.21– метод количественного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА)

Таблица 5.3 – Химический состав секторов, указанных на рисунке 5.19

Название спектра	Al	Si	Ti	Сумма	Наименование участка
Область 1	0.35		99.65	100.00	BT1-0
Область 2	92.23	7.77		100.00	PC-356
Область 3	67.87		32.13	100.00	граница контакта
Область 4	95.38	3.64	0.98	100.00	
Область 5	55.03	1.20	43.77	100.00	

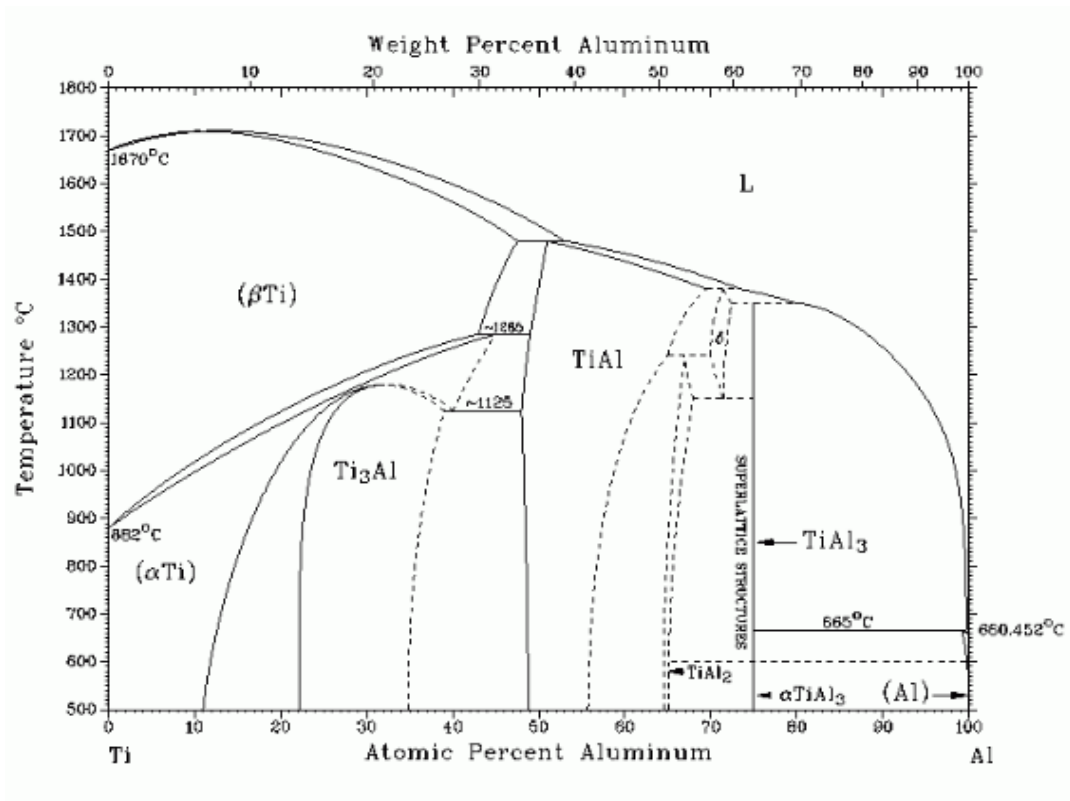


Рисунок 5.22 – Фазовая диаграмма Ti – Al

На основе анализа фазовой диаграммы Ti – Al [92, 93], показанной на рисунке 5.22, и результатов определения химического состава секторов (таблица 5.3) было найдено, что образовавшиеся в процессе формообразования сравнительно прочные фазы Ti₃Al, TiAl₂ в зоне соединения и обеспечивают надежное соединение материалов (Ti₃Al – $\sigma_B = 220 \dots 600$ МПа, TiAl – $\sigma_B = 350 \dots 580$ МПа).

Сравнение сил деформирования, полученных при численном моделировании в программе QForm, с результатами экспериментов (рисунок 5.23) демонстрирует высокую степень совпадения, подтверждённую коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$.

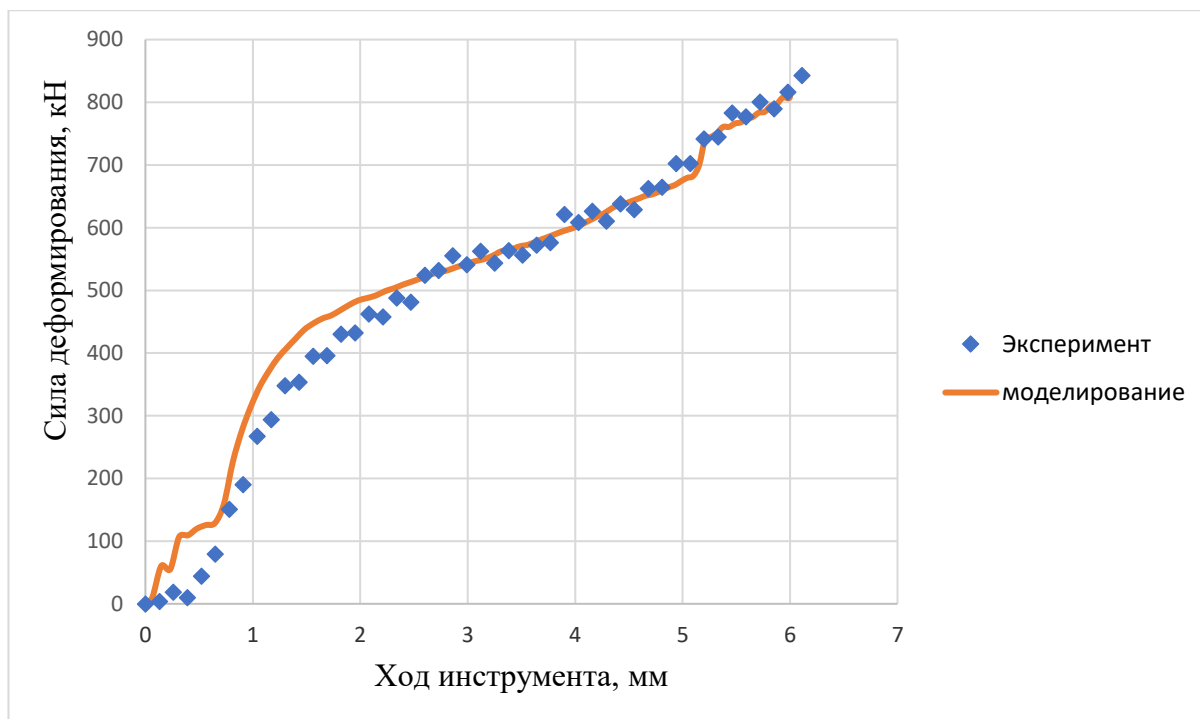


Рисунок 5.23 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений силы деформирования

Вывод по 5 главе

1. Показано, что применение реологических моделей Хензеля-Шпиттеля с 9 и 5 коэффициентами для моделирования процесса пластического формообразования заготовок алюминиевого сплава РС-356 обеспечивает высокую точность расчета, подтверждающуюся хорошим соответствием с экспериментальными данными. Для получения этих моделей использовался метод сжатия цилиндрических образцов с различными скоростями деформации ($0,4$, $0,01$, $0,001 \text{ с}^{-1}$) в изотермических условиях в пределах температур от 20 - $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты показали, что для моделирования процессов холодного пластического формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356 (температурный интервал $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) можно применять модели Хензеля-Шпиттеля с 5 и с 9 коэффициентами. Однако для моделирования процессов полугорячего и горячего пластического формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356 в температурном диапазоне $300 - 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо использовать реологическую модель Хензеля-Шпиттеля с 9 коэффициентами.

2. Изучение теплового эффекта при пластических деформациях цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава РС-356 показывает, что деформация на величину $\varepsilon = 0,45 - 0,48$ при комнатной температуре со скоростями ($\dot{\varepsilon}$) = 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹ приводит к образованию дефектов, причем с повышением скорости от 0,4 до 0,001 с⁻¹ трещинообразование становится более интенсивным. При осадке образцов в температурном интервале 300-450 °С нарушения сплошности образцов не наблюдается, что связано с повышением пластических характеристик металла, однако некоторые исходные несплошности в структуре металла сохраняются.

3. При использовании метода осадки с кручением для пластических деформаций заготовок из алюминиевых сплавов, таких как РС-356, возможно достижение снижения требуемого энергического затрата на 20% по сравнению с методом осадки без кручения.

4. Выполненный на базе математического моделирования и натурного эксперимента комплексный анализ энергосиловых параметров процесса формообразования составных изделий, позволивший установить совпадение значений силы со средней абсолютной ошибкой меньше 5% (4,56%), позволяет утверждать, что найденная реологическая модель обеспечивает достаточно высокую точность прогнозирования силовых параметров процесса и вероятность возможного трещинообразования в периферийной зоне.

5. Продемонстрирована эффективность метода осадки с кручением с последующей горячей штамповкой для получения составных заготовок из разнородных материалов — алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0. По результатам анализа микроструктуры и микротвёрдости установлено формирование в зоне соединения интерметаллических фаз Ti_3Al и $TiAl_2$, обеспечивающих качественное соединение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача по разработке процесса формообразования составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением, обеспечивающего снижение массы осесимметричных заготовок, качество соединения которых подтверждено металлографическими исследованиями и решение которой имеет существенное значение в области машиностроения.

1. Определены коэффициенты реологических уравнений Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю параметрами. Полученные модели для алюминиевого сплава РС-356 в диапазоне температур 20-450 °С и скоростей деформации 0,001; 0,01; 0,4 сек⁻¹ продемонстрировали высокую степень соответствия экспериментальным данным, что подтверждается значениями коэффициента детерминации R^2 от 0,92 до 0,97. На основе выполненных исследований разработаны рекомендации по выбору реологической модели данного материала для численного моделирования процессов обработки давлением в программной среде QForm.

2. Выполнен температурно-скоростной анализ и определены рациональные режимы деформации при изготовлении составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 осадкой с кручением на основе применения конечно-элементного метода с использованием программного обеспечения QForm и найденной реологической модели сплава.

3. Отработаны технологические режимы получения составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356, включающие нагрев заготовок до температуры 350 °С с последующей осадкой с кручением путем перемещения верхнего бойка со скоростью 2 мм/сек и угловой скоростью его вращения 36 градусов в секунду и углом поворота 144 градусов, что обеспечивает их соединение.

4. Определено, что технологические режимы формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356, нагретого до температуры 450 °С и титана ВТ1-0, нагретого до температуры 550 °С, методом осадки с

кручением с скоростью перемещения 2 мм/сек и угловой скоростью вращения верхнего бойка 36 градусов в секунду и углом поворота 108 градусов, обеспечили получение составных изделий из РС-356 и титана ВТ1-0.

5. Разработан технологический процесс получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0, качество соединения которых подтверждено металлографическими исследованиями, позволившими выявить в области соединения высокопрочные интерметаллиды Ti_3Al и $TiAl_2$.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.А. Исследование энергосиловых параметров процесса малоотходной безуклонной горячей объемной штамповки на основе комбинированной схемы деформации «раздача-выдавливание» / В.А. Иванов, С.С. Стругов, А.А. Авраменко, М.Т. Таркаленко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 59–65.
2. Буркин, С.П. Усилия, моменты и давления при осадке с кручением / С.П. Буркин, Б.Р. Картак, А.Н. Леванов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 9, – С. 8-9.
3. Бернштейн, Л.М. Термомеханическая обработка металлов и сплавов / Л.М. Бернштейн. – Москва: Металлургия, 1968. – 596 с.
4. Шнейберг, А.М. Экспериментальное определение температурных параметров при осадке с кручением и обратном выдавливании / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, Д.А. Щербатов // КШП. ОМД. – 2009. – №7. – С. 3-9.
5. Шарапин, Е.Ф. Элементы теории обработки металлов давлением / Е.Ф. Шарапин. – Москва: Металлургиздат, 1964. – 208 с.
6. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 423 с.
7. M. Merlin and G. Garagnani. Mechanical and microstructural characterisation of A356 castings realised with full and empty cores., Metall. Sci. Technol. 2009, 27, 21–30.
8. Петров, П.А. Перспективы применения гибридных заготовок в машиностроении / П.А. Петров, И.А. Бурлаков, Нгуен Хань Тоан // Технология металлов. – 2021. – № 8. – С. 10-23.
9. Климов В. Н. Современные авиационные конструкционные сплавы: учеб. пособие. Самара: Изд. Самарского университета. – 2017. – 40 с.
10. Singh, V.P. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical re-view / V. P. Singh, S. K. Patel, A.

Ranjan, B. Kuriachen // Journal of Materials Research and Technology. – 9(3). – 2020. – pages 6217.

11. Xu, F. Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs) / F. Xu, G. Sun, G. Li, Q. Li // Journal of Materials Processing Technology 214, 2014. – P. 925– 935.

12. Slobodyan, M. Resistance. Electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review, Nuclear Engineering and Technology / M. Slobodyan. – 2021. – Volume 53. – Issue 4.– Pages 1049-1078, ISSN 1738-5733.

13. Zhou, K. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding / K. Zhou, P. Yao // Mechanical Systems and Signal Processing. –124 (1). –2019. – P. 170-198.

14. Xiao, R. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys / R. Xiao, X. Zhang // Journal of Manufacturing Processes. – 16 (2). – 2014. – P. 166-175.

15. Kashaev, N. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications / N. Kashaev, V. Ventzke, G. Çam // Journal of Manufacturing Processes. – 36. – 2018. – P. 571-600.

16. Нгуен Хань Тоан. Исследование закономерностей процесса формообразования осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом осадки с кручением : дис. ... канд. тех. наук : 2.6.4 / 15. Нгуен Хань Тоан. – Москва, 2024. – 143 с.

17. Евстратов, В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов. // Вища школа, 1981. – 248 с.

18. Тарновский, И.Я. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.

19. Громов, Н.П. Теория обработка металлов давлением / Н.П. Громов. – Москва: Металлургия, 1978. – 360 с.

20. Youn, S.S. Aluminium Powder Forging Process using a Rotating Platen / S.S. Youn, J.H. Park C.W. Park Y.H. Kim, X. Ma // Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys. – 2024. – P. 212-217.
21. Субич, В.Н. Штамповка с кручением / В.Н. Субич, В.А. Демин, Н.А. Шестаков, А.В. Власов. – М.: МГИУ, 2007. – 414 с.
22. Хван, А.Д. Пресс для осадки с кручением / А.Д. Хван, П.М. Панин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 10. – С. 122-125.
23. Kemin, X. FEM Analysis of Cylinder Twist-Compression deformation regularity / X. Kemin, W. Zhen, L. Yan // Journal of Material Processing Technology. – 2001. – Vol. 69. – P. 103-106.
24. Xue, K.M. Numerical simulation and experimental research into the process of twist-compression forming / K.M. Xue, Y. Lu, H.H. Lin, X.M. Zhao Advanced Technology of Plasticity. – 1993. P. –1065-1070.
25. Park, J.H. Experimental Investigation of the Forming Parameters of the Rotational Upset Forging Process / J.H. Park, Y.H. Kim, and Y.E. Jin // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 111. – P. 103-106.
26. Ma, X. Deformation Behaviour of a Cylinder under Simultaneous Compression and Torsion / X. Ma, M.R. Barnett, Y.H. Kim // Key Engineering Materials. – 2002. – Vol. 233-236. – P. 767-772.
27. Kim, Y.H. An Analysis of Plastic Deformation Processes for Twist-Assisted Upset Forging of Cylindrical Billets // Y.H. Kim, J.H. Park, Y.E. Jin // Journal of Engineering Manufacture, Part B, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 2001. – Vol.215. – № 6. – P. 883-886.
28. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб. – Уфа.: Гилем, НИК Башк. Энцикл, 2013.
29. Ву Чонг Бач. Совершенствование технологии изготовления осесимметричных тонкостенных изделий на основе применения метода интенсивной пластической деформации : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.09 / Ву Чонг Бач. – Тула, 2020. – 135 с.

30. Полосаткин, Г.Д. Уменьшение трения на торцах при сжатии цилиндрических образцов / Г.Д. Полосаткин // Заводская лаборатория. – 1957. – № 7. – С. 849-851.
31. Аникин, М.С. Исследование механизма пластического трения упрочняющегося материала методом сжатия с кручением / М.С. Аникин, А.Н. Леванов, В.И. Уральский // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 10. – С. 123-127.
32. Валиев, Р. Р. Способ интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением при ступенчатом нагреве заготовок: Патент РФ RU 2586188. / Р. Р. Валиев, К.М. Нестеров, И.Н. Сабиров, И.В. Смирнов, Р.З. Валиев.
33. Чемодуров, А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве / А.Н. Чемодуров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – № 8. – Ч. 2. – С. 210-217.
34. Бабайцев, А.В. Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM / А.В. Бабайцев, Л.Н. Рабинский, Ян Наинг Мин // – М.: Труды МАИ. – 2021. – № 119. – С. 1-18. – DOI: 10.34759/trd-2021-119-10.
35. Богоявленский, К.Н. Изготовление сложных деталей / К.Н. Богоявленский, Е.И. Серяков, А.Н. Кобышев, Н.Ф. Воронина. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 218 с.
36. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля, т. 2 / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тампов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 108 с.
37. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела / В.Г. Фокин. – Самара: СамГТУ, 2010. – 130 с.
38. Клокова, Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки / Н.П. Клокова. – Москва: Машиностроение, 1990. – 224 с.
39. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.

40. Ильинская, Л.С. Полупроводниковые тензодатчики / Л.С. Ильинская, А. Н. Подмарьков. – М. -Л. : Энергия, 1966. – 120 с.
41. Пучкин, Б.И. Приклеиваемые тензодатчики сопротивления / Б.И. Пучкин. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 88 с.
42. Клокова, Н.П. Тензодатчики для измерений при повышенных температурах / Н.П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1965. – 120 с.
43. Шнейберг, А.М. Пластическая деформация металла при комбинированном нагружении (экспериментальные исследования и расчеты): учеб. пособие / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, Д.А. Щербатов, О.С. Кошелев // Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева – Нижний Новгород. – 2018. – 249 с.
44. Никонов, Н.В. Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство / Н.В. Никонов. – Москва: ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА», 2015. – 62 с.
45. Сосновский, Л.Г. Измерение температур / Л.Г.Сосновский, Н.И. Столярова. – Москва : Изд-во стандартов, 1970. – 258 с.
46. Liye Liang. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg / Liye Liang, Xuexin Pan, Guilan Wang, Haiou Zhang, Hao Zhang // Journal of Physics: Conference Series. 1939 012041. – 2021. – P. 1-6.
47. Торгашин, А.С. Применение технологий 3D-печати в ракетостроительной промышленности / А.С Торгашин, А.Ю Леонград, А.М. Бегишев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. Т. 1. – С. 105-106.
48. https://metal2021.gate1.campuz.org/sites/metal2021.gate1.campuz.org/files/assets/documents/daubarayte_ilmit_0.pdf.
49. Abbod, M.F. Validation and generalization of hybrid models for flow stress and recrystallization behaviour of aluminium-magnesium alloys / M.F. Abbod, C.M. Sellars, D.A. Linkens, Q. Zhu, M.Mahfoul // Materials Science & Engineering A. – 2005. – P. 35-46.

50. Xu, S. Effect of dynamic strain aging on the microstructure and mechanical properties of a reactor pressure vessel steel / S. Xu, X. Wu, E. Han, W. Ke // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – V. 596. – P. 25-31.

51. Чурюмов, А.Ю. Расчет предела текучести и деформационного упрочнения алюминиевых сплавов по параметрам структуры : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.01 / А.Ю. Чурюмов. – Москва, 2008. – 141 с.

52. Лебедин, М.А. Динамический механизм температурной зависимости эффекта Портевена–Ле Шателье. / М.А. Лебедин, Л.Р. Дунин-Барковский // *Физика твердого тела*. – 1998. – том 40. – № 3. С. 487-492.

53. Benallal, A. Effects of strain rate on the characteristics of PLC deformation bands for AA5083-H116 aluminium alloy / A. Benallal, T. Berstad, T. Børvik, O.S. Hopperstad, R. Nogueira de Codes // *Philosophical Magazine*. – 2007. – Vol. 88. – P. 3311-3338.

54. Mogucheva, A. The Portevin–Le Chatelier effect in an Al-Mg alloy / A. Mogucheva, M. Saenko, R. Kaibyshev // *AIP Conference Proceedings* 1783, 020156. – 2016. – DOI:10.1063/1.4966449

55. Корягин, Ю.Д. Разупрочнение нагартованного сплава АМг6 при скоростном нагреве в интервале температур 100...300°C / Ю.Д. Корягин // *Вестник ЮУрГУ*. – 2012. – № 15. – С. 108-111.

56. Бергеман, Г.В. Экспериментальное исследование сопротивления деформации сталей и определение параметров упрочнения-разупрочнения при горячей обработке давлением / Г.В. Бергеман, С.Ф. Соколов, В.В. Андреев // *Обработка материалов давлением*. – 2015. – № 2.

57. Ф. В. Нгок. Совершенствование технологии изготовления полых осесимметричных изделий с фланцем методом комбинированного выдавливания в изотермических условиях : диссертация ... кандидата технических наук : 2.6.4. / Фам Ван Нгок. – Москва. – 2023. – 192 с.

58. Латыш, В.В. Повышение прочности технического титана BT1-0 методом интенсивной пластической деформации / В.В. Латыш, И.А. Бурлаков,

Д.М. Забелян, А.И. Алимов, П.А. Петров, Б.А. Степанов, Бач Ву Чонг // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 6. – С. 54-60.

59. Latysh, V.V. Increasing the strength of commercial titanium VT1–0 using the method of severe plastic deformation / V. V. Latysh, I. A. Burlakov, D. M. Zabel'yan, A. I. Alimov, P. A. Petrov, B. A. Stepanov, Bach Vu Chong // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Vol. 47. – P. 525-531.

60. <https://www.stankom.com/product/gidravlicheskie-pressy-db2432a>

61. Vaidyanath L.R., Milner D.R. Significance of Surface Preparation in Cold Pressure Welding // British Welding Journal. – 1960. – P. 16-531.

62. Руководство пользователя системы QFORM. [Электронный ресурс]. –ООО "КванторФорм", 2019.

63. **Во Фан Тхань Дат.** Напряжения текучести и изменение структуры при пластической деформации заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 / П.А. Петров, Во Фан Тхань Дат, Фам Ван Нгок, И.А. Бурлаков, Нгуен Хань Тоан, Д.К. Рябов // Технология легких сплавов. – 2022. – №4. – С. 5-13.

64. **Во Фан Тхань Дат.** Построение кривых текучести алюминиевого сплава RS-356 на основе натурного и вычислительного эксперимента / П.А. Петров, Фам Ван Нгок, И.А. Бурлаков, А.Г. Матвеев, Б.Ю. Сапрыкин, М.А. Петров, Во Фан Тхань Дат. // Технология легких сплавов. – 2023. – №1. С. 63-69.

65. Хензель, А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением : Справочник / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

66. Marquardt, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D.W. Marquardt // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – V. 11. – № 2. – P. 431.

67. **Во Фан Тхань Дат,** Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан. Получение гибридных заготовок из порошкового алюминиевого сплава

RS-356 осадкой с кручением / Во Фан Тхань Дат, П.А. Петров, И.А. Бурлаков, Нгуен Хань Тоан // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №12. С. 621-625.

68. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 266 с.

69. Целиков, А.И. Теория прокатки : Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия. – 1982. – 335 с.

70. Voce E. The Relationship Between Stress and Strain for Homogeneous Deformation/ E. Voce // J.Inst.Met. – 1948. – № 74. – P. 537-562.

71. Kim J.R. Rasmussen. Full-range stress–strain curves for stainless steel alloys/ Kim J.R. Rasmussen // Journal of Constructional Steel Research. – 2003. – Volume 59. – Issue 1. – P. 47-61.

72. **Во Фан Тхань Дат.** Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации / Во Фан Тхань Дат, П.А. Петров, И.А. Бурлаков, Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, А.А. Гневашев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – № 3. – С. 78-88.

73. William F. Hosford. Metal forming mechanics and metallurgy THIRD EDITION / William F. Hosford, Robert M. Caddell // Cambridge University Press. – 2007. – 312 p.

74. Колентеев, Н.Я. Коэффициенты корреляции и детерминации / Н.Я. Колентеев, О.А. Гончарова // Специальная техника и технологии транспорта. – 2021. – № 10. – С. 206-212.

75. Rubtsov V.E., Kolubaev A.V. Effect of Heat Generation Due to Plastic Deformation on Behavior of Surface Layer Material during Sliding. // Journal of Friction and Wear. 30(5) (2009), pp. 324–328.

76. Salih O.S., Ou H., Sun W. Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy. // International Journal of Mechanical Sciences 238 (2023) 107827.

77. Saha R, Biswas P. Temperature and stress evaluation during friction stir welding of Inconel 718 alloy using finite element numerical simulation. // J Mater Eng Perform 31 (2022); pp. 2002–11.

78. Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А. Деформационное тепло при растяжении стальных элементов. // Наука и техника. 23(5) (2024), С. 390–396.

79. Li S., Li L., He H., Wang G. Influence of the deformation heating on the flow behavior of 6063 alloy during compression at medium strain rates. // J. Mater. Res., 34(2) (2019) pp. 309-320.

80. **Во Фан Тхань Дат.** Исследование теплового эффекта при пластической деформации заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 / Петров П.А., Бурлаков И.А., Во Фан Тхань Дат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – в печати.

81. Щербатов, Д.А. Совершенствование технологии осадки заготовок методом комбинированного нагружения на установке с независимым приводом / автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук : 05.02.09 / Д.А. Щербатов. – Нижний Новгород. – 2011. – 28 с.

82. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов // М.: Физметгиз, 1969. – 420 с.

83. Хван, Д.В. Технологические задачи пластического кручения / Д.В. Хван, А.Д. Хван, А.А. Воропаев, И.Г. Амрахов // Воронеж: Воронежский государственный университет. – 2011. – 160 с.

84. Хван, А.Д. Расчет энергосиловых характеристик прессы для штамповки с кручением / А.Д. Хван, В.В. Ковалев // Научная статья. – 2012. – № 4. – С. 122-125.

85. **Во Фан Тхань Дат.** Исследование энергосиловых параметров процесса формообразования гибридных заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 осадкой с кручением / Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 14. – С. 452-456.

86. Markus Bernd Grieb. Thermomechanical fatigue of cast aluminium alloys for cylinder head applications – experimental characterization and life prediction / Markus Bernd Grieb, Hans-Jürgen Christ, Burkhard Plege // *Procedia Engineering* 2. – 2010. – P. 1767–1776.

87. Snopiński, P., Król, M., Pagáč, M. et al. Effects of equal channel angular pressing and heat treatments on the microstructures and mechanical properties of selective laser melted and cast AlSi10Mg alloys / Snopiński P., Król M., Pagáč M. et al. // *Archiv.Civ.Mech.Eng.* – 2021. – Vol. 21, – № 92.

88. Курбаткина, Е.И., Количественный анализ фазовой диаграммы Al-Si с применительно к алюмоматричным композиционным материалам / Е.И. Курбаткина, Н.А. Белов, А.А. Аксенов // *Литейщик России.* – 2012. – № 11. – С. 23-27.

89. Латыш В.В. Повышение прочности технического титана BT1-0 методом интенсивной пластической деформации / Латыш В. В., Бурлаков И. А., Забельян Д. М., Алимов А. И., Петров П. А., Степанов Б. А., Бач Ву Чонг // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2018. – № 6. – С. 54-60.

90. Бурлаков И. А. Эволюция микроструктуры технического титана BT1-0 при интенсивной пластической деформации / Бурлаков И. А., Бач В. Ч., Петров А. Н., Логинов Б. А. // *Цветные металлы.* – 2019. – № 6. – С. 71-77.

91. Казаченок М.С. Влияние термического отжига на механическое поведение технического титана BT1-0, имеющего субмикроструктурную структуру в поверхностном слое или в объеме материала / Казаченок М. С., Панин А. В., Иванов Ю. Ф., Почивалов Ю. И., Валиев Р. З. // *Физическая мезомеханика.* – 2005. – Том 8, – № 4. – С. 37-47.

92. Okamoto H. Al-Ti (Aluminium-Titanium) // *Journal of Phase Equilibria.* –1993. –vol. 14, –nr. 1, – p. 120-121.

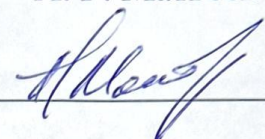
93. D. Batalu, Georgeta Coşmeleață, A. Aloman. Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams / *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, Vol. 68, No. 4, 2006, p 77-90.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СОСТАВНЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА РС-356 ОСАДКОЙ С
КРУЧЕНИЕМ**

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»

А. Г. Матвеев



от «29» 04 2025 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА РС-356 ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ

Измерение геометрических параметров осуществлять электронным штангенциркулем с точностью измерения 0,05 мм. Температуру измерять хромель-алюмелевой термопарой тип К с точностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Качество соединения оценивать визуально.

1. Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки из алюминиевого сплава РС-356 диаметром и высотой 12,5x21,1 мм (рисунок 1).

Контактные поверхности заготовок перед деформацией зачистить наждачной бумагой и протереть спиртом.



Рис. 1. Исходные заготовки

2. Нагрев исходных заготовок

Две исходные заготовки поместить в электрическую печь модели СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ предварительно нагретую до $250 \pm 10^\circ\text{C}$ и нагревать их в течение 20 минут.

3. Осадка без кручения

После нагрева двух заготовок перенести их на поверхность нижней холодной плиты штампа, установленного на гидропрессе модели ДБ-2432. Время переноса заготовок не более 5 секунд, за время до начала рабочего хода, составляющего не более 10 секунд, охлаждение заготовки не должно превышать 50°C . Осадку осуществлять за один ход ползуна до высоты 5,35 мм (деформация примерно 60%) со скоростью осевого перемещения ползуна 2 мм/сек (рисунок 2).

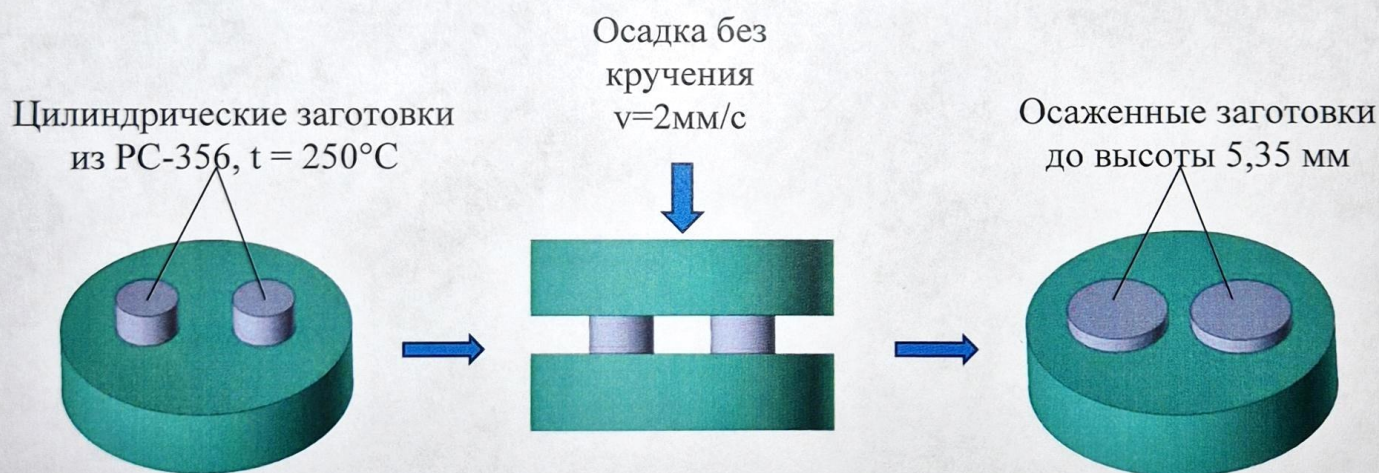


Рис. 2. Схема осадки без кручения

4. Нагрев осаженных заготовок

Пакет из двух осаженных заготовок снова нагреть в электрической печи модели СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ до температуры $350 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 40 минут с учетом ее падения при переносе заготовок в штамп.

5. Осадка с кручением. Получение составных изделий.

После нагрева перенести пакет двух заготовок на поверхность нижней плиты штампа, время переноса аналогично пункту 3.

Немедленно осадить заготовки с кручением до высоты 2,0 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 2 мм/сек, скорость вращения 36 градусов/сек на угол поворота до 144°.

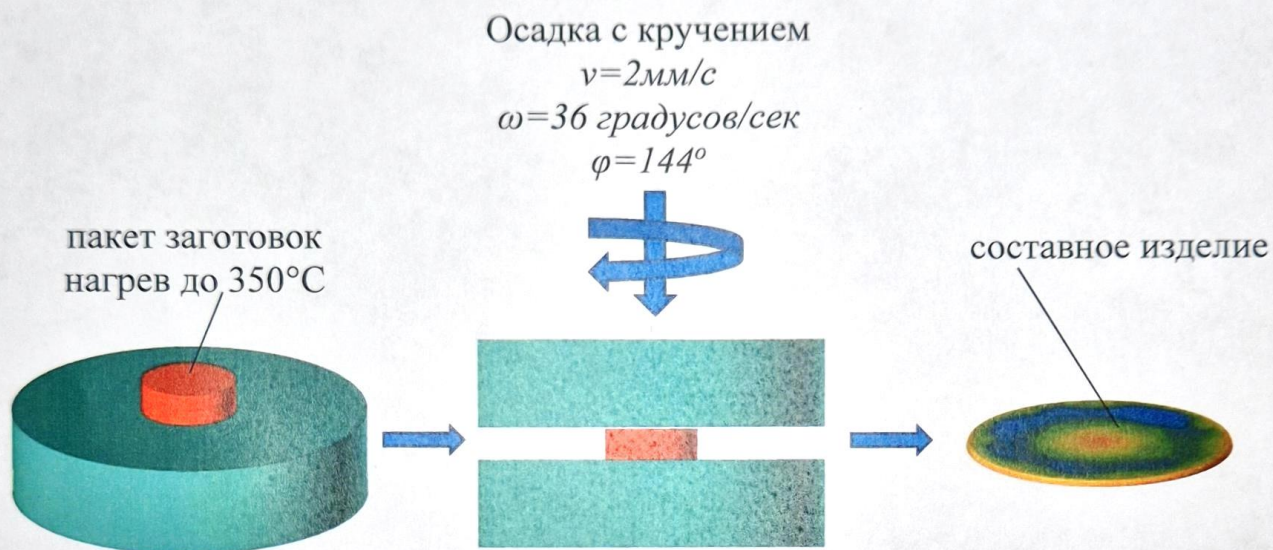


Рис. 4. Схема осадки с кручением



Рис. 5. Составное изделие

6. Поднять траверсу пресса и извлечь составное изделие.

7. Выполнить контроль полученного изделия по геометрическим параметрам, осуществить визуальный контроль качества полученной поверхности и соединения.

Разработчик

Во Фан Тхань Дат

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА РС-356 И ТИТАНА ВТ1-0 ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»

А. Г. Матвеев



от «29» 04 2025 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА РС-356 И ТИТАНА ВТ1-0 ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ

Измерение геометрических параметров осуществлять электронным штангенциркулем с точностью измерения 0,05 мм. Температуру измерять хромель-алюмелевой термопарой тип К с точностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Качество соединения оценивать визуально.

1. Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить одну цилиндрическую заготовку из алюминиевого сплава РС-356 диаметром и высотой 52x14 мм и исходную заготовку из титана ВТ1-0 согласно чертежу (рисунок 2).

Для удаления альфированного слоя на заготовке из титана ВТ1-0 по стандартному режиму необходимо осуществить травление в течение 30 – 60 минут в зависимости от толщины альфированного слоя в растворе:

- азотная кислота (15-20%),
- плавиковая кислота (5-10%),
- остальное вода.

Затем заготовки следует тщательно промыть в теплой, затем в холодной проточной воде.

Контактную поверхность заготовки из РС-356 перед деформацией зачистить наждачной бумагой и протереть спиртом.

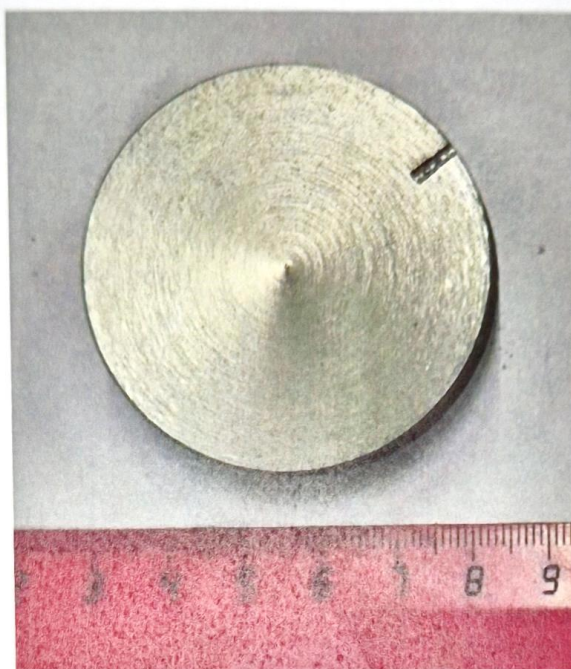


Рисунок 1 – Исходные заготовки

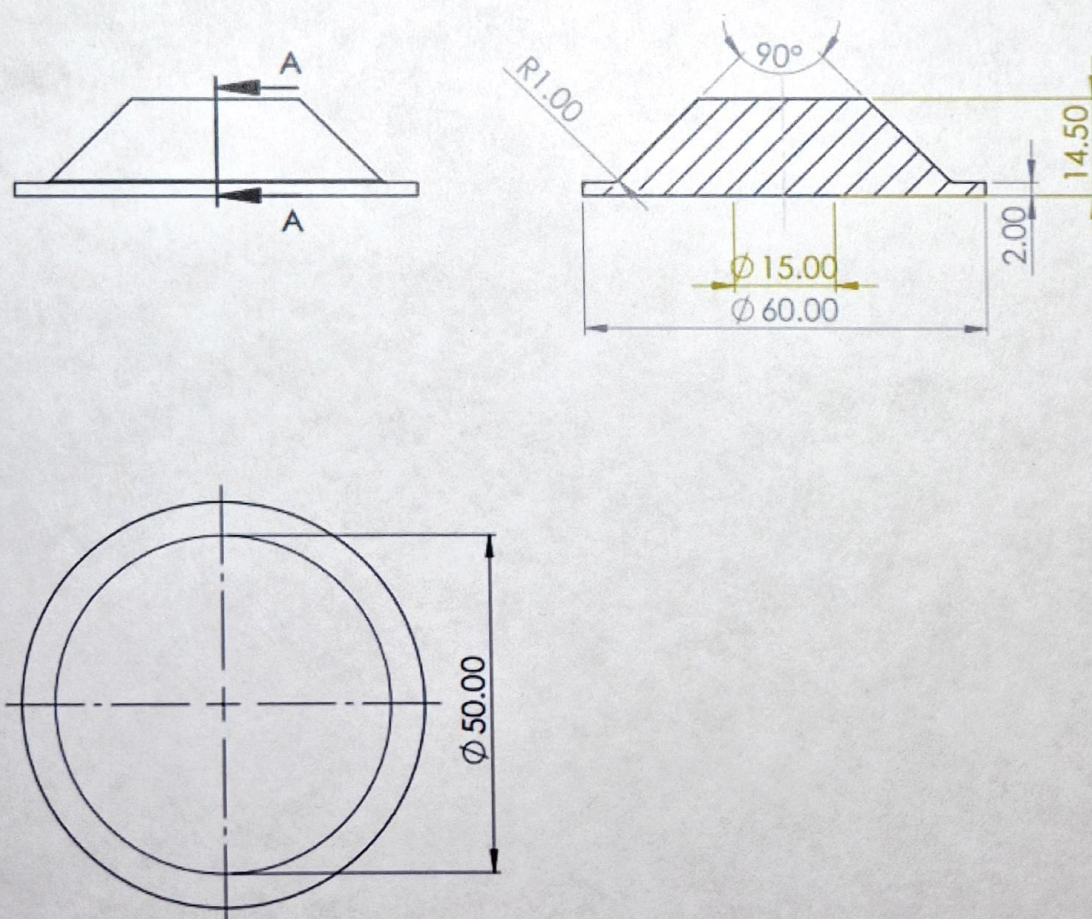


Рисунок 2 – Чертеж изготовления заготовки из титана BT1-0

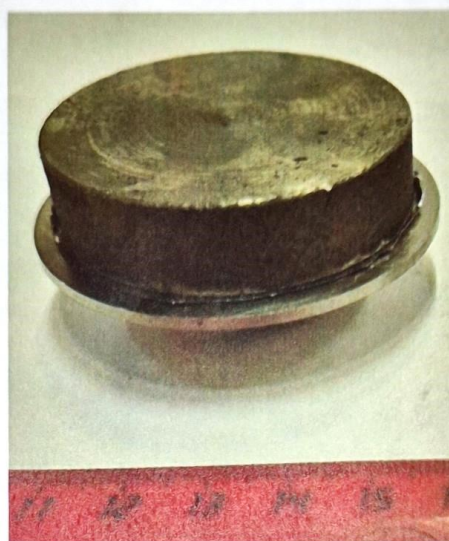


Рисунок 3 – Пакет заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0

2. Нагрев исходных заготовок

Матрицу совместно с размещенной в ней заготовкой из титана ВТ1-0 загрузить в предварительно нагретую электрическую печь модели СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ до $550 \pm 10^\circ\text{C}$ и нагреть в течение 3 часов с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп. Заготовку из сплава РС-365 нагреть в электрической печи модели СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 до $450 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 1 часа.

3. Получение составной изделий осадкой с кручением.

После нагрева до требуемой температуры матрицу с заготовкой из титана ВТ1-0 необходимо перенести в штамп, затем поместить заготовку из РС-356 на заготовку из титана ВТ1-0 и немедленно осадить пакет заготовок с кручением до толщины 22,0 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 2 мм/сек и углом поворота 108° .

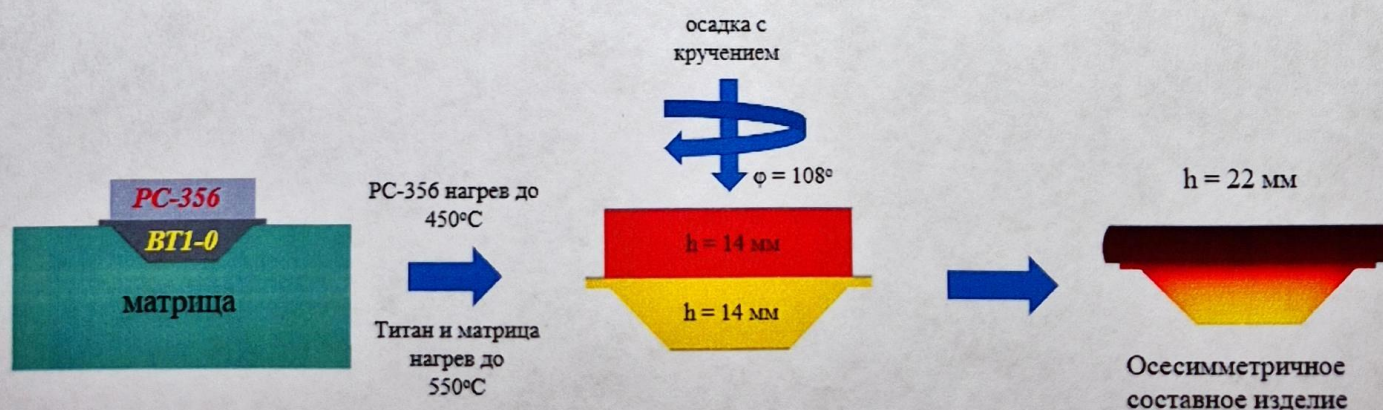


Рисунок 4 – Схема осадки с кручением



Рисунок 5 – Составное изделие

4. Поднять траверсу пресса и извлечь составное изделие
5. Выполнить контроль полученного изделия по геометрическим параметрам, осуществить визуальный контроль качества полученной поверхности и соединения.

Разработчик

Во Фан Тхань Дат

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС УНИВЕРСИТЕТОВ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

УТВЕРЖДАЮ

АКТ

№ 01-05/25

Московский Политех

(место составления)

Проректор по научной работе

К.Т.Д.

« 19 »

А.Ю. Наливайко

2025 г

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Разработка и исследование технологического процесса получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением», выполненной аспирантом кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Во Фан Тхань Дат.

Мы, нижеподписавшиеся директор департамента по образовательной политике, декан факультета машиностроения, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
(научно-исследовательской или диссертационной)

по теме «Разработка и исследование технологического процесса получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении аспирантов научной специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» и 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением» в форме лекции по общей теме «Исследование закономерностей течения металла при осадке с кручением составных заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0».

(направления подготовки: шифры и названия)

Кафедра, внедрившая результаты: «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии».

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол №9 от 29.04.2025.

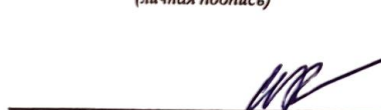
Начало использования объекта внедрения: 01 сентября 2025 года.

Директор департамента по образовательной политике


(личная подпись)

А.Б. Максимов

Декан факультета, внедривший разработку


(личная подпись)

Е.В. Сафонов

Заведующий кафедрой


(личная подпись)

А.Г. Матвеев

«XÁC NHẬN»

Phó Hiệu trưởng phụ trách đào tạo

Trường Đại học «Trần Đại Nghĩa»,

PGS, Tiến sĩ Lương Hồng Sâm

« 15 » 05 2025 r.



VĂN BẢN

Về việc sử dụng kết quả của luận án tiến sĩ “Nghiên cứu và phát triển và quy trình công nghệ sản xuất các sản phẩm đối xứng trục từ các phôi hybrid làm từ hợp kim nhôm RS-356 và titan VT1-0 bằng phương pháp dập xoắn” của ông Võ Phan Thành Đạt trong quá trình đào tạo của Trường Đại học “Trần Đại Nghĩa”, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Hội đồng bao gồm: Chủ tịch Hội đồng – Trưởng phòng Đào tạo Trường Đại học Trần Đại Nghĩa TS Nguyễn Mạnh Hùng; các thành viên: Kế hoạch tổng hợp TS Phạm Việt Hoàng và Chủ nhiệm khoa Cơ khí PGS, TS Trần Thế Văn đã họp và xác nhận các kết quả trong luận án tiến sĩ của ông Võ Phan Thành Đạt đã được ứng dụng trong quá trình đào tạo khi tiến hành các thí nghiệm và giải dạy thực hành cho sinh viên theo mã ngành 7510201 “Kỹ thuật cơ khí”, chuyên ngành “Công nghệ và máy gia công áp lực”.

Trưởng phòng Đào tạo,

TS. Nguyễn Mạnh Hùng

Bộ phận Kế hoạch tổng hợp,

TS. Phạm Việt Hoàng

Chủ nhiệm khoa KTCS,

PGS, TS. Trần Thế Văn

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по учебной работе



университета «Чан Дай Нгхиа»

к.т.н., доцент. Лыонг Хонг Сам

« 15 » 05 2025 г.

АКТ

об использовании результатов кандидаткой диссертации Во Фан Тхань Дата на тему: «Разработка и исследование технологического процесса получения осесимметричных изделий из составных заготовок алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением» в учебном процессе университета «Чан Дай Нгхиа», г. Хошиминь, Вьетнам

Комиссия в составе председателя – Начальник отдел обучения университета «Чан Дай Нгхиа», к.т.н., Нгуен Мань Хунг и членов: Начальника отдела планирования к.т.н., Фам Вьет Хоанг и декана факультета «Машиностроение» к.т.н., доцент. Чан Тхэ Ван составила настоящий акт, которым подтверждается, что результаты диссертации Во Фан Тхань Дата использованы в учебном процессе при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технологии и машины обработки давлением».

Начальник отдел обучения,
к.т.н.,

Нгуен Мань Хунг

Начальник отдел планирования,
к.т.н.,

Фам Вьет Хоанг

Заместитель декана факультета
«Машиностроение», к.т.н., доцент

Чан Тхэ Ван