

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., с.н.с

Бурлаков Игорь Андреевич

Москва – 2025

Актуальность работы

В различных отраслях промышленности, включая автомобиле-, авиа-, ракето- и судостроение, активно применяют составные заготовки, в том числе биметаллические. Этот подход позволяет создавать облегченные и экономически выгодные разнообразные 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 ограничения.

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.

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 $21,9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Этот недостаток возможно минимизировать путем его плакирования материалами с высокой теплопроводностью и малой плотностью, например, алюминием ($203,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), 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° . Решение этой задачи определяет актуальность настоящей диссертационной работы.

Цель 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.

Задачи исследования:

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. Отработать 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 угол.

Практическая значимость работы

1. Впервые полученная реологическая модель алюминиевого сплава РС-356, используемая в комплексном 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 обеспечивает возможность изготовления биметаллических изделий, в том числе деталей типа «диск биметаллический».

Методы исследования

Теоретические исследования базировались на основах теории пластичности, технологии машиностроения, теоретической механики и сопротивления материалов. Для анализа формообразования применялся метод конечных элементов в ПО QForm, что обеспечило численный анализ напряженно-деформированного состояния заготовок при осадке с кручением.

Обработка экспериментальных данных и построение диаграмм «напряжение–деформация» выполнялись в MATLAB, что позволило точно аппроксимировать данные и определить параметры моделей Хензеля–Шпиттеля для описания термомеханического поведения материала.

Эксперименты проводились с использованием гидравлического пресса «ДБ-2432» для осадки с кручением, микроскопов «Olympus Delta» и «FEI QUANTA 650» для микроструктурного анализа, испытательных машин «LFM250» и «LFM50» для реологических характеристик, прибора «DuraScan 20» для микротвердости и электрической печи «СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1» для нагрева заготовок и инструментов.

Формообразование составных изделий выполняли за одну операцию: сначала осадка без кручения на 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.

Степень достоверности 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 положения диссертационной работы были представлены на следующих 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», приуроченная 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).

Реализация работы: Результаты выполненных исследований используются в учебном процессе Московского политехнического университета при обучении аспирантов по научной специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением».

Публикации: По теме диссертации опубликованы 12 трудов, в том числе 7 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 1 статья в журнале, включенном в международные наукометрические базы Scopus/Web of Science.

Структура и объем диссертации: 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта важность проведённого исследования с точки зрения современного уровня научных и производственных задач. Отражены элементы научной новизны, обоснована теоретическая основа и прикладная направленность работы. Определены цель и ключевые задачи исследования, обозначены возможные области внедрения полученных результатов на производстве. Также приведены основные положения, подлежащие защите, с указанием их научной значимости и практической полезности.

В первой главе Рассмотрены особенности осадки цилиндрических заготовок, в том числе осадкой с кручением, способы получения порошковых заготовок и методы их осадки, методы определения энергосиловых параметров, используемых в процессах обработки металлов давлением, в том числе рассматриваются особенности подхода к изготовлению составных изделий.

Показано, что требования к проектированию и производству составных изделий растут с развитием машиностроения, и в первую очередь, авиастроения.

Для получения неразъемных соединений применяют различные методы. Это диффузионная сварка, сварка трением, ротационная сварка, диффузионная пайка, сварка плавлением и др. Однако их применение ограничено необходимостью нагрева заготовок до температур, близких к температурам плавления.

Поэтому в последние годы внимание специалистов, занимающихся созданием и исследованием новых материалов, привлекло новое научное направление, исключаящее плавление металла, связанное с получением одинарных заготовок и составных изделий процессами осадки с кручением (Субич В.Н., Демин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В., Валиев Р.З., Петров П.А., Буркин С.П., Аникин М.С., А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, Д.А. Щербатов, О.С. Кошелев и др.).

В работе приведен анализ современных методов повышения уровня исследования процессов осадки кручением. Исследования основаны на применении модернизированного гидравлического пресса с вращающимся бойком и позволяющего определять силовые параметры процесса за счет применения тензометрических устройств, определять угловую скорость и угол вращения бойка и регистрировать температурные параметры в процессе формоизменения заготовок путем применения термопар.

Приведенные методы с учетом результатов конечно-элементного моделирования позволяют повысить качество изготавливаемых изделий. Однако на момент начала исследования вопросы разработки технологических процессов осадки с кручением для производства составных изделий, особенно из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0, оставались недостаточно изученными. Это и определило цель и задачи работы.

Во второй главе изложена методика исследования параметров сопротивления деформации алюминиевого сплава РС-356, основанная на

сочетании экспериментальных данных и математического моделирования. Описаны химический состав и основные механические характеристики исследуемых материалов.

Эксперименты проводились с использованием современного технологического оборудования: гидравлического пресса «ДБ-2432» для осадки составных заготовок; оптического микроскопа «Olympus Delta» и сканирующего электронного микроскопа «FEI QUANTA 650» для микроструктурного анализа; испытательных машин «LFM250» и «LFM50» для получения реологических моделей; прибора «DuraScan 20» для измерения микротвердости; электрической печи «СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1» для нагрева заготовок и инструмента. Формообразование составных изделий осуществляли за одну непрерывную операцию, включающую на первом этапе осадку без кручения на величину 40-50% с последующим включением вращения верхнего бойка с углом вращения до 180 градусов.

На первом этапе были проведены эксперименты по изучению возможности изготовления составных заготовок из сплава РС-356 и, после получения положительных результатов, были проведены работы по изготовлению биметаллических изделий из сплава РС-356 и титана ВТ1-0.

В рамках исследования проведено математическое моделирование процесса осадки с использованием метода конечных элементов. Для реализации расчётов применялись реологические модели материалов, построенные на базе уравнения Хензеля–Шпиттеля и интегрированные в программную среду QForm.

В третьей главе подробно рассмотрен процесс аппроксимации экспериментальных зависимостей типа «напряжение текучести – деформация» с использованием уравнения Хензеля–Шпиттеля, учитывающего влияние термомеханических параметров:

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

где σ_i – напряжение текучести в текущий момент времени T_i ; A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_7 , m_8 , m_9 – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Определение коэффициентов модели осуществлялось методом наименьших квадратов с применением программных средств MATLAB и Microsoft Excel. Полученные значения коэффициентов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для алюминиевого сплава РС-356 (9 коэффициентов)

Тип деформации	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
20 – 300 °C	214,0419	-0,0021	-0,3945	0,003	-0,0994	-0,0028	0,3474	$6,77 \times 10^{-5}$	0,0501
400 – 450 °C	10,597	-0,0086	-0,082	0,3438	-0,0204	-0,0026	0,8587	-0,0006	0,8813

Аналогичным способом были определены параметры для модели Хензеля–Шпиттеля, включающей 5 коэффициентов, описываемой следующим выражением:

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^{m_2} \exp(-m_4 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \exp(-m_1 T) \quad (2)$$

где σ_i – напряжение текучести в момент t_i , A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Значения пяти коэффициентов, определённых для уравнения (2), приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для алюминиевого сплава РС-356 (5 коэффициентов)

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

В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина средней ошибки (S)

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}_i|}{|\sigma_i|} \cdot 100\%, \quad (3)$$

и коэффициента детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SE}{SE_{сред}}, \quad (4)$$

$$SE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_i)^2; \quad SE_{сред} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{исред})^2 \quad (5)$$

где n - объем выборки, σ_i - i -е экспериментальное значение напряжения текучести, полученное при деформации ε_i и фиксированном значении скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$ и температуры T_i , $\bar{\sigma}_i$ - i -е расчетное значение напряжения текучести, полученное по формулам 1 и 2 с учетом значений коэффициентов (см. таблицы 1 и 2); $\sigma_{исред}$ – среднее арифметическое значение напряжения текучести, определенное по полученным в эксперименте данным.

Коэффициент детерминации R^2 для оценки качества математической модели представлен формулами (4 и 5) и позволяет оценить долю дисперсии, которая может быть предсказана моделью экспериментальных данных. Считается, что при значениях R^2 от 0,8 до 1,0 математическая модель характеризуется хорошим качеством.

Расчет теплового эффекта был определен путем расчета процесса осадки цилиндрических образцов размером 10x10 мм. Повышение температуры металла в процессе пластической деформации происходит в результате выделения тепла при механической работе (рисунки 1-2). Если не учитывать теплопередачу в окружающую среду, повышение температуры определяется уравнением:

$$\Delta T = \frac{\alpha \int \bar{\sigma} d\varepsilon}{\rho C} = \frac{\alpha \bar{\sigma}_a \bar{\varepsilon}}{\rho C} \quad (6)$$

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).

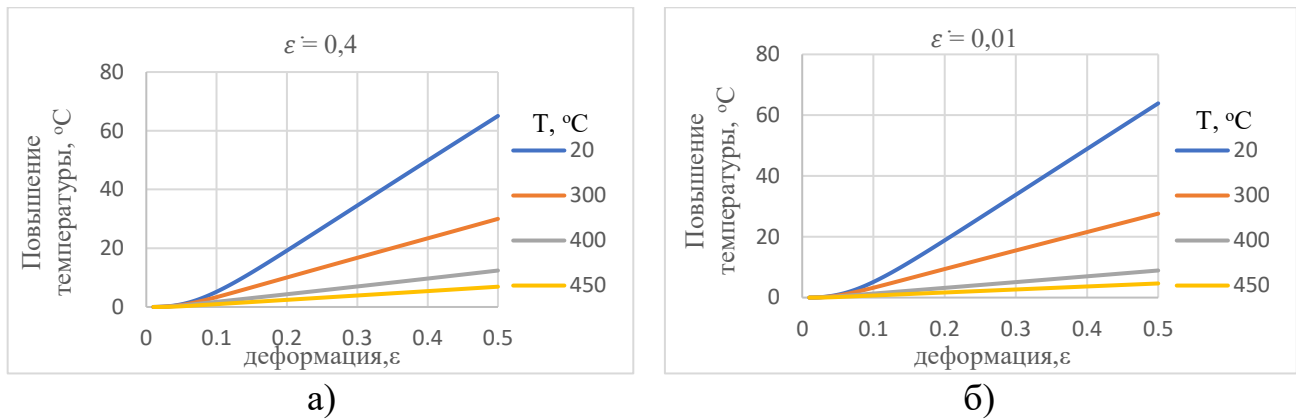


Рисунок 1 – Зависимости повышения температуры заготовки от величины деформации при различных температурах (при скоростях деформации $\dot{\epsilon}$: а - 0,4 с^{-1} , б - 0,01 с^{-1})

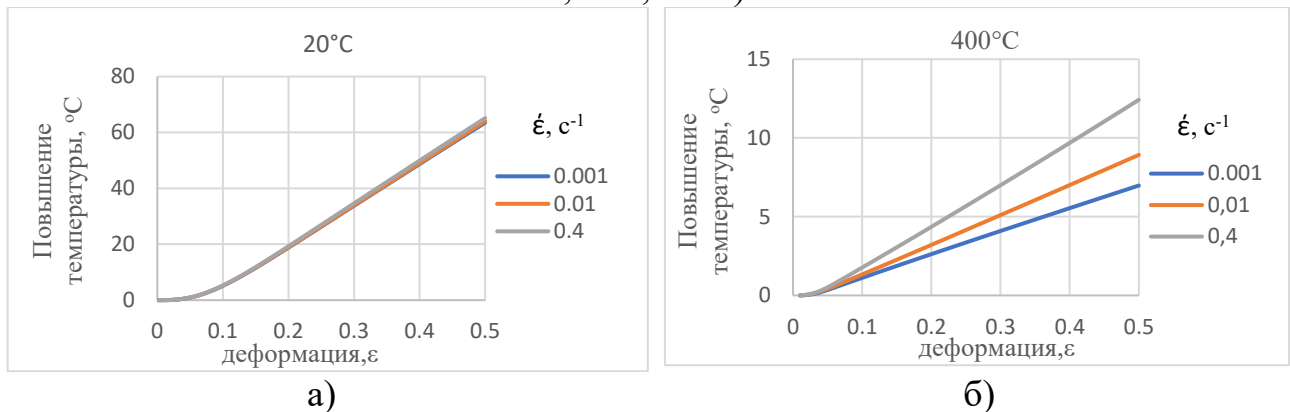


Рисунок 2 – Зависимости повышения температуры заготовки от величины деформации при различных скоростях деформации (при а - 20°C, б - 400°C)

Общая энергия, необходимая для процесса деформирования, определяется на основе уравнения баланса работ:

- Для осадки без кручения работа равна

$$A = A_{\Pi} = \epsilon P h_0 \quad (7)$$

- Для осадки с кручением работа складывается из работы ползуна прессы и работы кручения

$$A = A_{\Pi} + A_k \quad (8)$$

$$A_{\Pi} = \epsilon \sigma V = \epsilon P h_0 \quad (9)$$

$$A_k = M \omega t \quad (10)$$

где A - работа полной деформации; A_{Π} - работа ползуна прессы; A_k - работа кручения; $\epsilon = \ln(h_0/h)$ - 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 выведено выражение для касательного напряжения τ :

$$\tau = \sigma_0 \frac{\gamma(1-\epsilon)}{3R\epsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot \rho \quad (11)$$

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

Коэффициент накопленной деформации Δ и угловая деформация γ определяются по формулам:

$$\Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma^2 (1 - \varepsilon)^2}{R^2 \varepsilon^2}} \rho^2 \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{\omega t}{h_0 - h} \cdot R \quad (13)$$

Деформирующие нагрузки – сила сжатия P и крутящий момент M согласно статическим уравнениям равновесия будут равны

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma \rho d\rho \quad (14)$$

$$M = 2\pi \int_0^R \tau \rho^2 d\rho \quad (15)$$

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

$$R = R_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \varepsilon}} \quad (16)$$

где R_0 – исходный радиус заготовки;

Формулы (13), (14) имеют вид:

$$\Delta = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2}} = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{\omega^2 t^2 R_0^2}{h_0^2 \varepsilon^2 (1 - \varepsilon)}} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{\omega t}{h_0 (1 - \varepsilon)} \cdot R_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \varepsilon}} \quad (18)$$

Тогда значение крутящего момента будет равно:

$$M = \frac{2\pi}{9} \sigma_0 \gamma \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot R_0^4 \quad (19)$$

Результаты моделирования процесса осадки пакета из 2 заготовок за 2 перехода до высоты 2,0 ... 2,1 мм со скоростью осевого перемещения инструмента 2 мм/сек с угловой скоростью вращения 36 градусов в секунду с целью получения составного изделия из алюминиевого сплава РС-356 представлены в рисунке 3.

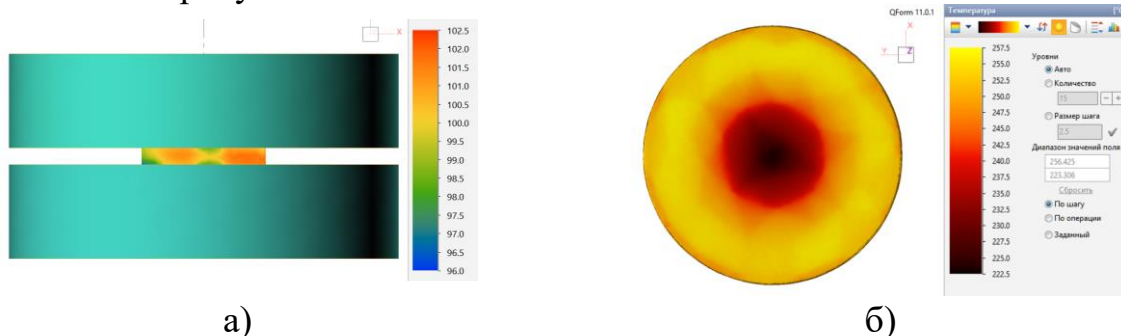


Рисунок 3 – Распределение температуры в меридиональном сечении заготовки из алюминиевого сплава РС-356 после первого (а) и второго (б) переходов

В четвертой главе представлены результаты проведенных испытаний на сжатие образцов РС-356 для построения кривых «напряжение текучести – деформация», определения энергосиловых и температурных параметров и изучения микроструктуры при их деформировании осадкой без кручения и с кручением.

По методике, приведенной в главе 2, испытания провели осадкой 36 цилиндрических образцов из алюминиевого сплава РС-356 размером $\varnothing 10 \times 10$ мм со скоростями деформации 0,001, 0,01, 0,4 сек⁻¹ и температурах 20, 300, 400, 450 °С. Полученные индикаторные диаграммы «сила деформирования» – «перемещение траверсы испытательной машины» показаны на рисунке 4. Полученные зависимости являются изотермическими кривыми, которые могут быть использованы для разработки математической модели сопротивления сплава РС-356 пластической деформации (рисунок 5). Как видно из рисунка сплав при высокой температуре не упрочняется, что значительно снижает силу деформирования (с 45 кН до 5 кН).

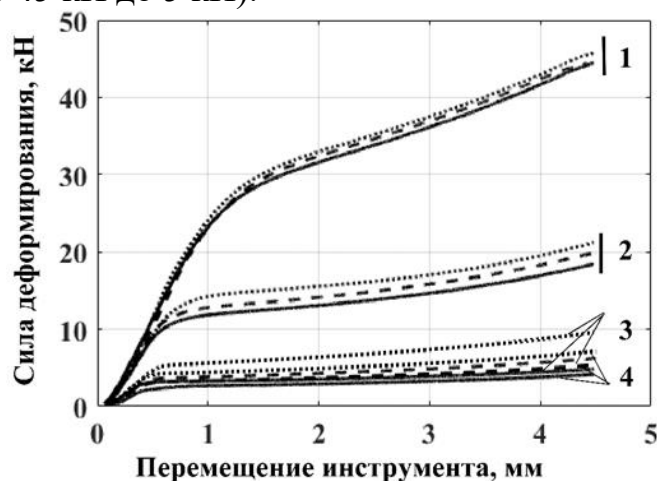


Рисунок 4 – Индикаторные диаграммы, полученные при сжатии образцов из сплава РС-356:

1 - 20°C; 2 - 300°C; 3 - 400°C; 4 - 450°C;
 — 0,001 с⁻¹; - - - 0,01 с⁻¹; 0,4 с⁻¹

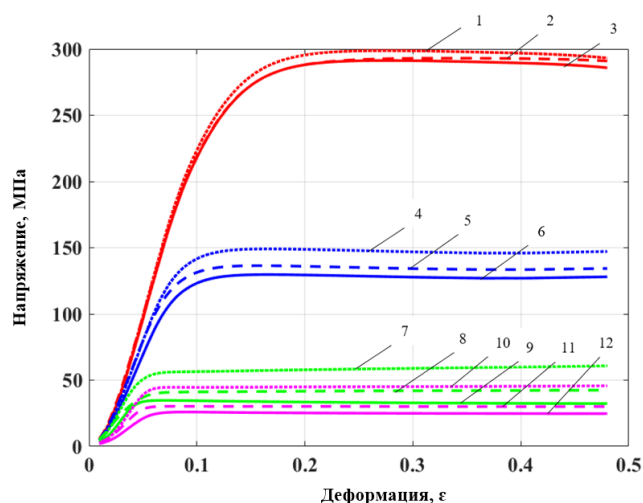


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости напряжения текучести сплава РС-356 от деформации и температуры:

1, 2, 3 – при температуре 20 °С и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 (с⁻¹),

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

Учитывая большое влияние температурно-скоростных режимов деформации на структуру металла и, следовательно, эксплуатационные свойства, были проведены эксперименты, результаты которых показаны на рисунках 6 (исходная структура) и 7 (структуры после пластической деформации с различными значениями температуры и скоростями деформации).

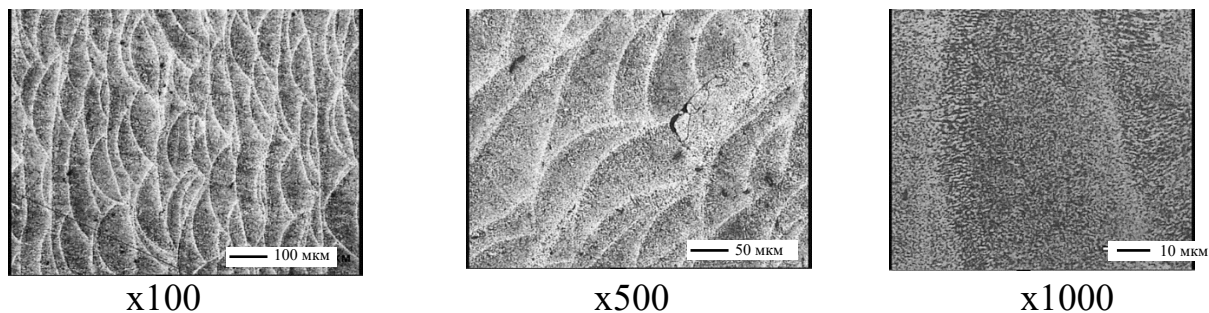


Рисунок 6 – Структура исходного образца из алюминиевого сплава

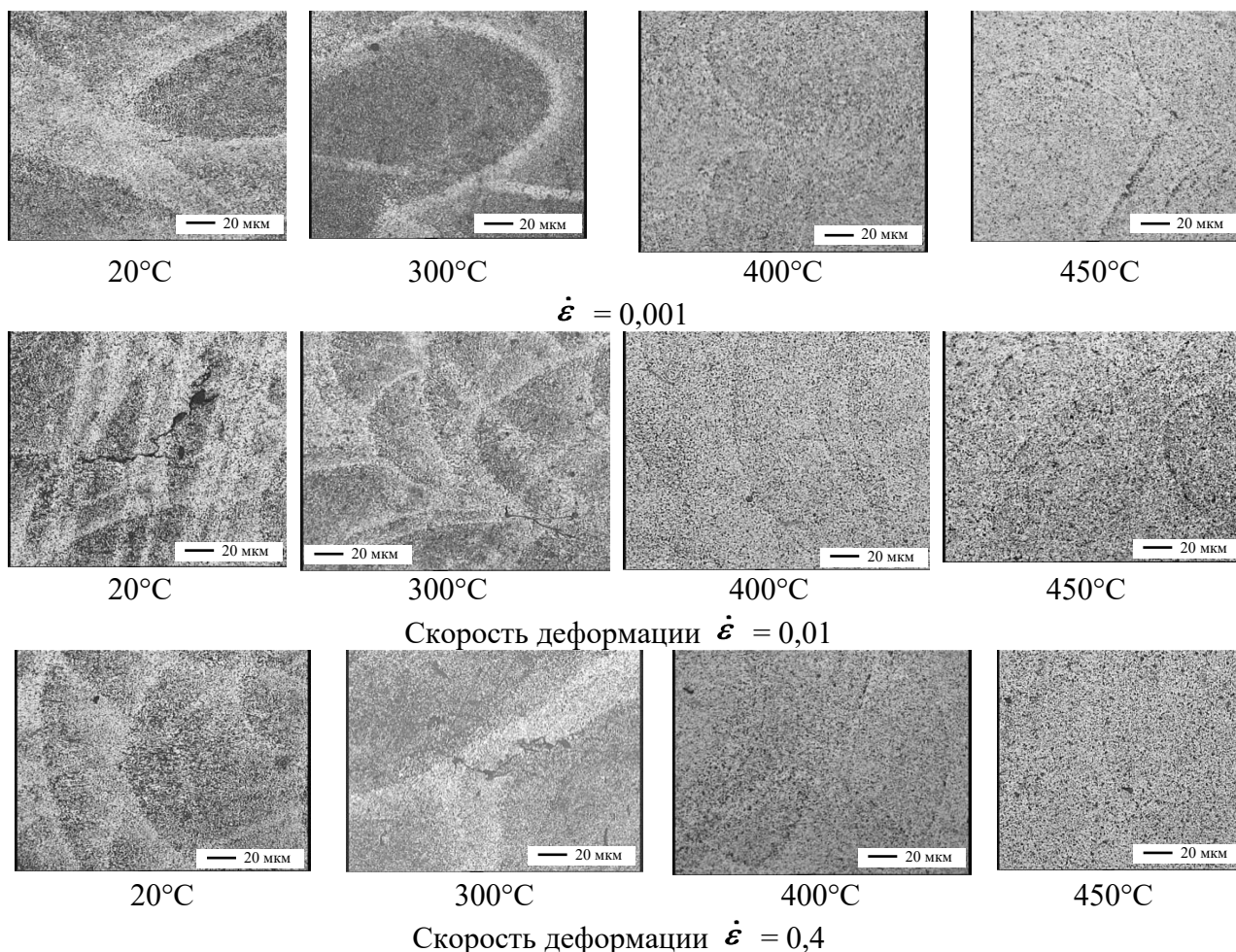


Рисунок 7 – Изменение микроструктуры в образцах алюминиевого сплава РС-356 в зависимости от температуры и скорости деформации (увеличение x500).

Как видно на рисунке 7 скорость деформации оказывает несущественное влияние на структурообразование во всем температурном интервале в отличие

от температуры, влияние которой в интервале 20 – 450 °С значительно. В образце, осажденном при температуре 450°С и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 0,4$, наблюдается практически однородная структура.

Схема экспериментов по получению составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 представлена на рисунке 8. 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 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, со скоростью вращения 36 градусов в секунду на угол поворота 144 градуса, до толщины 2,0 мм.

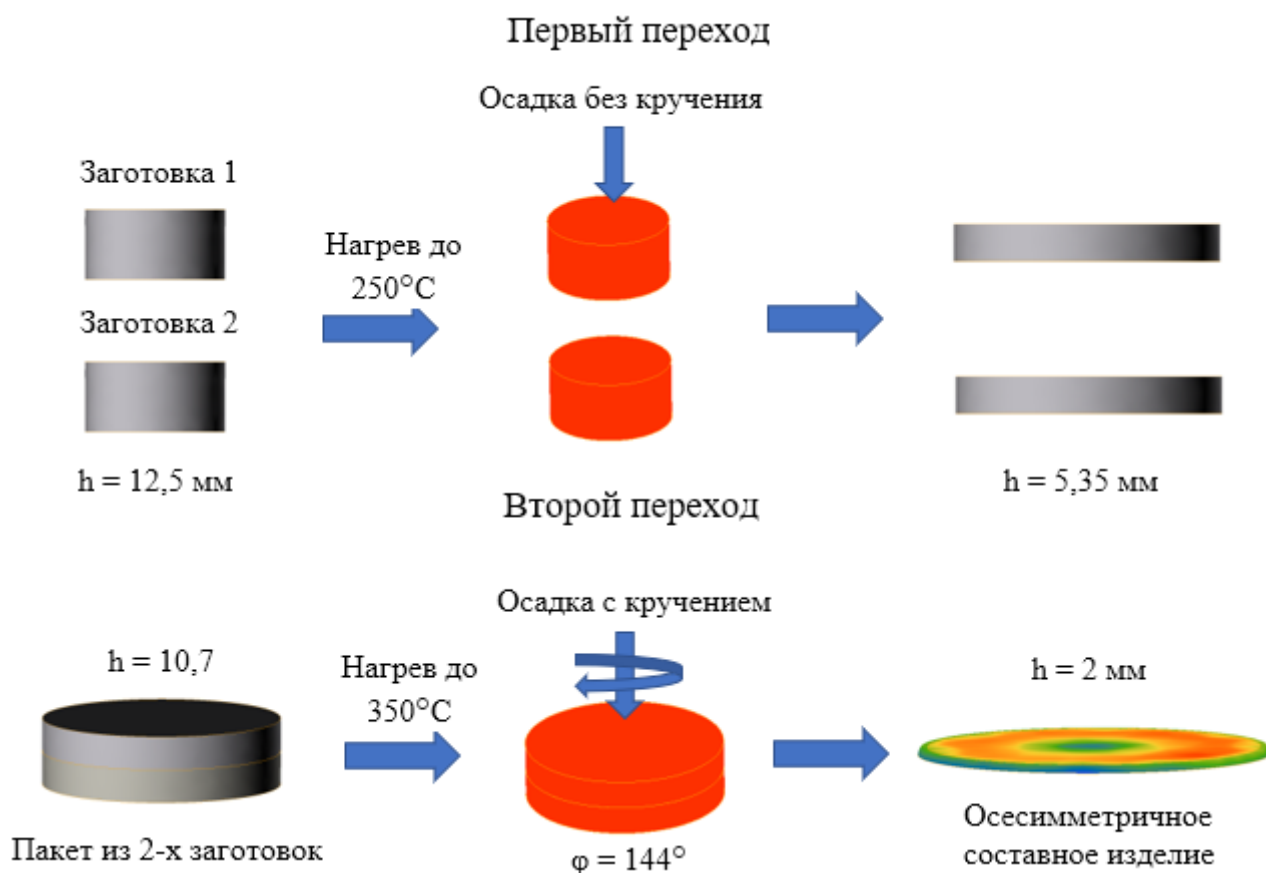


Рисунок 8 – Технологическая схема получения составных изделий из двух заготовок из алюминиевого сплава РС-356, $\phi = 144$ градусов

Результаты показаны на рисунках 9.

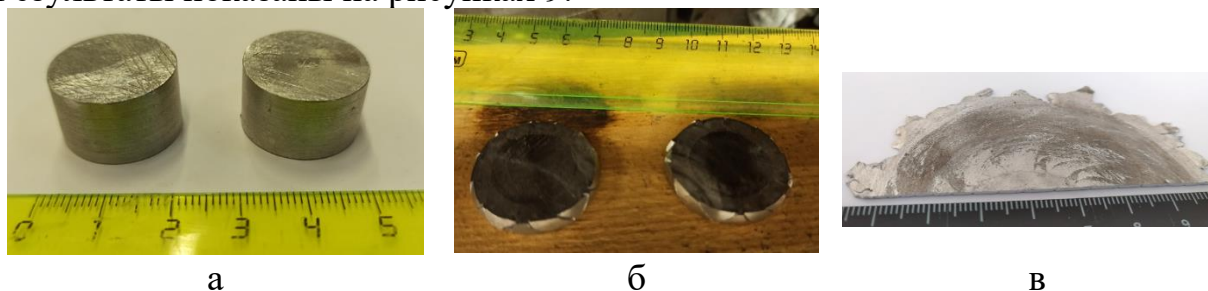


Рисунок 9. Заготовки из алюминиевого сплава РС-356 до (а) и после (б) первого перехода, сечение составного изделия (в)

Эксперименты по получению составного изделия из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 были выполнены согласно схеме, приведенной на рисунке 10. Полученное составное изделие и распределение температуры в них показаны в рисунках 11-12. Исходные цилиндрические заготовки из алюминиевого сплава РС-356 имели высоту 14 мм и диаметр 52 мм, исходные заготовки из титана ВТ1-0 высотой 14 мм были изготовлены согласно чертежу. Осадку с кручением с осевой скоростью 2 мм/сек на угол поворота 108° до толщины 22,0 мм.

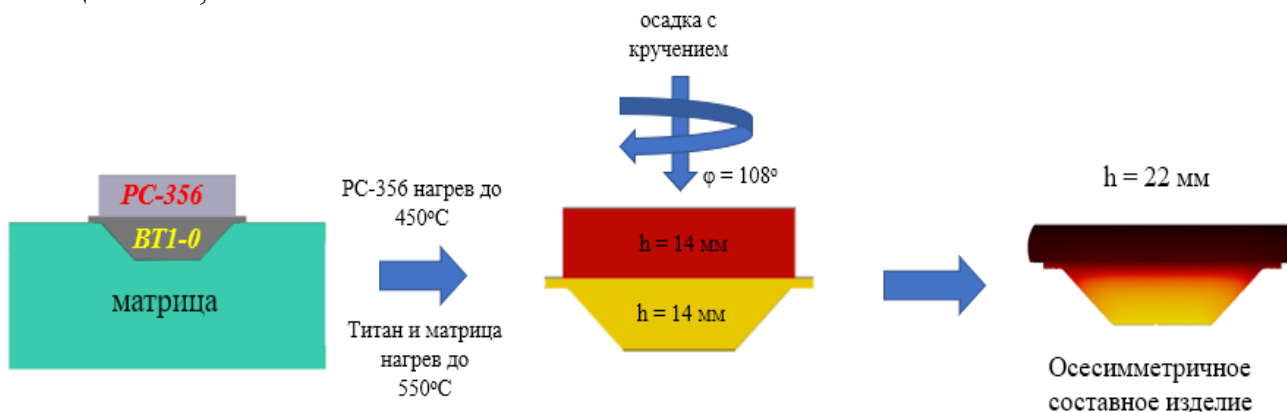
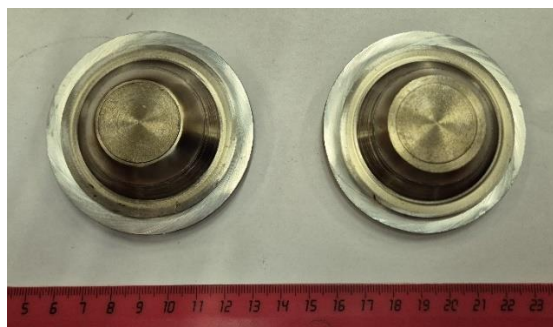


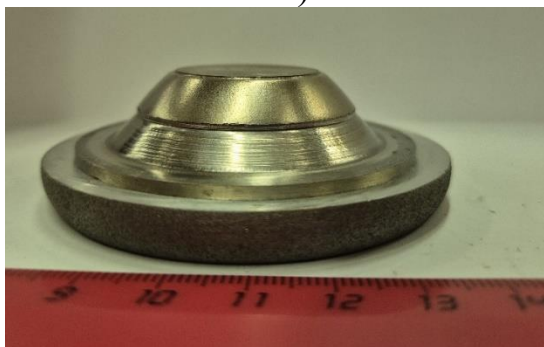
Рисунок 10 – Технологическая схема получения составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 осадкой с кручением, $\varphi = 108$ градусов



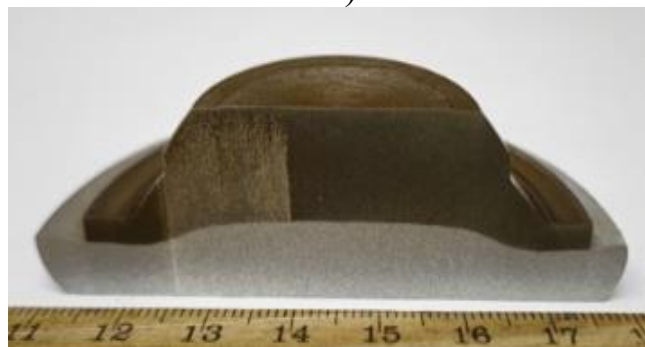
а)



б)



в)



г)

Рисунок 11 – Пакет заготовок из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 до (а), после осадки с кручением (б,в), сечение после электроэрозионной резки (г)

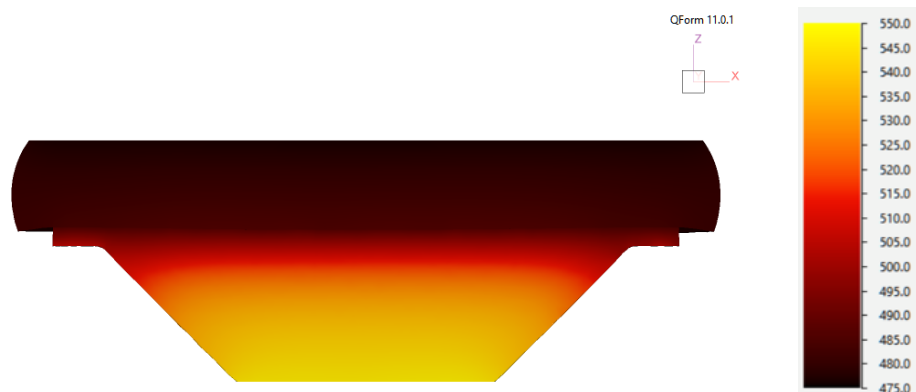


Рисунок 12 – Распределение температуры в составном изделии из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 (моделирование)

В пятой главе выполнен анализ полученных результатов исследований. На рисунке 13 показано сравнение теоретических кривых напряжения текучести с экспериментальными данными, полученными при осадке образцов из алюминиевого сплава РС-356.

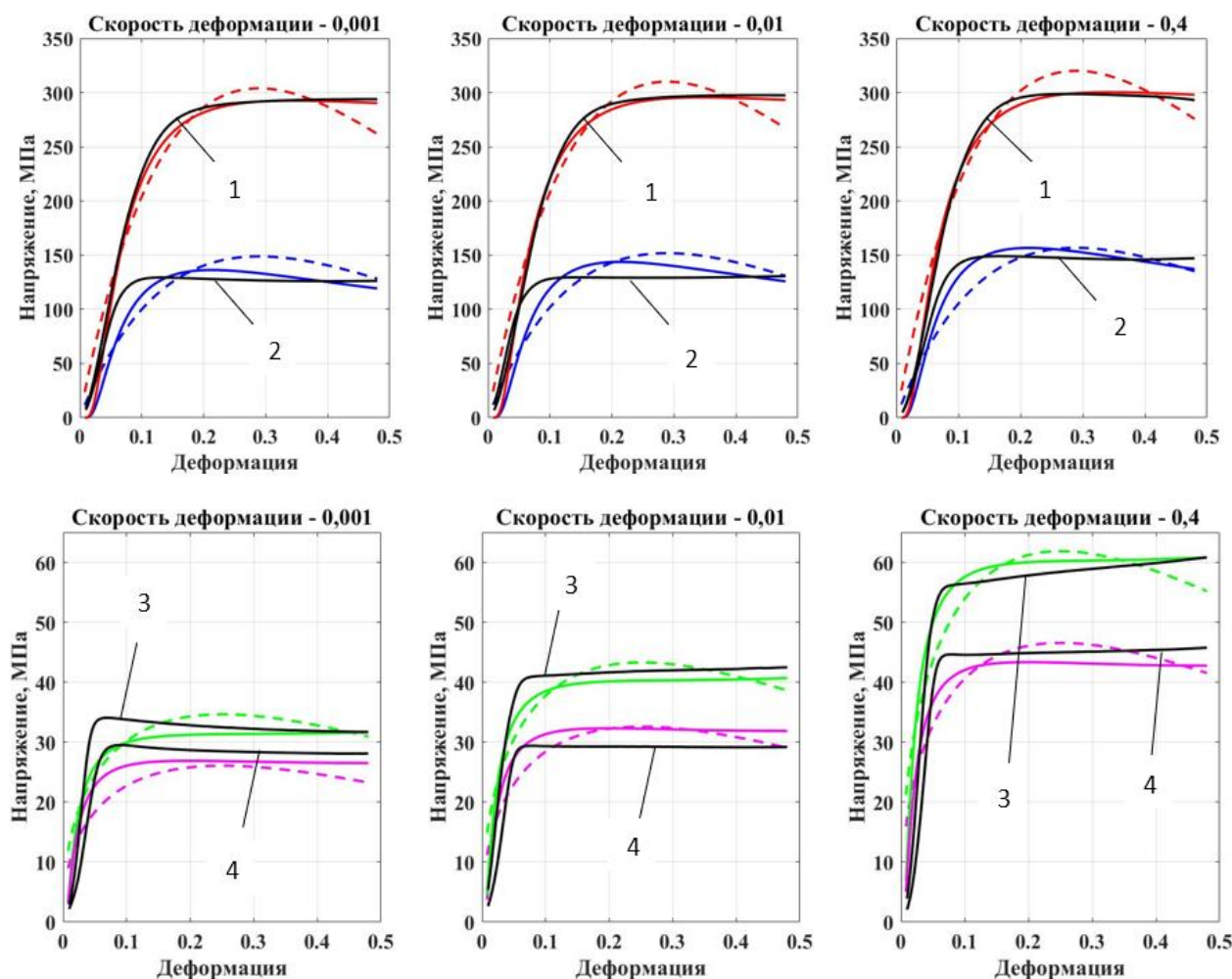


Рисунок 13 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов со различными скоростями деформации:

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

Экспериментальные и расчетные результаты характеризуются хорошим совпадением со значениями коэффициентов детерминации ($R^2 = 0,92-0,97$). Применение модели с 9-ю неизвестными коэффициентами позволяет оценить точность в температурном диапазоне 20-450 °С, ошибка не превышает 9,7 %. Однако модели с 5-ю неизвестными коэффициентами имеют более высокие значения ошибки S (11,7-14,2%) при горячей деформации (300-450 °С).

Таким образом, рекомендуем применять реологические модели с 9-ю коэффициентами (формула 1) для моделирования алюминиевого сплава РС-356 в интервале температур 20-450 °С, а модели с 5-ю коэффициентами (формула 2) применять только для холодной деформации (20 °С).

Сравнение экспериментальных и расчетных значений температурных и силовых параметров процесса осадки образцов из алюминиевого сплава РС-356 как без кручения, так и с кручением, показало хорошее совпадение, подтверждаемое коэффициентом детерминации R^2 более 0,92 (рисунки 14–15). Поэтому найденная математическая модель позволяет сделать корректный выбор оборудования и выбрать рациональные режимы формообразования заготовок из алюминиевого сплава РС-356.

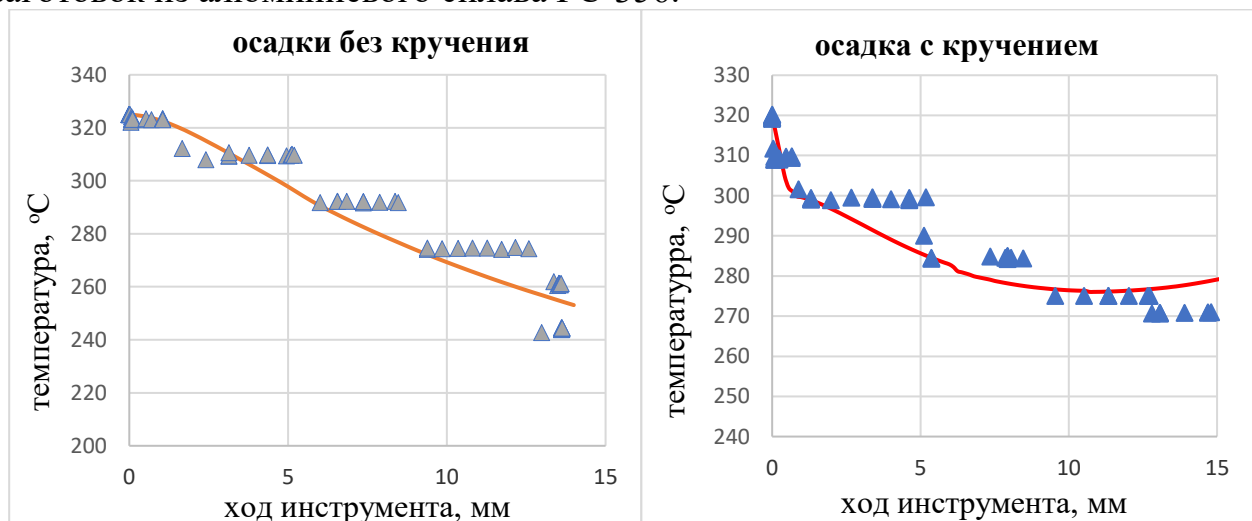


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных теплового эффекта процесса: точки – расчет; линия – эксперимент

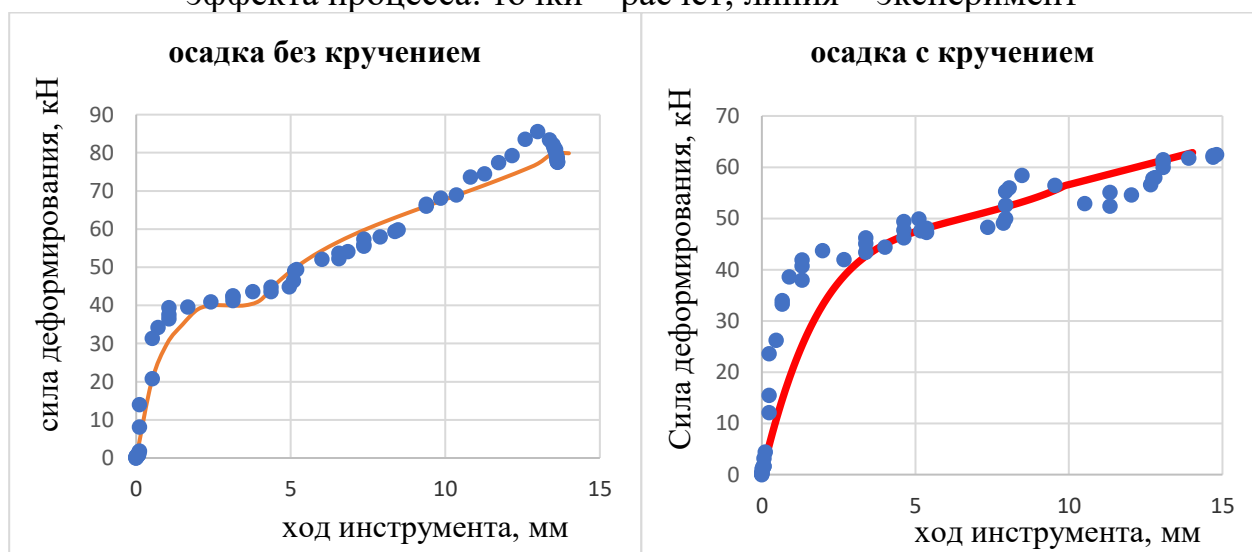


Рисунок 15 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных силовых параметров, точки – расчет; линия – эксперимент

При использовании экспериментальных данных в формулах (7)-(19) получим:

при осадке без кручения:

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

при осадке с кручением:

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

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

$$M = \frac{2\pi}{9} \sigma_0 \gamma \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \Delta^{-1} \cdot R_0^4 = 0,013 \quad \text{кН.м}$$

$$\text{работа: } A = A_{\text{п}} + A_{\text{к}} = \varepsilon P h_0 + M \omega t = 1,054 + 0,139 = 1,193 \quad \text{кДж}$$

Изучение влияния термомеханических режимов на энергосиловые параметры показывает, что использование метода осадки с кручением при пластических деформациях алюминиевых сплавов, таких как РС-356, позволяет снизить энергетические затраты до 20% по сравнению с методом осадки без кручения.

Осадка составных заготовок с учетом найденных параметров деформации позволила получить изделия с малозаметной границей контакта, видимой только после травления (рисунок 16).

Если исходная заготовка имела равноосные α -зерна размером 10-15 мкм, то, как видно на рисунках 16 и 17, в зоне контакта наблюдается интенсивное измельчение зерен. В результате структура превращается в механическую смесь мелкозернистых фрагментов.

граница контакта

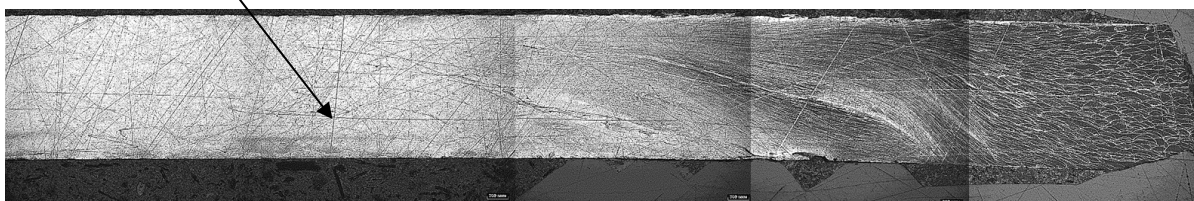
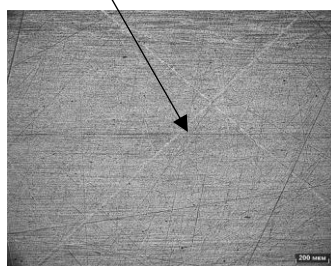


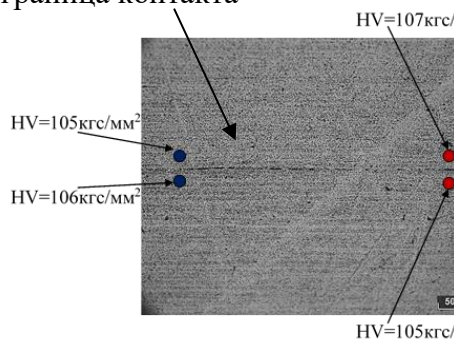
Рисунок 16 – Макрошлиф составного изделия, увеличение x50

граница контакта



x100

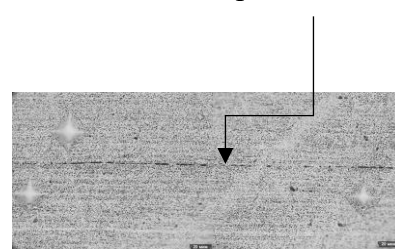
граница контакта



x500

центр изделия

граница контакта



x1000

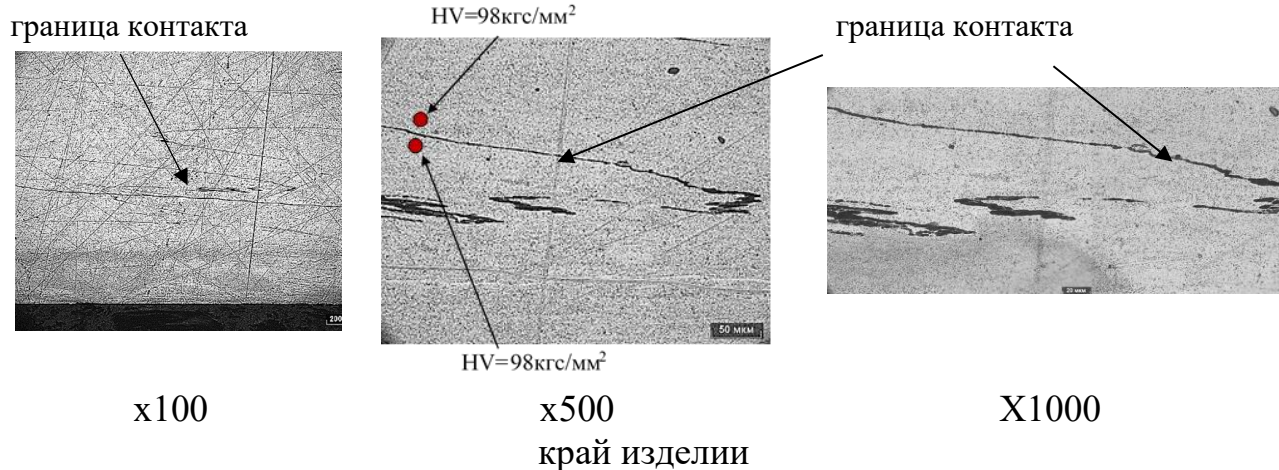


Рисунок 17 – Микроструктура составного изделия из сплава РС-356 в меридиональном сечении (после травления)

Металлографический анализ зоны соединения показал однородность микроструктуры как вблизи границы контакта, так и непосредственно в зоне соединения (рисунок 18).

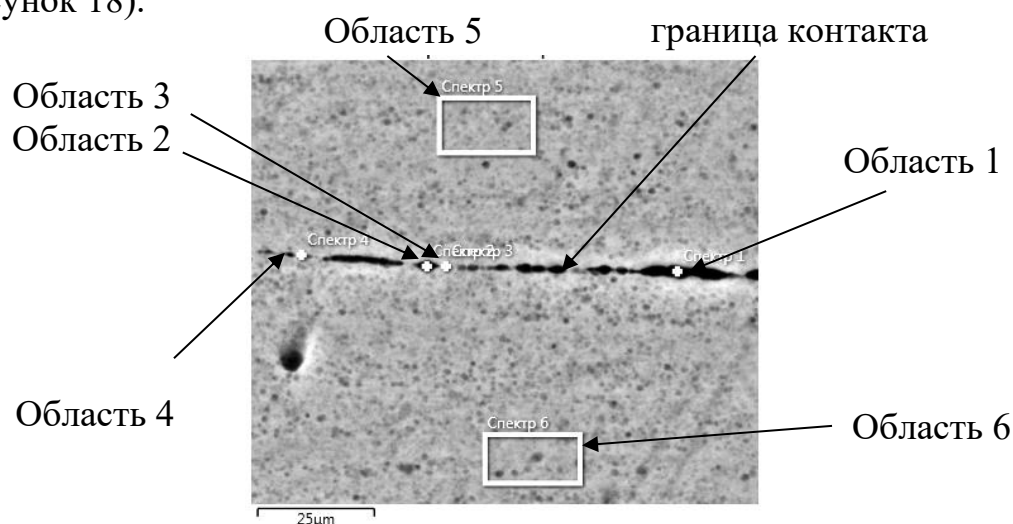


Рисунок 18 – Рентгеноспектральный микроанализ изделия в зоне контакта (центр изделия)

Химический состав секторов областей (рисунок 18) приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Химический состав областей

Название спектра	Al	Si	Сумма	Наименование участка
Область 1	97.88	2.12	100.00	граница 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	Заготовка усл.1
Область 6	93.69	6.31	100.00	Заготовка усл.2

Полученные данные позволяют 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 пустот.

Изучение влияния осадки с кручением на микротвердость показало, что в центральной зоне изделия микротвердость по Виккерсу практически одинакова

и равна $HV_{0,1} = 105 - 106$ единиц, что характеризует качество соединения заготовок; в краевой зоне различие несколько большее и составляет $HV_{0,1} = 90 - 106$ единиц. В периферийной зоне материал практически не деформирован и твердость по Виккерсу составляет 60 единиц при исходной твердости 96-98 единиц.

Сравнение результатов экспериментальных и расчетных сил деформирования показано на рисунке 19.

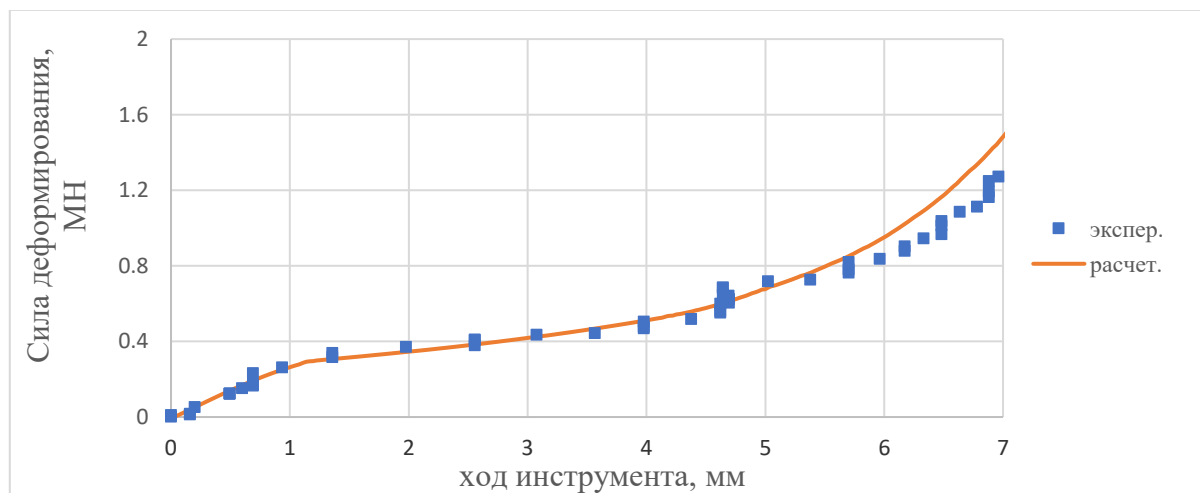


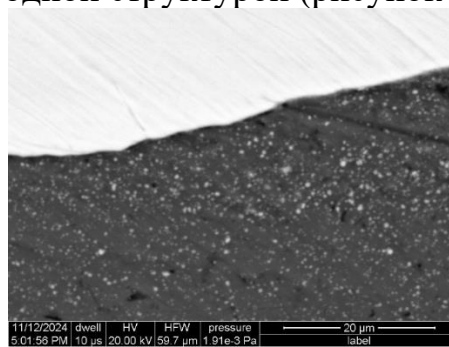
Рисунок 19 – Сравнение результатов экспериментальных и расчетных сил деформирования

Совпадение расчетных значений силы с экспериментальными данными изделия со средней ошибкой меньше 5% (4,63%) и со значением коэффициента детерминации R^2 равным 0,98 показывает возможность определять силу процесса формообразования методом моделирования.

Осадка с кручением пакета из алюминиевого сплава РС-356 и титана ВТ1-0 в рассмотренных условиях позволила получить изделия с соединением, характеризующимся отсутствием пор и однородной структурой (рисунок 20).



x500

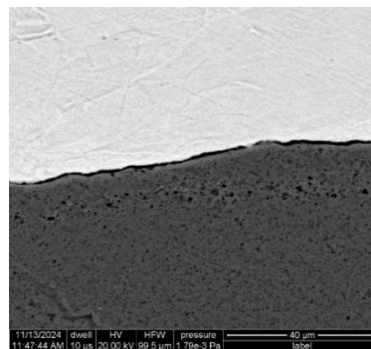


x1000

краевая зона изделия



x500



x1500

центральная зона изделия

Рисунок 20 – Микроструктура в зоне контакта составной изделия из PC-356 и BT1-0

Как видно на рисунке 21, микроструктура изделия 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, микроструктура заготовки из алюминиевого сплава PC-356 имеет мелкодисперсное внутризеренное строение.

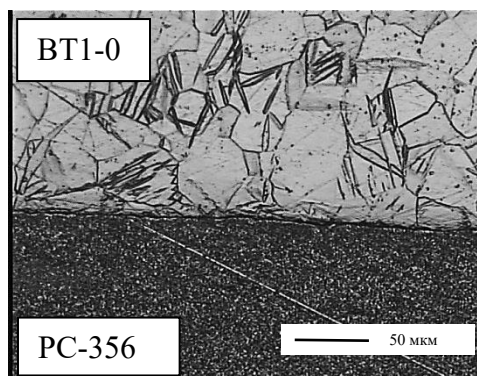


Рисунок 21 – Микроструктура в зоне соединения составной изделия из PC-356 и BT1-0



Рисунок 22 – Схема исследования микротвердости вблизи границы контакта составного изделия из PC-356 и BT1-0

Микротвердость составных заготовок в центре в зоне соединения составляет $HV_{0,1} = 175$ единиц и увеличивается до 190 в краевой зоне, что связано с увеличением окружной скорости (рисунок 22, таблица 4).

Таблица 4 – 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

На электронном микроскопе с применением метода рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) был исследован химический состав материалов изделия (рисунок 23, таблица 5).

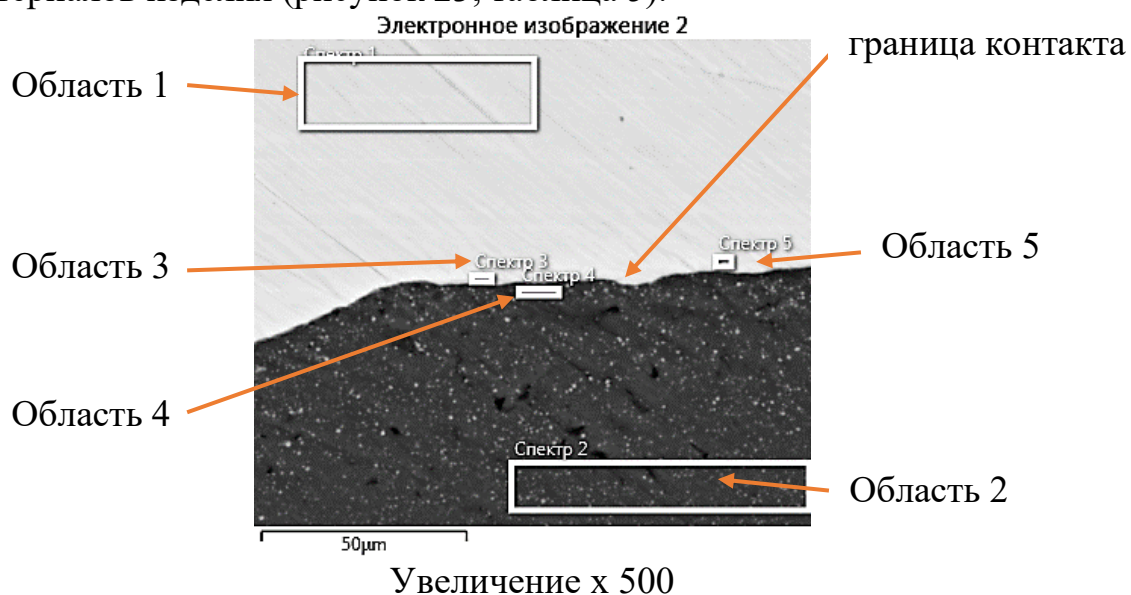


Рисунок 23 – Результат рентгеноспектрального микроанализа

Таблица 5 – Химический состав материала в областях, указанных на рисунке 23

Название области	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	

На основе анализа фазовой диаграммы Ti – Al и результатов определения химического состава секторов (таблица 5) было найдено, что образовавшиеся в процессе формообразования сравнительно прочные фазы Ti_3Al , $TiAl_2$ в зоне соединения обеспечивают надежное соединение материалов ($Ti_3Al - \sigma_B = 220...600$ МПа, $TiAl - \sigma_B = 350...580$ МПа).

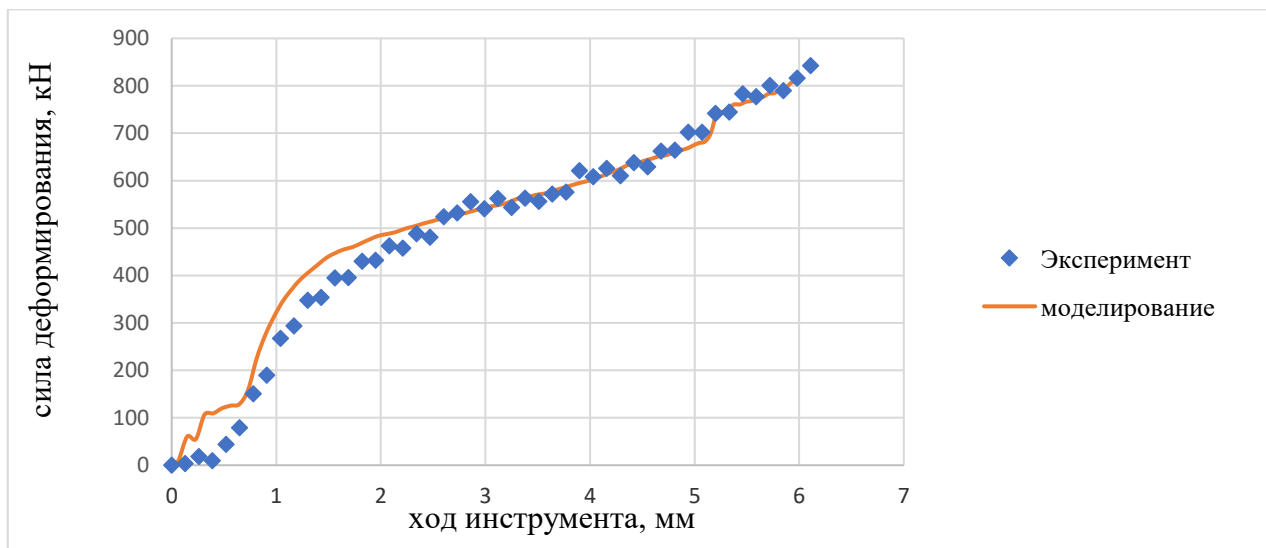


Рисунок 24 – Сравнение результатов экспериментальных и расчетных сил деформирования

Сравнение сил деформирования, определенных расчетом с применением программного обеспечения QForm, с экспериментальными данными (рисунок 24) дает совпадение с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача по разработке процесса формообразования составных изделий из алюминиевого сплава РС-356 и титана BT1-0 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 параметров. 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 $TiAl_2$.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

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

2. **Во Фан Тхань Дат.** Построение кривых текучести алюминиевого сплава RS356 на основе натурального и вычислительного эксперимента / Петров П.А., Фам Ван Нгок, Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А., Во Фан Тхань Дат // Технология легких сплавов – 2023. – №.1 – С. 63-69

3. **Во Фан Тхань Дат.** Оценка качества соединения гибридных алюминиевых заготовок методом осадки с кручением / Петров П. А., Бурлаков И. А., Нгуен Х. Т., Во Фан Т. Д. // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечнопрессовое, литейное и другие производства) – 2024. – № 3. – С. 116-121.

4. **Во Фан Тхань Дат.** Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации / Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан // Заготовительное производство // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова – 2024. – №3. – С. 78-88.

5. **Во Фан Тхань Дат.** Получение гибридных заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 осадкой с кручением / Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2023. – №12. – С. 621-625.

6. **Во Фан Тхань Дат.** Исследование энергосиловых параметров процесса формообразования гибридных заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 осадкой с кручением / Известия Тульского государственного университета. Технические науки // – 2024. – №3. – С.452-456.

7. **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, Нгуен Хань Тоан // Известия Тульского государственного университета. Технические науки // – в печати.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science:

8. **Vo Phan Thanh Dat.** Study of the Temperature and Strain Rate Effects on the Structure of Materials in Metal Formation of Nonferrous Hybrid Blanks / P. A. Petrov, I. A. Burlakov, Pham Van Ngok, Nguyen Khanh Toan, Vo Phan Thanh Dat, and R. Yu. Sukhorukov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability (vol 51 no 6) – 2022 / с. 582-589.

Публикации в изданиях, индексируемых РИНЦ:

9. **Во Фан Тхань Дат.** Исследование влияния температурно-скоростных режимов деформации на структуру материалов в процессе формообразования гибридных заготовок из цветных сплавов / Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат, Сухоруков Р.Ю. // Проблемы машиностроения и надежности машин №6 – 2022 / с.104-112.

Статьи в сборниках материалов научных конференций:

10. **Во Фан Тхань Дат.** Изучение температурных характеристик заготовок из порошкового алюминиевого сплава при пластической деформации / Во Фан Тхань Дат, Бурлаков И.А. // Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», приуроченная к 65-летию доктора технических наук, профессора Яковлева С.С. – г. Тула. – 2022.

11. **Во Фан Тхань Дат.** Построение реологических модели алюминиевого сплава RS-356 / Во Фан Тхань Дат, Нгуен Хань Тоан, Бурлаков И.А. // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2022. – № 5 – С.31-34.

12. **Во Фан Тхань Дат.** Изучение изменения микротвердости и структуры в процессе формообразования заготовок из порошкового сплава RS-356 / Во Фан Тхань Дат, И.А. Бурлаков, П.А. Петров, Фунг Ван Туан // Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации», 22-23 декабря 2023 г., г.Тула. Сборник трудов. – 2024. – С. 47-49.