

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

На правах рукописи



НГУЕН ХАНЬ ТОАН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВНЫХ
ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ
ОСАДКИ С КРУЧЕНИЕМ**

Специальность: 2.6.4. Обработка металлов давлением (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, с.н.с

Бурлаков Игорь Андреевич

Москва - 2023

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	$F_{\text{деф}}$	сила деформации, Н
8	ПКП	поперечно-клиновья прокатка
9	СТП	сварка трением с перемешиванием
10	ИД	интенсивная деформация
11	НВ	твёрдость по Бринеллю
12	НV	твёрдость по Виккерсу

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1. Цветные сплавы в машиностроении	13
1.2. Основные методы получения гибридных заготовок	20
1.2.1. Поперечно - клиновая прокатка (ПКП)	21
1.2.2. Сварка трением с перемешиванием (СТП)	24
1.2.3. Осадка с кручением	26
1.3. Принцип образования соединения гибридных заготовок при осадке с кручением	30
1.4. Особенности формообразования гибридных заготовок	32
Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов	40
2.2. Методы исследования образцов	43
2.2.1. Исследование микроструктуры	43
2.2.2. Испытание на осадку с кручением.....	44
2.2.3. Анализ методом конечных элементов	50
2.2.4. Методика определения фактора трения	53
2.2.5. Методика определения микротвердости	54
Выводы по главе 2	54
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	56
3.1. Определение реологической модели изучаемых материалов	56
3.2. Изучение влияния скорости скольжения металла по его поверхности на контактное напряжение	63
3.3. Моделирование процесса осадки с кручением гибридных заготовок	69
Выводы по главе 3	72

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	74
4.1. Микроструктура титановых образцов при пластической деформации заготовок из сплава ОТ4-1.....	74
4.2. Изготовление гибридных титановых заготовок при осадке с кручением	76
4.3. Изготовление гибридных алюминиевых заготовок при осадке с кручением	79
4.4. Изготовление гибридных заготовок из медного сплава БрХ0,8 осадкой с кручением.....	82
4.5. Изготовление гибридных разнородных заготовок при осадке с кручением	83
Выводы по главе 4.....	89
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	91
5.1. Определение реологических моделей исследуемых материалов	91
5.2. Отработка процесса осадка с кручением титанового сплава	102
5.3. Отработка процесса осадка с кручением алюминиевых сплавов	104
5.4. Отработка процесса осадка с кручением медного сплава.....	105
5.5. Отработка процесса осадка с кручением разнородных сплавов ..	106
5.6. Анализ результатов определения зависимости с учетом скольжения металла по поверхности при осадке с кручением	108
Выводы по главе 5.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	136

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	140
Акт о внедрении в учебный процесс Московского политехнического университета результатов диссертационной работы.....	141
Акт об использовании результатов кандидаткой диссертации в учебном процессе университета «Чан Дай Нгхиа»	142

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение в больших количествах потребляет тонкостенные осесимметричные детали с изотропными свойствами, в том числе из цветных металлов, таких как алюминий, медь, цинк и их сплавы, которые широко используются в строительстве, производстве аккумуляторов, электроники, транспортных средств и других высокотехнологичных товаров.

В последние годы технология изготовления гибридных заготовок быстро развивалась во многих странах, в первую очередь, для применения в автомобильной промышленности для снижения массы изделий и повышения безопасности автомобилей за счет изготовления таких биметаллических деталей, как внутренняя часть дверей, бамперов, панелей пола и т. д. Они представляют собой заготовки, изготовленные из однородных либо разнородных материалов, отличающихся по прочности, маркам и толщине, предварительно сваренные или соединенные каким-либо другим методом и пригодные для формообразования полуфабрикатов готовых деталей обработкой давлением.

Для получения гибридных заготовок могут быть применены такие операции, как сварка лазерным лучом, соединение трением с перемешиванием (Friction-Stir Welding, FSW) или методом интенсивной пластической деформации, например, горячей прокаткой или объемной штамповкой. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые подлежат анализу перед определением рациональной технологии для получения гибридных заготовок. Одним из перспективных и малоизученных способов изготовления гибридных заготовок является осадка пакета из двух или более заготовок вращающимся инструментом, обеспечивающая высококачественное соединение.

В связи с отсутствием накопленного опыта и экспериментальных данных по изготовлению гибридных заготовок работа, направленная на отработку и исследование методов получения гибридных деталей из сплавов с различными механическими и физическими свойствами, является актуальной.

Цель диссертационной работы - Определение научно-обоснованных деформационных режимов формообразования осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом осадки с кручением.

Задачи исследования:

1. Определить функциональные зависимости между сопротивлением деформации титанового сплава ОТ4-1 и термомеханическими параметрами (температура, скорость деформации и величина деформации) (уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю коэффициентами), в том числе, соответствующими интервалу горячей объемной штамповки.

2. Установить на основе натурных экспериментов зависимость, определяющую влияние скорости скольжения деформируемого металла на контактное трение в процессе осадки с кручением заготовок из медного сплава БрХ0,8 и позволяющую повысить точность моделирования процесса получения гибридных заготовок методом осадки с кручением.

3. Оценить влияние температурно-скоростных режимов деформации на структуру материала и качество соединения в процессе формообразования гибридных заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 методом осадки с кручением и качество соединения измерением микротвердости и изучением микроструктур с целью предотвращения разрушения на границе контакта соединяемых заготовок.

4. Разработать методику проектирования технологического процесса с применением компьютерного имитационного моделирования для изготовления методом осадки с кручением осесимметричных гибридных заготовок из однородных и разнородных материалов.

Объект исследования - процесс штамповки вращающимся инструментом (осадка с кручением) при различных температурах заготовок и скоростях деформации.

Предмет исследования - качество соединения гибридных заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 при формировании полуфабрикатов

деталей, получаемых методом осадки с кручением при холодной и горячей деформациях.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложены реологические модели титанового сплава ОТ4-1 с применением уравнений Хензеля–Шпиттеля с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами методом осадки цилиндрических образцов с учетом различных термомеханических параметров (температуры, скорости деформации, величины деформации) в диапазоне температур 20-800°C и скоростей деформации 0,001-0,4 с⁻¹. Показано, что установленная функциональная зависимость (уравнение Хензеля – Шпиттеля с 9-ю неизвестными коэффициентами) обеспечивает высокую точность расчета энергосиловых параметров в процессе осадки с кручением с погрешностью меньше 8,5%.

2. Впервые изучена структура гибридных заготовок из цветных сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 полученных формообразованием в различных температурно-скоростных условиях деформации осадкой с кручением.

3. Впервые предложена функциональная зависимость, отражающая влияние скорости скольжения материала заготовки на контактное трение при осадке с кручением заготовок из медного сплава БрХ0,8. Функциональная зависимость применена в разработанной подпрограмме «*friction.sliding_velocity*», позволяющей в процессе компьютерного моделирования определять скорость скольжения, что повышает точность моделирования процесса осадки с кручением заготовок из данного материала на 10-15%.

Теоретическая значимость работы.

1. Получены зависимости для описания реологических свойств титанового сплава ОТ4-1 (уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами), позволяющие определять напряженно-деформированное состояние материала при холодной и горячей обработках давлением, в том числе при получении гибридных заготовок, а также пополнить базу деформируемых

материалов в расчетных компьютерных программах, предназначенных для моделирования процессов обработки металлов давлением.

2. Получена зависимость для оценки влияния скорости скольжения на контактное трение при осадке с кручением, позволяющая на 10-15% повысить точность результатов компьютерного имитационного моделирования процесса осадки с кручением заготовок из медного сплава БрХ0,8.

3. Показана, что разработанная специализированная подпрограмма «*friction.sliding_velocity*» для повышения точности моделирования процессов деформации может быть применена для анализа процесса деформации заготовок из цветных сплавов с использованием программы QForm.

Практическая значимость работы.

1. На основе анализа структурных изменений материала гибридных заготовок из цветных сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 до и после процесса осадки с кручением в зависимости от температурно-скоростных параметров разработаны научно-обоснованные режимы холодной и горячей деформации с кручением осесимметричных заготовок для получения качественных соединений гибридных заготовок, что подтверждено результатами исследования микроструктуры и микротвердости.

2. Впервые получены гибридные заготовки из двух разнородных материалов с высоким качеством соединения и полуфабрикат детали, что свидетельствует о возможности для их дальнейшего применения при изготовлении деталей типа «кронштейн», обладающих комплексом механических и структурных свойств, достаточных для эксплуатации.

3. Впервые получены полуфабрикаты из гибридных заготовок с двумя разнородными материалами (типа «кронштейн» и «колпачка») и гибридная заготовка с тремя слоями материалов (алюминиевый сплав АМг2 и медный сплав БрХ0,8). Установлено, что полученные полуфабрикаты и заготовки имеют высокое качество соединения, что подтверждено результатами исследования микроструктуры и микротвердости получаемых гибридных заготовок.

Методы исследования.

При выполнении работы применялись апробированные методы исследования: оптическая и электронная металлография, механические испытания на сжатие и сжатие с кручением, а также измерение микротвердости. Экспериментальные исследования процесса осадки вращающимся инструментом выполнены на лабораторной установке, смонтированной на гидравлическом прессе ДБ-2432 номинальной силой 1,6 МН, с регистрацией положения формообразующего инструмента, силы и температуры в течение рабочего хода.

В теоретических исследованиях использовалось математическое моделирование с применением метода конечных элементов. Расчеты производились в программе MATLAB для обработки результатов экспериментальных исследований реологического поведения изучаемых сплавов. Для конечно-элементного анализа процесса был применен программный комплекс QForm.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости напряжения текучести сплавов ОТ4-1 от трёх параметров (величины деформации, скорости деформации, температуры) с 9-ю и 5-ю коэффициентами (уравнения Хензеля-Шпиттеля) в диапазонах скоростей деформации $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$ и температур $20-400^\circ\text{C}$ и $600-800^\circ\text{C}$;

2. Зависимость контактного касательного трения, учитывающая скорость скольжения материала одной заготовки относительно материала другой заготовки и основанная на разработанной подпрограмме для компьютерного моделирования процесса получения гибридных заготовок осадкой с кручением с применением метода конечных элементов.

3. Научно-обоснованные режимы холодной и горячей осадки с кручением осесимметричных заготовок, позволяющие получать высококачественные гибридные заготовки.

4. Способ получения гибридного полуфабриката детали из двух разнородных материалов с высоким качеством соединения, что открывает новые возможности для его применения в машиностроении.

Степень достоверности результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается применением современного аттестованного испытательного и металлографического оборудования, специализированных станков и методов определения температурно-скоростных параметров в процессе формообразования заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8, а также современных конечно-элементных методов численного моделирования для анализа процессов. Основные результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- XXVIII Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2021), диссертант награжден грамотой за представленный доклад и активное участие в работе;
- Форум «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 2021);
- XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021) (Москва, 2021), диссертант награжден почетным дипломом за наиболее интересное научное сообщение;
- II Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (Томск, 2022), диссертант награжден дипломом в номинации «За актуальность научной проблемы»;
- V Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (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);

- Форум «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm» (Москва, 2023);

- Международная научно-техническая конференция «Современное перспективное развитие науки, техники и технологий» (Воронеж, 2023), диссертант награжден дипломом первой степени за активное участие в работе;

- 6-я Всероссийская научная конференция «Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее» (Курск, 2023), диссертант награжден дипломом второй степени за активное участие в работе.

- Всероссийскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула, 2023).

Реализация работы. Результаты выполненных исследований внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении аспирантов по научной специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением», а также в учебный процесс университета имени «Чан Дай Нгхиа» (г. Хошимин, Вьетнам).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 трудов, в том числе 5 статей в рецензируемом издании из перечня ВАК, 4 статьи в журналах, включенных в международные наукометрические базы Scopus/Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка, приложения. Текст диссертации изложен на 143 страницах машинописного текста, иллюстрирована 75 рисунками, содержит 16 таблиц. Библиографический список включает 102 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Цветные сплавы в машиностроении

Цветные металлы, как сырьевой продукт с большим объемом международного потребления, играют очень важную роль и имеют большое значение во многих аспектах, таких как национальное экономическое развитие и конкурентоспособность [1]. С точки зрения данных об объеме операций в международной торговле цветными металлами, более 20 стран, включая Китай, США и Бразилию, являются основными участниками международной торговли цветными металлами [2, 3]. В настоящее время реальная цена на цветные металлы на мировом рынке постоянно сильно колеблется. Такие колебания цен для экономического развития страны не только открывают большие возможности и пространство для развития, но и создают большие проблемы в области развития. Это требует создания надежной основы для прогнозирования рядов цен на цветные металлы. Примечательно, что с точки зрения точности прогнозов даже небольшое улучшение может дать огромные экономические выгоды [4]. Однако при прогнозном моделировании данных временных рядов сложный характер самого ряда данных часто становится препятствием для точного моделирования [5]. Волатильность и нелинейные характеристики ряда цен на цветные металлы затрудняют достижение точного моделирования [6].

Важные цветные металлы, производимые в больших количествах, включают (в порядке объема производства) алюминий (Al), медь (Cu), марганец (Mn), цинк (Zn), свинец (Pb), никель (Ni) (рисунок 1.1), и их сплавы широко используются в строительстве, производстве аккумуляторов, электроники, транспортных средств и других передовых технических и высокотехнологичных товаров [7].

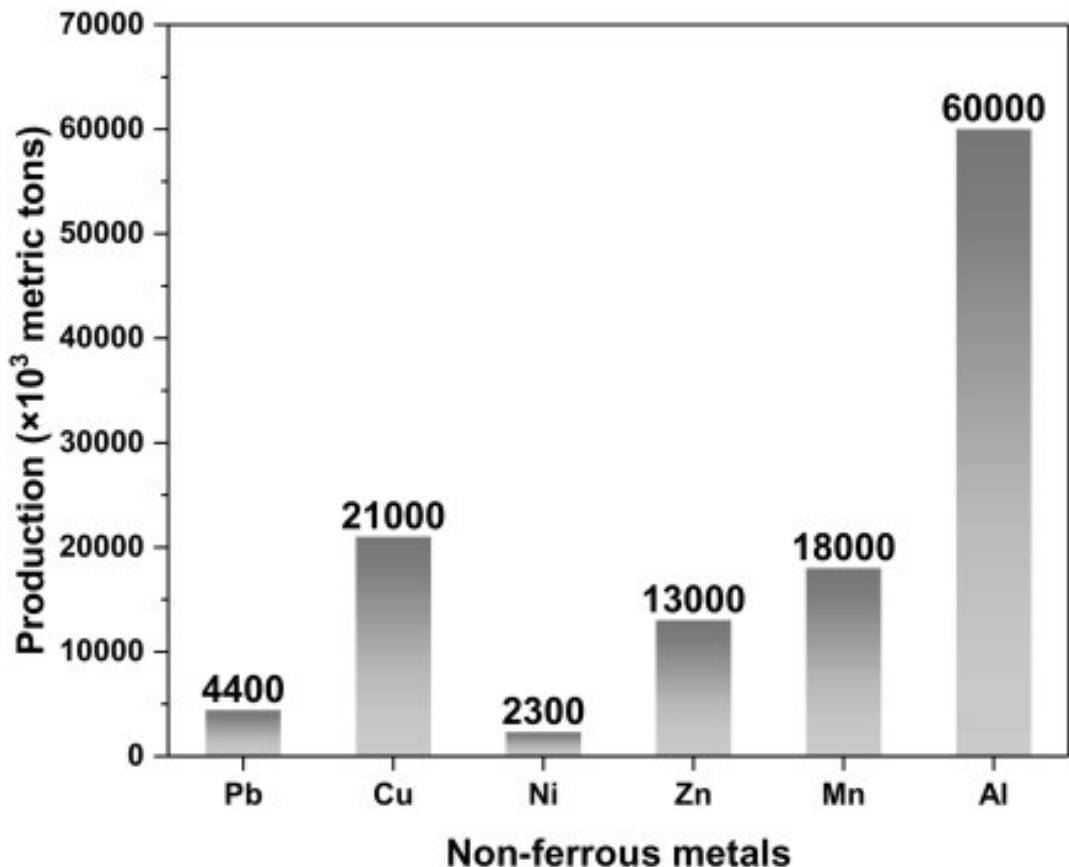


Рисунок 1.1 - Мировое производство цветных металлов в 2018 году (в тыс. тоннах) (non-ferrous metals - цветные металлы, production - производство, metric tons - тонны) [7].

Титан — металл, использующийся в производстве высокопрочных, коррозионностойких и термостойких металлических сплавов для аэрокосмической и оборонной промышленности. Стоимость производства титана до сих пор является препятствием для роста использования этого металла по сравнению с другими основными металлами на рынке, даже несмотря на то, что титан является четвертым по распространенности конструкционным металлом в земной коре с 0,6% [8]. Он идет по порядку после железа, магния и алюминия, но остается экзотикой из-за своей высокой стоимости [9, 10, 11], что не позволяет титану полностью раскрыть свой потенциал в судостроении и автомобильной промышленности. Устаревшая технология производства, высокие потери энергии и потери материала - некоторые из проблем, связанных

с производством титана [12]. Титан обладает уникальными свойствами, некоторые из которых являются исключительными, что позволяет заменить обычные металлы и сплавы, такие как сталь и алюминий, во многих областях применения [13].

Алюминий используется для производства различных сплавов, применяющихся во многих областях, например, строительстве, транспорте. В 2018 г. мировое производство алюминия составило примерно 64 млн. тонн (рисунок 1.1). Ожидается, что мировое производство алюминия достигнет в 2025 году 65 миллионов тонн и 95 миллионов тонн в 2050 году с годовыми темпами роста 2,7% [14]. В Китае резкое увеличение мощностей по выплавке алюминия во многом связано с развитием автомобильной промышленности. Большой спрос в Индии также объясняет значительный рост производства Al.

Медь также является широко используемым промышленным металлом - прогнозирование вероятного спроса и производства вызывает особый интерес из-за ее использования в оборудовании для производства электроэнергии из возобновляемых источников. В 2018 году мировая добыча меди на рудниках составила примерно 21 миллион метрических тонн (рисунок 1.1).

Сплавы вышеперечисленных металлов также обладают важными свойствами. В настоящее время титановые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности и являются одними из основных конструкционных материалов, особенно в машиностроении благодаря их исключительным свойствам: высокая удельная прочность, коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, немагнитность, хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации до 500 – 600°C [15].

У титановых сплавов существуют значительные ограничения в отношении возможностей холодной деформации. Даже пластичность низколегированных сплавов составляет примерно 2-3 раза меньше, чем у нержавеющей стали. Вместе с тем даже незначительный нагрев существенно снижает сопротивление деформированию и повышает пластичность. Кроме того, титановые сплавы

чувствительны к скорости деформирования. Высокие скорости заметно сокращают их деформируемость и снижают качество получаемых полуфабрикатов. Ошибки, допущенные при их горячей деформации, невозможно исправить термической обработкой, т.к. титановые сплавы нельзя закалить и отпустить с кардинальной переработкой структуры и свойств [16, 74].

Сплавы системы Al-Mg, такие как технический алюминий и сплавы Al-Mn, не подвергаются термическому упрочнению. Магний значительно упрочняет алюминий. Увеличение концентрации магния на каждый процент содержания повышает предел прочности сплава примерно на 25 - 30 МПа, а предел текучести примерно на 20 МПа [17]. При содержании магния до 11-12% в сплавах сохраняют свою деформируемость. Однако, при содержании магния до 8% (по массе), сплавы не подвергаются закалке в процессе термической обработки. В то же время, при содержании магния более 6%, антикоррозионные свойства сплавов резко ухудшаются, что делает их непригодными для использования в практике.

В данном исследовании рассматриваются сплавы системы Al-Mg (магналий), которые являются одними из наиболее перспективных свариваемых сплавов. Магналий относится к группе сплавов, которые не упрочняются термическим способом, и их высокие свойства достигаются путем увеличения концентрации магния в твердом пересыщенном растворе. Сплавы, содержащие небольшое количество магния (до 3,5%), обладают макроскопической микроструктурой с крупными зёрнами. Дальнейшее повышение содержания магния до 7% измельчает микрозёрна, структура становится мелкозернистой и однородной. Содержание магния более 7% вызывает склонность к коррозионному разрушению вследствие выделения частиц фазы Al_3Mg_2 по границам зёрен.

Легирующие элементы повышают физико-механические свойства сплава. Магний упрочняет структуру без ущерба пластичности. Марганец значительно уменьшает зернистость и улучшает механические свойства. Титан предупреждает растрескивание швов при сварке. Медь повышает твёрдость и

прочность [18]. Нежелательно добавление меди и железа в сплавы данной системы, поскольку такие примеси снижают их коррозионную стойкость и способность к сварке.

Бронзы, представляющие собой сплавы, содержащие медь в качестве основного компонента, применяется для производства листового проката, труб, сортового проката, используемых для изготовления деталей в различных отраслях машиностроения, предназначенных для изготовления специальных сварных и паяных конструкций, работающих при температурах до 600-650 °С. Данный сплав относится к жаропрочным медным сплавам высокой электро- и теплопроводности. Среди легирующих элементов особая роль отводится хрому благодаря его влиянию на физические и механические свойства сплава. Хром значительно упрочняет медь и повышает ее жаропрочность. После проведения термической или термомеханической обработки хромовые бронзы обладают высоким сочетанием физических, механических и эксплуатационных свойств. Кроме упрочняющей термической обработки бронзы часто подвергают промежуточному отжигу с целью повышения пластичности между операциями холодной деформации. Отжигу подвергают также готовую металлопродукцию перед последующим изготовлением из нее изделий с различными способами пластической деформации (штамповка, ковка, отбортовка и т.д.) [19].

В настоящей работе в качестве исследуемых материалов выбраны типовые представители трех групп цветных металлов, это титановый сплав ОТ4-1, алюминиевые сплавы АМг2, АМг6 и медный сплав БрХ0,8.

Обладая перспективными характеристиками, цветные металлы являются одними из незаменимых материалов и всегда будут главным объектом исследований специалистов, работающих в областях тяжелой промышленности в целом и машиностроения в частности.

Одним из ключевых вопросов является поиск эффективных методов обработки для сокращения трудозатрат и повышения качества изделий. Использование одинарных металлических листов явно приносит простоту в

проектировании и обработке, но на самом деле много преимуществ дают гибридные заготовки. В настоящее время отсутствует единая принятая терминология для определения термина «гибридная заготовка». В литературе их называют заготовки на заказ, специальные заготовки, заготовки по специальному заказу, специальные сварные заготовки, катаные заготовки на заказ, гибридный прокат листового металла, индивидуальные заготовки и т.д. В зарубежной литературе гибридные заготовки из листового материала преимущественно называют Tailor Welded Blanks (TWB) или Tailor Blanks. Они представляют собой металлический лист, изготовленный из однородных либо разнородных материалов, отличающихся по прочности, маркам и толщине, предварительно сваренные или соединенные каким-либо другим методом, пригодный для формообразования готовой детали методом обработки давлением.

По мнению экспертов, самой быстроразвивающейся технологией в металлообработке сейчас является применение гибридных заготовок в автомобилестроении. Данная технология широко применяется во всем мире, но если в европейских странах она используется для изготовления относительно небольших деталей, то американские производители применяют ее для получения более крупных – элементов корпусов, дверей, рам и т.д. из сталей разных толщин и марок (рисунок 1.2). Впервые данная технология в Европе была применена шведской фирмой Volvo в 1979 году.

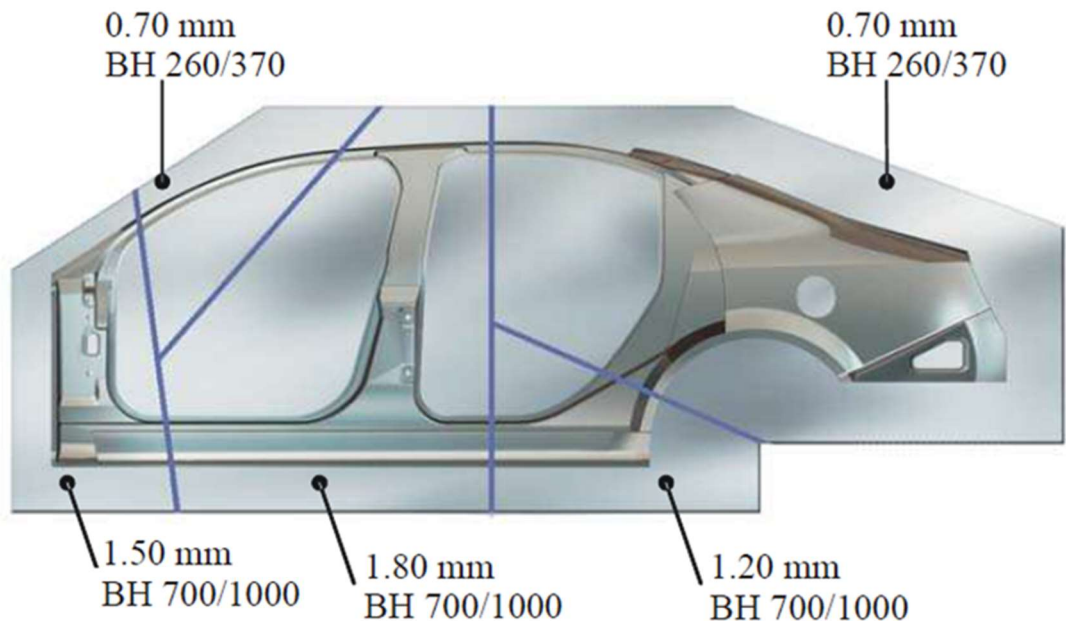


Рисунок 1.2 - Боковая наружная панель, изготовленная из гибридной заготовки (BH 260/370 и BH 700/1000 – стали с эффектом термического упрочнения)

Помимо стальных автомобильных деталей ряд корпусных деталей изготавливают также из алюминиевых сплавов (рисунок 1.3). До штамповки исходная заготовка изготовлена лазерной сваркой листовых заготовок из алюминиевого сплава марки AA6016A различной толщины (2,24 и 1,75 мм).



Рисунок 1.3 - Фрагмент корпуса автомобиля, изготовленного из гибридной заготовки (AA6016A - алюминиевый сплав, CO₂-Lasernaht – сварной лазерный шов)

Такой подход к проектированию исходной заготовки позволяет учесть особенности работы готовой детали под действием эксплуатационных нагрузок. Как следствие такого подхода, открывается возможность получения

облегченных и экономичных деталей методами обработки давлением, что особенно актуально в автомобильной и авиакосмической отраслях промышленности. Например, получение гибридных листовых сваренных встык заготовок обеспечивают большие возможности при проектировании изделия, повышая его конструкционную прочность, улучшая штампуемость и обеспечивая возможность применения заготовок из различных материалов, объединенных в одну деталь [20].

1.2. Основные методы получения гибридных заготовок

Пластическая деформация в производстве обычно используется в процессах формования для придания формы заготовкам деталей и управления их механическими свойствами. Однако пластическую деформацию можно использовать и для соединения деталей с достаточной пластичностью без внешнего подвода тепла [21]. В металлургических процессах соединения, таких как холодная сварка и сварка трением, оксидные пленки и загрязнения на границе раздела между заготовками разрушаются за счет сильной пластической деформации, а полученные чистые поверхности соединяются высоким давлением. Заготовки нагреваются внутри за счет поверхностного скольжения и пластической работы, поэтому деформация ускоряется по мере размягчения заготовок с повышением температуры. Металлургические процессы соединения пластической деформацией также известны как процессы сварки в твердом состоянии [22]. Для достижения металлургической связи требуется большая пластическая деформация.

Существует несколько методов получения гибридных заготовок с помощью сварки: сварка лазерным лучом [23, 24], электронно-лучевая сварка [25], электродная сварка [26, 27] и сварка трением с перемешиванием (Friction-Stir Welding, FSW) [27, 28]. Каждый метод имеет свои преимущества и

недостатки. В работе [29] отмечается, что твердофазное соединение позволяет избежать процессов, связанных с плавлением и затвердеванием, т.к. соединение происходит при температуре ниже точки плавления, что позволяет получать сварные швы с более высокими пластическими характеристиками. Особенно полно данный процесс рассмотрели Xiaosong He и др. в работе [30], где приведены данные по конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием, его износу, анализу возникающих в очаге деформации температур, возникающим напряжениям и моделированию процесса [78].

1.2.1. Поперечно - клиновая прокатка (ПКП)

Исследования последних лет показывают, что гибридные заготовки получают не только из листовых материалов, но также путем торцевой сварки цилиндрических заготовок. Заготовки в комбинации сталь-сталь и сталь-алюминий были успешно подвергнуты операции поперечно-клиновой прокатки.

ПКП — это процесс предварительного формирования, при котором изготавливаются осесимметричные детали с неравномерным распределением массы. При этом движение клиновидных инструментов происходит в противоположных направлениях и материал распределяется вдоль оси инструмента. Процесс ПКП долгое время не применялся промышленности, хотя имеет много преимуществ. Основная причина этого - сложность схемы технологического процесса и изготовления инструмента. Для сокращения времени компоновки процесса в последних исследованиях была разработана программа моделирования, который позволяет автоматически создать геометрию детали. Кроме того, был найден метод уменьшения объема испытаний [31, 32].

Основные параметры материала, работающего в процессе ПКП:

- коэффициент деформации δ , определяемый как:

$$\delta = \frac{d_0}{d} \quad (1.1)$$

где d_0 - диаметр заготовки до прокатки, d - диаметр заготовки после прокатки

- относительное уменьшение R_p поперечного сечения, рассчитанное по следующей формуле:

$$R_p = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

где S_0 - площадь поперечного сечения заготовки до прокатки, S - площадь поперечного сечения заготовки после прокатки.

- уменьшенный диаметр ΔA , определяется по формуле:

$$\Delta A = 1 - \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \quad (1.3)$$

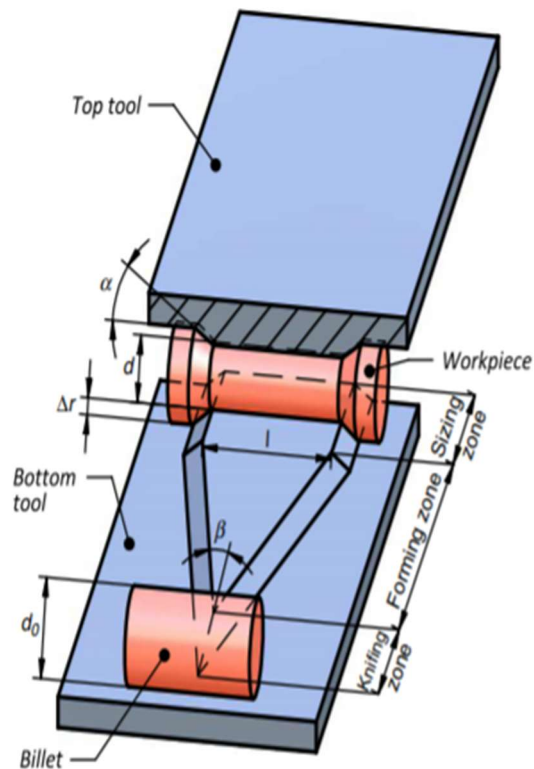


Рисунок 1.4 - Схема процесса поперечно - клиновой прокатки плоским инструментом (knifing zone - зона резки, forming zone - зона формообразования,

sizing zone - зона калибровки, bottom tool - нижний инструмент, top tool - верхний инструмент, billet и workpiece - заготовка до и после прокатки) [33]

Инструмент, используемый в процессе ПКП, включает три зоны: резки, формообразования и калибровки (рисунок 1.4). В зоне резки клин постепенно погружается в материал на глубину Δr , уменьшая таким образом диаметр до предполагаемого значения d . В зоне формообразования за счет воздействия боковых стенок клина происходит спиральное обжатие по всей длине l прокатываемого уступа. В зоне калибровки заготовка подвергается вращательному обжатию, в ходе которого удаляются все неровности формы, образовавшиеся на предыдущих этапах процесса.

Во многих работ (Pater et al., Blohm et al.) получило соединение гибридных заготовок методом ПКП. Пары заготовок предварительно были соединены методом сварки трением. Затем заготовки были нагреты в электропечи, перенесены в модуль ПКП вручную и вставлены так, чтобы центр зоны соединения заготовок совпадал с вершиной клина. Из-за деформации ПКП и действия силы трения произошло соединение двух заготовок. Геометрия гибридных заготовок после ПКП измеряется и сравнивается с результатами моделирования. Для исследования ПКП (моделирования и испытания) заготовки располагались так, чтобы зона соединения располагалась по центру перед клином (рисунок 1.5). Положение зоны стыковки после ПКП является основным параметром оценки.



Рисунок 1.5 - Моделирование (вверху) и экспериментальные испытания (внизу) гибридных деталей из стали и алюминия до (слева) и после ПКП (справа) [34]

По сравнению с другими методами производства (например, механической обработкой, штамповкой и литьем) поперечно - клиновая прокатка обладает рядом преимуществ, в частности [35 - 37]:

1) Высокой эффективностью. За один рабочий цикл (например, вращение валков или смещение плоских клиньев) производится как минимум одно изделие. Процесс ПКП примерно в 5 - 20 раз эффективнее штамповки или механической обработки.

2) Лучшим использованием металла. Потери металла, возникающие в процессе ПКП, обычно не превышают 10%.

3) Повышением прочностных свойств.

4) Лучшей экологичностью. По сравнению с штамповкой процесс ПКП характеризуется значительным снижением уровня шума.

5) Низким потреблением энергии.

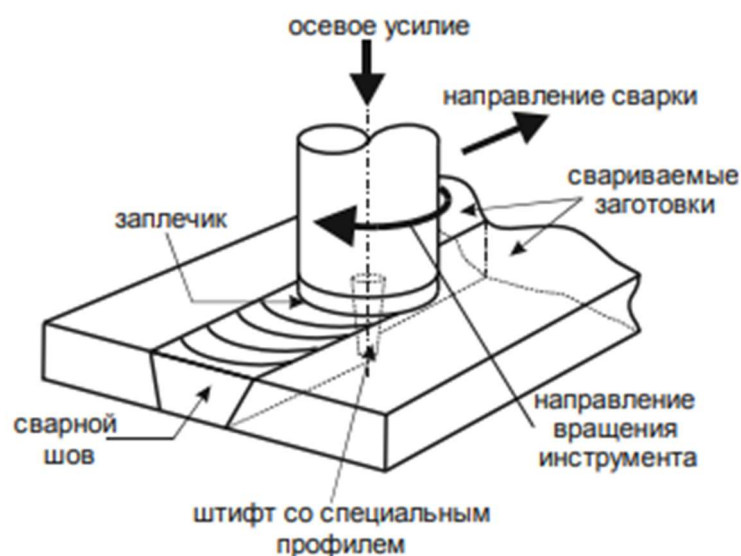
6) Возможностью автоматизации процесса и снижение производственных затрат.

1.2.2. Сварка трением с перемешиванием (СТП)

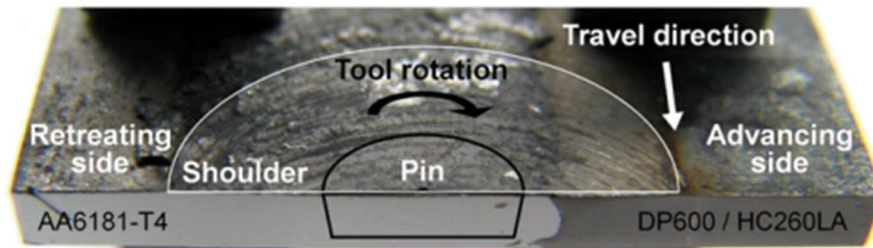
В начале 90-х Институт Сварки (TWI) представил инновационный процесс сварки в твердом состоянии, который был запатентован как сварка трением с перемешиванием. В такой технике соединения специальный конструкционный вращающийся штифт вставляется в прилегающие края свариваемых листов и затем перемещается вдоль шва. Работа сил трения и пластическая деформация, переходящая в тепло, определяют размягчение материала и соединение листов посредством сложного и своеобразного потока материала, определяемого

движением инструмента. При сварке так называемых «несвариваемых или трудносвариваемых» материалов проявляет несколько преимуществ по сравнению с традиционными сварочными процессами, поскольку отсутствует плавление. Получаются очень эффективные соединения как с металлургической, так и с механической точек зрения [38-42].

В этом процессе пластическая деформация, приводящая к соединению деталей, осуществляется специально разработанным вращающимся инструментом с торцевым штифтом, который вставляется с наклоном в прилегающие кромки свариваемых листов до внедрения инструмента на требуемую глубину, а затем перемещают вдоль шва (рисунок 1.6). Работа трения вращающегося инструмента вызывает локальное повышение температуры материала, что, в свою очередь, приводит к его размягчению. По мере подачи инструмента большая пластическая деформация, вызванная перемешиванием материалов, приводит к сварке. Сочетание скорости вращения и скорости подачи инструмента приводит к асимметричному потоку металла. В соединительной части наблюдаются сторона набегания и сторона отставания: первая характеризуется «положительной» комбинацией скорости подачи инструмента и скорости вращения; напротив, а во второй два вектора скорости направлены в противоположные стороны [43-45].



(a)



(б)

Рисунок 1.6 - Схематическое изображение процесса СТП (а) и сварная заготовка СТП алюминиевых сплавов AA6181-T4 и DP600 (б)

(pin - штифт, tool rotation - направление вращения инструмента, travel direction - направление сварки, shoulder - заплечик, retreating side - сторона отставания, advancing side - сторона набегания)

1.2.3. Осадка с кручением

Одной из современных прогрессивных несистематизированных для большого спектра материалов и малоизученных технологий пластического формоизменения, позволяющей изготавливать тонкостенные осесимметричные поковки, является технология штамповки (осадки) с кручением [78].

Штамповка методом осадки с кручением может быть реализована на специализированном оборудовании, в котором инструмент совершает поступательное и вращательное движение. Такие процессы имеют название "процессы с вращающимся инструментом". В практике обработки металлов давлением установки с вращающимся инструментом известны, к ним могут быть отнесены прессы для торцовой раскатки вращением и качением, а также прессы для термофрикционной штамповки. В процессе торцовой раскатки вращением вращаются как верхний, так и нижний инструмент вместе с заготовкой, при этом величина и направление скоростей вращения одинаковы.

Осадки с кручением может быть реализована на оборудовании, схема которого показана на рисунок 1.7. Данное оборудование состоит из винтовой несамотормозящей пары, в которой гайка 3 жестко закреплена на подвижной поперечине 1 пресса, а к винту 4 закреплен формирующий инструмент 5. При воздействии на винт осевым усилием деформирования в винтовой паре возникает реактивный крутящий момент, под действием которого винт вращается. Для создания необходимого усилия в винтовой паре встроено тормозное устройство в виде стопорного винта 6 [46].

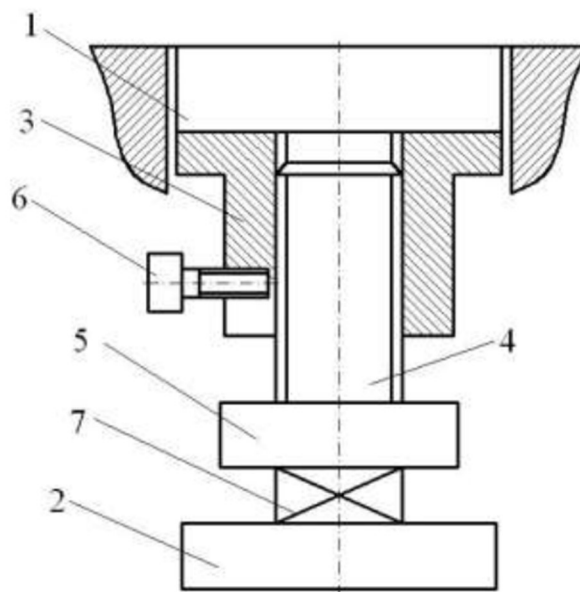


Рисунок 1.7 - Схема гидравлического пресса с вращающимся инструментом.

При кручении под давлением, истинная деформация равна [47]:

$$e = \frac{1}{H_0} \int \sqrt{V^2 + \frac{R_0^2 \dot{\omega}^2}{3}} dt \quad (1.4)$$

где V - скорость осадки, r - радиус диска, $\dot{\omega}$ - угловая скорость, R_0 - исходный радиус образца, H_0 - толщина дисков.

В свою очередь интегрирование выражения (1.4) приводит к формуле:

$$e = \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3}} - \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3(1+e_a)}} + \ln(1+e_a) + \ln \frac{1 + \frac{\theta^2}{6(1+e_a)} + \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3(1+e_a)}}}{1 + \frac{\theta^2}{6} + \sqrt{1 + \frac{\theta^2}{3}}} \quad (1.5)$$

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

Эффективными методами накопления деформации являются кручение под давлением или стесненное кручение, поскольку всего за 0,5÷1 оборот даже в близкой к центру диска области достигается значительная деформация ($e = 17 \div 18$) [48].

Процесс осадки с кручением осуществляется путем осаждения между двумя плоскими инструментами, которые вращаются относительно друг друга. Ось вращения верхнего инструмента совпадает с осью осаживаемой заготовки. За счет трения на контактной поверхности возникает крутящий момент, который передается в деформируемую заготовку, вызывая ее скручивание. В зависимости от шероховатости поверхностей заготовки и инструмента скручивание может сопровождаться проскальзыванием. Это приводит к сложной схеме напряженно-деформированного состояния в заготовке, которая обеспечивает практически 100% контакт свариваемых заготовок, как показывают металлографические исследования [78].

В отечественных литературных источниках были исследованы различные аспекты осадки с кручением, такие как определение силовых и кинематических параметров, изучение теплообмена, исследование процесса осадки с кручением тонкого слоя и другие. Однако, эти исследования в основном относятся к однородным заготовкам. Процесс штамповки с кручением, в сравнении с традиционным процессом, штамповки характеризуется:

- 1) возможностью получения тонких заготовок деталей методом объемной штамповки;
- 2) интенсификацией процесса пластической деформации и формированием мелкозернистой структуры;
- 3) возможностью на одной единице оборудования изготавливать партии однотипных изделий малыми сериями с получением экономического эффекта;
- 4) возможностью получения заготовок с регламентированными свойствами в радиальном направлении за счет применения исходных заготовок необходимой конической формы.

В теоретическом плане на технологическую эффективность процесса осесимметричной осадки с кручением было указано в работе [49] и, далее, развито в работах [50,51]. Процесс интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением был рассмотрен рядом отечественных ученых [52]. Предложенный ими способ деформации заготовок с кручением в сочетании с ее ступенчатым нагревом обеспечивает однородное и значительное измельчение микроструктуры металлов и повышение их микротвердости и прочности.

Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что многие технологически важные параметры процесса осадки с кручением недостаточно изучены. Конкретно отсутствуют данные о взаимодействии между заготовкой и инструментом, о характере потока материала на контактной поверхности, о топологии микронеровностей на контактной поверхности и их изменении в процессе скольжения деформируемого материала по контактной поверхности, а также о условиях теплообмена на границе заготовка-инструмент. Кроме того, отсутствует обоснование использования технологической смазки.

Известные исследования процесса осесимметричной осадки с кручением проводились для заготовок из одного компактного материала, полученного литьем, обработкой давлением, спеканием либо резанием. Возможность

применения рассматриваемого процесса к обработке гибридных заготовок не рассматривалась. Как в отечественной, так и зарубежной литературе не удалось найти каких-либо результатов, опровергающих данное утверждение. Как было отмечено выше, расширение технологических процессов, обеспечивающих возможность обработки гибридных объемных заготовок, является актуальной задачей современных машиностроительных производств. Исследования в данном направлении могут быть проведены с применением компьютерного имитационного моделирования процессов обработки давлением, а также на основе проведения комплексных экспериментальных исследований.

1.3. Принцип образования соединения гибридных заготовок при осадке с кручением

Оптический микроскопический анализ сварных швов [53] привел к гипотезе о том, что основной механизм соединения возникает из-за разрушения поверхностных слоев, приводящего к обнажению чистых металлических поверхностей, которые свариваются при последующем контакте. Более поздние исследования трещин холодных сварных швов на сканирующем электронном микроскопе подтвердили эту гипотезу [54], показав, что подготовка поверхности перед холодной сваркой имеет первостепенное значение. При подготовке поверхности щеткой с царапинами образуется твердый поверхностный слой, который растрескивается при расширении. При большем расширении поверхности обнажается первичный материал, который выдавливается через трещины поверхностного слоя и встречается с аналогичным обнаженным участком поверхности противоположного металла. Механизм соединения при холодной сварке показан на рисунок 1.8 [55].

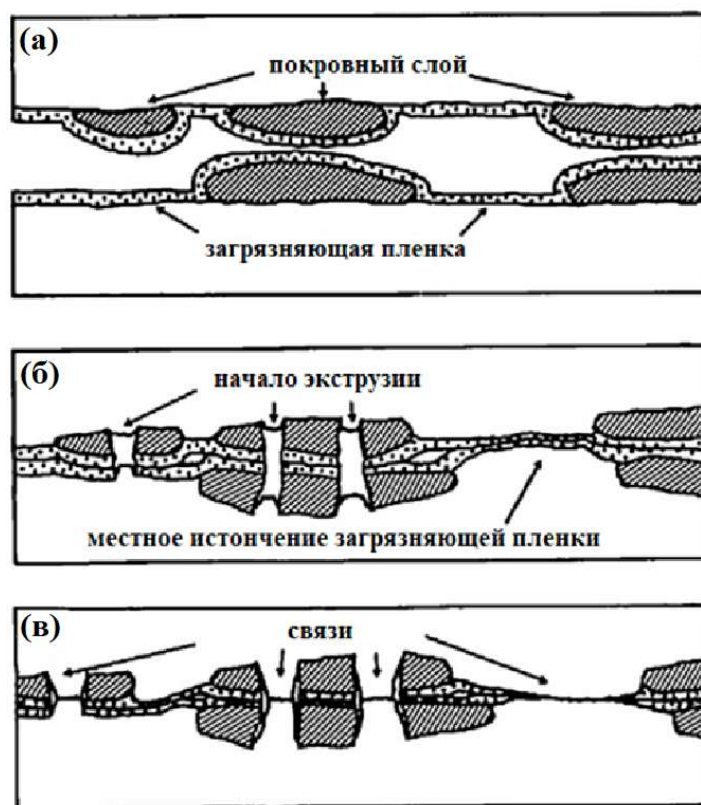


Рисунок 1.8 - Модель соединяющего механизма при холодной сварке [55]

(а) поверхность, обработанная щеткой, (б) экструзия первичного материала и
(в) связи

Проведенные исследования [55] показали, что очистка щеткой создает, частично состоящую из относительно толстого, твердого и хрупкого покровного слоя (приблизительно 20 мкм), частично поверхность, покрытую только загрязняющей пленкой оксидов. Соединение на этих участках происходит, когда пленка загрязняющих веществ размером порядка 10–100 нм истончается до разрушения.

Хотя очистка щеткой является наиболее часто используемым методом подготовки поверхности, она имеет недостатки: достигнутая прочность соединения имеет большой разброс, вызванный неравномерной шероховатостью обработанной поверхности; холодную сварку следует проводить после очистки щеткой не позднее, чем через 10 мин [56].

1.4. Особенности формообразования гибридных заготовок

Как указывается рядом авторов [57] вдоль сварного шва наблюдается литая структура, приводящая к неоднородным прочностным характеристикам и, как следствие, к снижению пластичности при последующей обработке давлением. В целом, в результате нагрева металла при сварке происходит рост зерен, что приводит к снижению пластических характеристик. Кроме того, при формообразовании гибридных заготовок, изготовленных из листов различной толщины, в зоне сварного шва наблюдается потеря устойчивости процесса пластического течения. Это явление вызвано различными прочностными характеристиками металла, меньшей устойчивостью к сжатию более тонкого материала, что приводит к образованию гофр.

Гибридные заготовки имеют различную толщину, различные свойства составных частей и линия соединения может быть, как прямой, так криволинейной, она может, как совпадать с направлением деформирующей силы, так и находиться под углом по отношению к ней. Все это требует особого внимания при проектировании формообразующего инструмента. Вопросы влияния размещения сварного шва на прочностные характеристики гибридных заготовок были рассмотрены многими исследователями. Так, например Fengxiang Xu и др. [57] изучили влияние положения лазерного сварного шва гибридных образцов из высокопрочной стали трех типов А – сталь DP600/1.0 мм, В – сталь DP600/1.5 мм, С – сталь DP800/1.0 мм. Лазерные швы были ориентированы в трех различных направлениях (рисунок 1.9). Результаты испытания образцов методом растяжения и изгиба (рисунок 1.10) показали роль ориентации сварного шва наряду с влиянием толщин применяемых материалов на прочностные параметры. Наиболее рациональным с точки зрения прочностных характеристик гибридных заготовок из листовых материалов является размещение сварного шва под углом 45° относительно направления деформации.

Известно, что деформируемость гибридных заготовок после процесса их сварки снижается. Одним из известных методов ее оценки является метод Эриксона, который позволяет объективно оценить штампуемость деформируемого материала (рисунок 1.11).

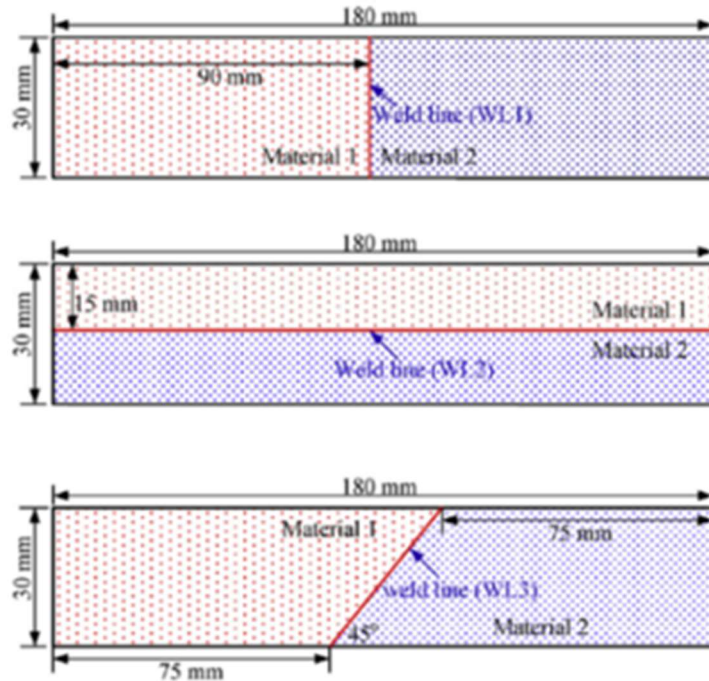


Рисунок 1.9 - Схема соединения материалов гибридной заготовки (Material 1, Material 2 – Материал 1 и Материал 2, Weld line – сварной шов)

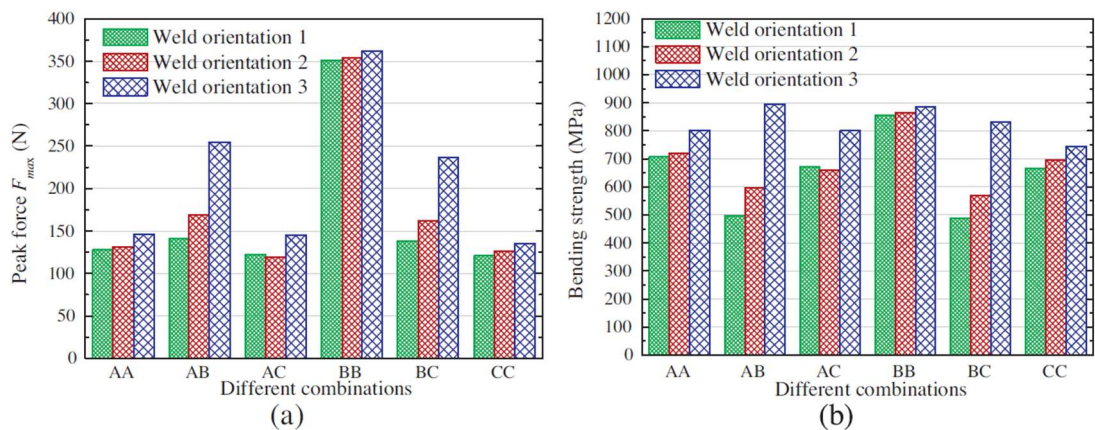


Рисунок 1.10 - Зависимость максимальной силы при растяжении (a) и предела прочности при изгибе (b) гибридных заготовок с различной ориентацией сварного шва (Weld orientation – расположение сварного шва, Different combination – варианты соединения образцов)

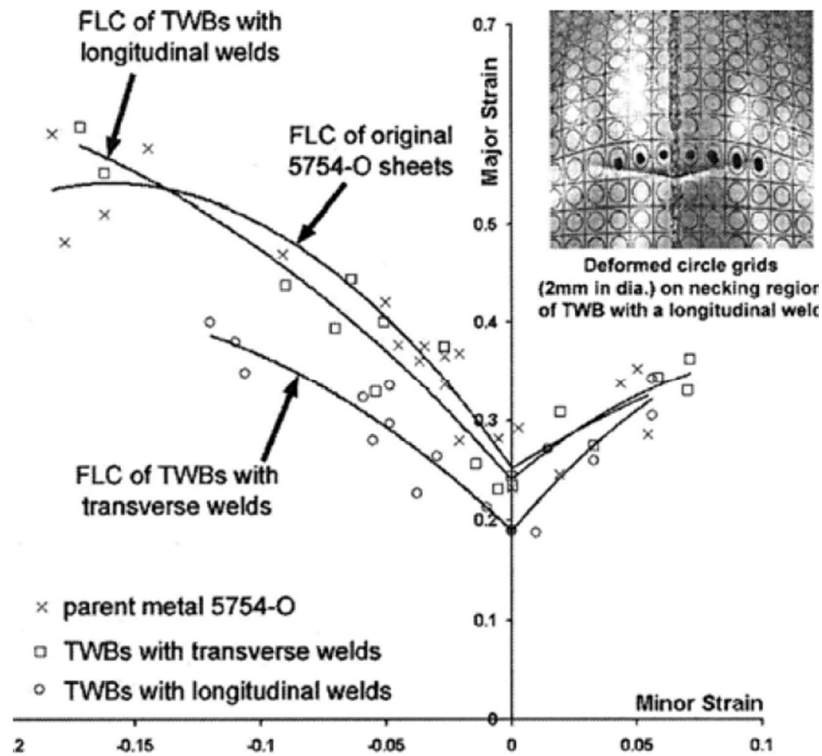


Рисунок 1.11 - Диаграмма предельного формоизменения ряда гибридных заготовок (5754-0 sheets – исходный материал – алюминиевый лист, FLC - показатель деформируемости, longitudinal weld – продольный сварной шов, transverse weld – поперечный сварной шов, major/minor strain – максимальная/минимальная деформация)

Для предотвращения дефектов в зоне сварки требуется применение специальных штампов, учитывающих особенности конструкции гибридных заготовок (рисунок 1.12).

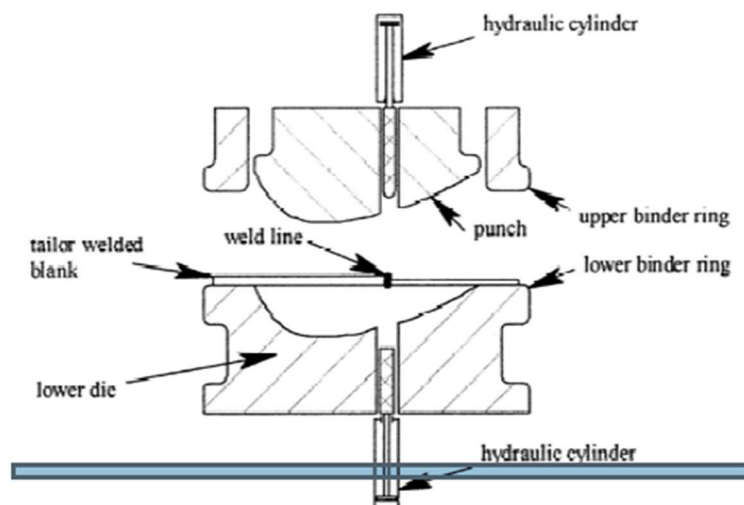


Рисунок 1.12 - Схема комбинированного штампа для деформации гибридных заготовок. Гидравлические цилиндры обеспечивают минимальное

смещение сварного шва (hydraulic cylinder – гидравлический цилиндр, punch – пуансон, upper (lower) binding ring – верхний (нижний) прижим, weld line – сварной шов, tailor welded blank – гибридная заготовка, lower die – матрица)

Гибридные заготовки после сварки исходных заготовок различных толщин и марок имеют, как правило, плоскую форму и впоследствии используются для формообразования трехмерных деталей. Целью создания гибридных заготовок является создание заготовки с различными прочностными характеристиками, отвечающими напряженно – деформированному состоянию детали при ее эксплуатации.

Деформируемость гибридных заготовок зависит от многих факторов, в том числе от изменения механических характеристик металла в зоне термического влияния при сварке, влияния сварного шва на распределение напряжений, возможности образования микротрещин, неоднородности деформаций вследствие различий по толщине, качества поверхности заготовки и т.д. Выполненные на эту тему исследования преимущественно были посвящены глубокой вытяжке заготовок, изготовленных из материала одной марки, но разной толщины. Как указывается в упомянутых источниках в открытой печати мало данных по деформируемости гибридных заготовок, изготовленных из материалов с различными свойствами. Shao *et al* [58] выполнили исследование по деформируемости гибридных заготовок из различных материалов методом Эриксона (вытяжка полусферы диаметром 25,4 мм). Однако следует отметить, что полученные результаты лишь в ограниченной степени могут быть использованы для анализа процессов формообразования заготовок из гибридных заготовок вытяжкой.

Большой интерес представляет исследование, выполненное [59] по деформации гибридных заготовок из сталей DP980, DP800, DP450 и HSLA. Авторы провели сравнительный анализ деформируемости гибридных заготовок, сваренных из двух различных материалов, относительно монолитной заготовки. Ими было установлено, что деформируемость гибридной заготовки ниже, чем

при пластической деформации каждого отдельного материала. Если отпуск наблюдался в зоне термического влияния более прочного металла, такого как DP980 или DP800, то деформация и разрушение локализовались в термически отпущенной зоне гибридной заготовки из одного материала. Однако, если эти стали сварены с низколегированной сталью, то деформация и разрушение локализуются на стороне на стороне малолегированной стали гибридной заготовки. Смещение же сварного шва и локализация разрушения в процессе вытяжки гибридной заготовки зависит от величины безразмерного показателя напряженного состояния.

На основе вышеизложенного, авторами предлагается способ изготовления гибридных заготовок методом интенсивной деформации, основанный на соединении разнородных материалов осадкой вращающимся инструментом. Данный процесс является комплексным и позволяет реализовывать как сварку перемешиванием, так и диффузионную сварку. Учитывая, что полученные заготовки обладают высокими механическими характеристиками и низкой пластичностью, их испытание осуществляли на одноосное растяжение и изгиб по методике, предложенными Chung et al. [60].

Большинство авторов сходятся во мнении, что наиболее эффективным методом подготовки поверхности является обезжиривание с последующей зачисткой стальной щеткой с применением бормашины. Большое значение имеет величина действующего давления p , величина которого, составляющая $(1,85 - 5,10) \times \sigma_0$, способствовала смятию микронеровностей. Соответственно, значение σ_B/σ_0 (σ_B – предел прочности соединения, σ_0 – напряжение текучести металла после его деформации) для алюминия изменяется от 0,4 до 0,9.

Особенностью процесса штамповки с кручением является то, что он относится к процессам с использованием для получения качественного изделия активных сил трения. Значительное влияние на параметры технологического процесса штамповки с кручением оказывает влияние качества поверхности деформирующего инструмента. Чем меньше шероховатость контактной поверхности, тем, при прочих равных условиях, выше вероятность

проскальзывания инструмента [61]. При этом сила деформирования может быть снижена всего лишь 2,5-3 раза; скручивание заготовки продолжается вне зависимости от интенсивности проскальзывания [20].

Выводы по главе 1

1. Показано, что сплавы цветных металлов занимают важное место в промышленности, особенно в технологии машиностроения. Проведен аналитический обзор литературы, в котором рассматриваются сплавы таких типичных цветных металлов, как алюминий, медь и титан, которые играют важную роль во многих ведущих отраслях промышленности.

2. Определено, что отсутствуют данные по получению гибридных заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 при осадке с кручением. Также отсутствуют необходимые данные для компьютерного имитационного моделирования процессов.

3. Найдено, что развитие технологий металлургии и изготовления деталей сопровождается поиском новых методов обработки, соответствующих потребностям промышленного развития. Соединение заготовок деформацией кручением под давлением является перспективным направлением расширения применения соединения заготовок трением и формулированием требований качеству поверхностей соединяемых материалов.

4. Показано, что применение гибридных заготовок позволяет снизить весовые характеристики изделий автомобильной и авиационной техники. Использование современного лазерного оборудования позволяет получать гибридные заготовки со сложной линией разреза, что существенно расширяет возможности данной технологии. Дополнительные возможности данного метода возникают в связи с разработкой специальной штамповочной оснастки, обеспечивающей дифференцированное давление в различных точках заготовки.

Большой вклад в развитие данного метода вносят так же современные программы, позволяющие предварительно осуществлять моделирование процесса формообразования деталей.

Таким образом, в связи с отсутствием накопленного опыта и экспериментальных данных по изготовлению гибридных заготовок работа, направленная на отработку и исследование методов получения гибридных деталей из сплавов с различными механическими и физическими свойствами, является актуальной.

Цель работы: Определение научно-обоснованных деформационных режимов формообразования осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом осадки с кручением.

Основные задачи работы:

1. Определить функциональные зависимости между сопротивлением деформации титанового сплава ОТ4-1 и термомеханическими параметрами (температура, скорость деформации и величина деформации) (уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю коэффициентами), в том числе, соответствующими интервалу горячей объемной штамповки.

2. Установить на основе натуральных экспериментов зависимость, определяющую влияние скорости скольжения деформируемого металла на контактное трение в процессе осадки с кручением заготовок из медного сплава БрХ0,8 и позволяющую повысить точность моделирования процесса получения гибридных заготовок методом осадки с кручением.

3. Оценить влияние температурно-скоростных режимов деформации на структуру материала и качество соединения в процессе формообразования гибридных заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8 методом осадки с кручением и качество соединения измерением микротвердости и изучением микроструктур с целью предотвращения разрушения на границе контакта соединяемых заготовок.

4. Разработать методику проектирования технологического процесса с применением компьютерного имитационного моделирования для изготовления методом осадки с кручением осесимметричных гибридных заготовок из однородных и разнородных материалов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов

Титановый сплав ОТ4-1

Химический состав титана ОТ4-1 приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Химический состав титанового сплава ОТ4-1

Сплав	Содержание легирующих элементов, %							
	Ti	Al	Mn	Zr	Si	Fe	C	Прочие примеси
ОТ4-1	основа	2,0	1,5	0,3	0,12	0,3	0,1	0,3

ОТ4-1 - металлический сплав, основу которого составляет титан (Ti), его содержание в ОТ4-1 может колебаться в диапазоне от 94.33% до 97%. Допустимое количество примесей определено в таблице химического состава. Ряд физических и механических свойств сплава ОТ4-1 показан в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Основные физико - химические свойства титана ОТ4-1 при температуре 20°C [62]

№	Характеристика	Значение
1	Плотность, кг/м ³	4550
2	Температура плавления, $T_{пл}$, °C	1665
3	Теплопроводность, λ , Вт/мК	9,63
4	Коэффициент термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	8,35
5	Теплоемкость, c , Дж/кгК	520
6	Модуль упругости, E , ГПа	103

7	Температура отжига, °С	620 - 700
8	Предел прочности, σ_B , МПа	660
9	Твердость по Бринеллю НВ 10^{-1} , МПа	197-255
10	Относительное удлинение δ , %	20

Алюминиевые сплавы АМг2 и АМг6

Химический состав сплавов представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Химический состав исследуемых материалов, вес. %

Сплав	Содержание легирующих элементов, %							
	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti
АМг2	96,14	2,2	0,4	0,4	0,53	0,1	0,2	0,03
АМг6	93,27	5,84	0,13	0,26	0,57	0,04	-	0,03

Основные физические и механические свойств сплава АМг2 и АМг6 (по ГОСТу 4784-2019) проведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Основные физико - механические свойства сплавов АМг2 и АМг6 при температуре 20°С [63]

№	Характеристика	АМг2	АМг6
1	Плотность ρ , кг/м ³	2680	2650
2	Температура плавления $T_{пл}$, °С	650	650
3	Коэффициент термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	24,2	24,7
4	Теплопроводность λ , Вт/(м.К)	159	122
5	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·град)	963	922

6	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	180 - 190	285 - 315
7	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	80 - 100	120 - 155
8	Относительное удлинение δ , %	12	15
9	Модуль нормальной упругости E, ГПа	71	71
10	Модуль сдвига G, ГПа	27	27
11	Твердость по Бринеллю HB 10^{-1} , МПа	45	65

Медный сплав БрХ0,8

Химический состав данного сплава представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Химический состав медного сплава БрХ0,8, вес. %

Сплав	Содержание легирующих элементов, %							
	Cu	Cr	Fe	Pb	Zn	Mg	Si	Прочие примеси
БрХ0,8	основа	0,44	0,031	-	0,006	0,001	-	0,2

В таблице 2.6 представлены основные физико - механические свойства медного сплава БрХ0,8.

Таблица 2.6 - Основные физико - механические свойства сплава БрХ0,8 при температуре 20°C [64].

№	Характеристика	Значение
1	Плотность, кг/м ³	8920
2	Температура плавления, $T_{пл}$, °C	1073
3	Теплопроводность, λ , Вт/мК	222
4	Коэффициент термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	16,2

6	Модуль упругости, E , ГПа	132
7	Температура отжига, °С	650
8	Предел прочности, σ_B , МПа	441
9	Твердость по Бринеллю $HV 10^{-1}$, МПа	115
10	Относительное удлинение δ , %	34

2.2. Методы исследования образцов

Для глубокого изучения и прогнозирования протекания процесса деформирования материалов, а также оценки технических характеристик гибридных образцов, необходимо выбрать эффективные методы исследования.

2.2.1. Исследование микроструктуры

Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе “Olympus Delta” (рисунок 2.1) с увеличениями 100, 500, 1000 и электронном микроскопе “FEI QUANTA 650” с увеличениями 2500 и 5000 [48].

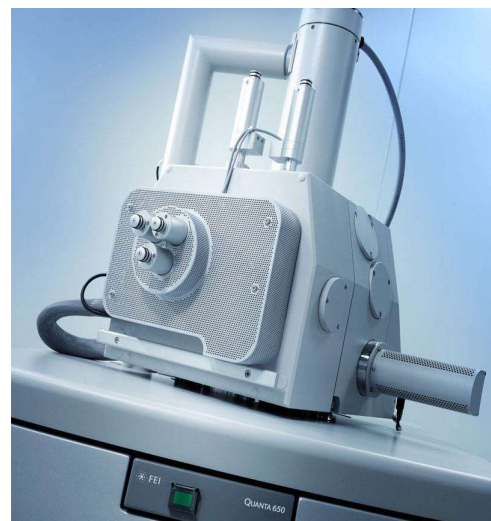


Рисунок 2.1 - Микроскоп “Olympus Delta” (слева) и “FEI QUANTA 650” (справа)

2.2.2. Испытание на осадку с кручением

Осадку с вращением одного из инструментов осуществляли на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 (рисунок 2.2). В данном оборудовании верхний инструмент выполняет 2 движения: поступательное и вращательное [46]. Технические данные пресса показаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Техническая характеристика гидравлического пресса модели ДБ-2432 [48]

№	Параметр	Значение
1	Номинальная сила пресса, кН	1600
2	Ход ползуна, мм	560
3	Наибольшее расстояние между столом и ползуном, мм	900
4	Размеры стола, мм	710×630
5	Ход выталкивателя, мм	250
6	Скорость рабочего хода ползуна, мм/с	5,0-7,0
7	Скорость холостого хода ползуна, мм/с (вверх / вниз)	230/350
8	Скорость возвратного хода выталкивателя, мм/с	150
9	Время выдержки под давлением, с	10-999
10	Температура нагрева штампа, С	100-250
11	Емкость бака наполнения, л	270
12	Емкость гидроагрегата, л	160
13	Питающая сеть	3-х фазная 50Гц/380В
14	Мощность, кВт	7,5
15	Габариты, мм	2270x1200x3820

16	Масса, кг	5100
----	-----------	------



Рисунок 2.2 - Внешний вид испытательной машины ДБ-2432

С целью обеспечения температуры образцов и инструментов при проведении испытаний были применены электрические печи мод. СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 (рисунок 2.3) и СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ (рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 - Электрическая печь мод. СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1



Рисунок 2.4 - Электрическая печь СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ

Все вышеперечисленное оборудование было расположено близко друг к другу для удобства при проведении экспериментов (рисунок 2.5). Для обработки результатов испытаний к испытательной машине через процессор подключается компьютер с специализированной программой. Параметры эксперимента (сила, ход инструмента, температура, угол поворота) записывались с помощью датчиков.

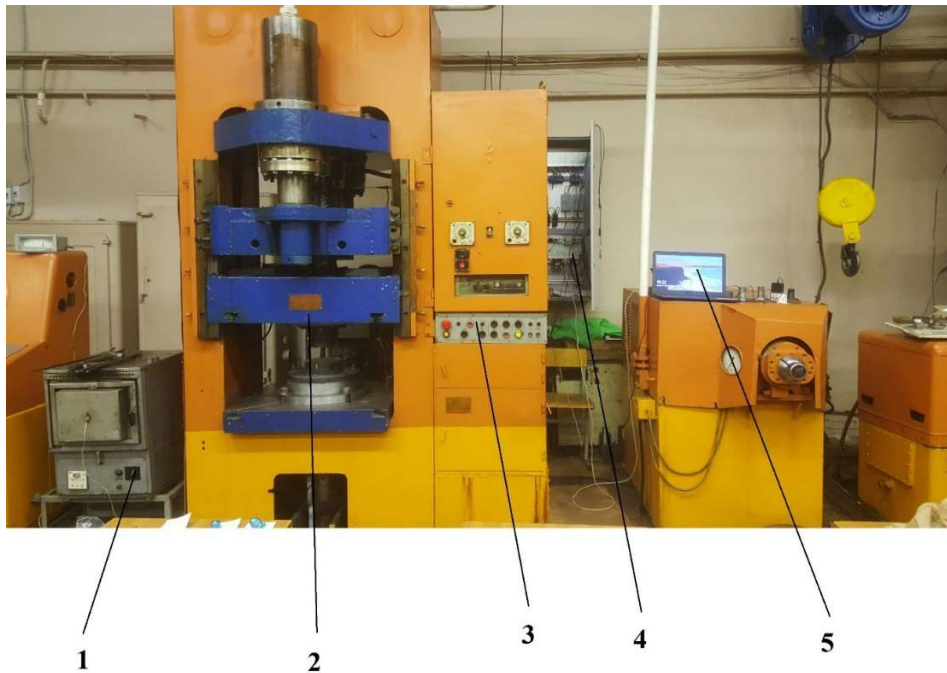


Рисунок 2.5 - Испытательное оборудование: 1 - электрическая печь, 2 - пресс, 3 - пульт управления, 4 - процессор, 5 - ноутбук - компьютер (ЭВМ)

Титановые образцы для исследования ОТ4-1 диаметром и высотой 18 мм были изготовлены электроэрозионной установкой мод. «ОНА АF-25», Испания. Осадка пакета из 2 образцов с кручением проведена на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН до высоты 2,0 - 2,1 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин. Контактные поверхности образцов перед деформацией зачищались и протирались спиртом [65]. Пакет из двух предварительных осаженных заготовок нагревали в печи до 650°C с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп (рисунок 2.6) (см. приложение А).



Рисунок 2.6 - Схема осадки образцов из титанового сплава ОТ4-1

Осадку с кручением алюминиевых заготовок выполняли деформированием пакета из двух заготовок одной марки алюминиевого сплава АМг2 и АМг6 диаметром и высотой 40 и 10 мм соответственно (рисунок 2.7). Заготовки для последующей деформации изготавливали электроэрозионной резкой из алюминиевых прутков. Контактные поверхности заготовок перед осадкой зачищались и протирались спиртом. Осадку с кручением реализовывали на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН до высоты 2,1 ... 2,4 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин. Заготовки осаживались с кручением холодным инструментом при температуре примерно 20°C [66] (см. приложение Б).

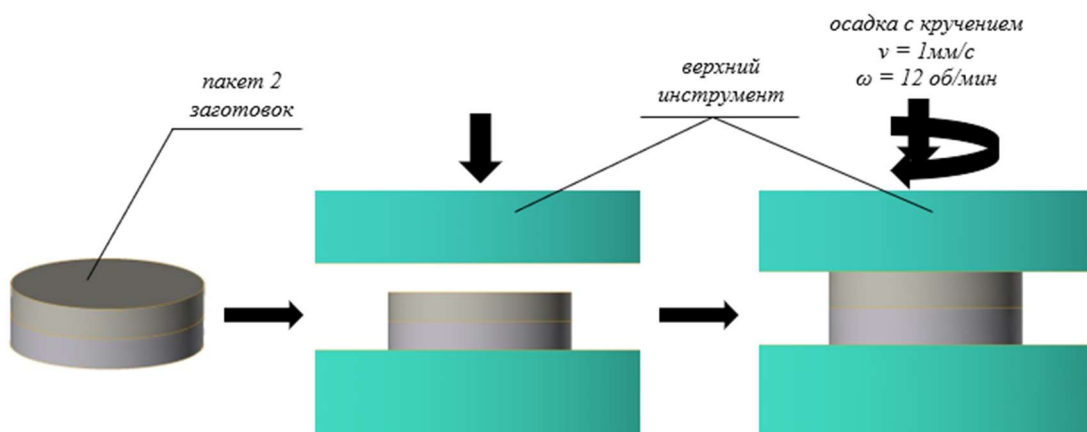


Рисунок 2.7 - Схема осадки образцов из алюминиевых сплавов АМг2 и АМг6

Исходные медные образцы БрХ0,8 (заготовка А и Б на рисунке 2.8) были получены электроэрозионной резкой и имели диаметр 30 мм и высоту 10 мм. Перед осадкой их поверхность тщательно протиралась наждачной бумагой. После подготовки поверхности образцы (заготовка А и Б) собирались в одну (гибридную) заготовку и устанавливались на плоский инструмент, смонтированный на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН и осаживалась до высоты 3,2 мм. Испытание образцов проведено при комнатной температуре (20°C) (см. приложение В) [78].

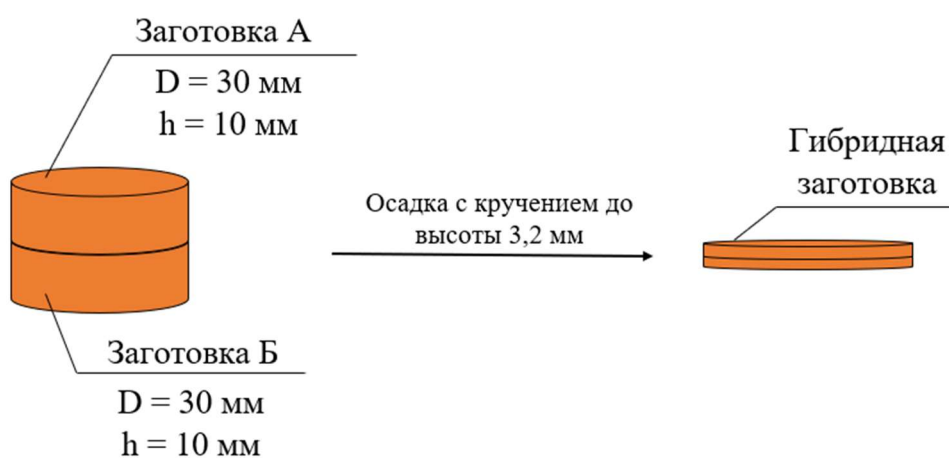


Рисунок 2.8 - Схема осадки образцов из медного сплава БрХ0,8

Для изготовления гибридной заготовки был выполнен процесс осадки с кручением таким образом: исходные заготовки цилиндрической формы были изготовлены из титанового сплава марки ОТ4-1 (диаметром 28 мм и высотой 25 мм) и медного сплава марки БрХ0,8 (диаметром 30 мм и высотой 9,5 мм) методом электроэрозионной резки. Гибридная заготовка состоит из двух исходных заготовок в пакет, который подвергается осадке с кручением при температуре 600°C. Осадка осуществлялась на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН. Процесс осадки был выполнен в следующей последовательности:

- 1) сборка гибридной заготовки из двух заготовок (А - БрХ0,8 и Б - ОТ4-1);

2) осадка гибридной заготовки по схеме «осадка с кручением» до высоты 8,5 мм на специализированном прессе (рисунок 2.9) при скорости перемещения пуансона 1 мм/с и скорости вращения 12 об/мин (см. приложение Г).

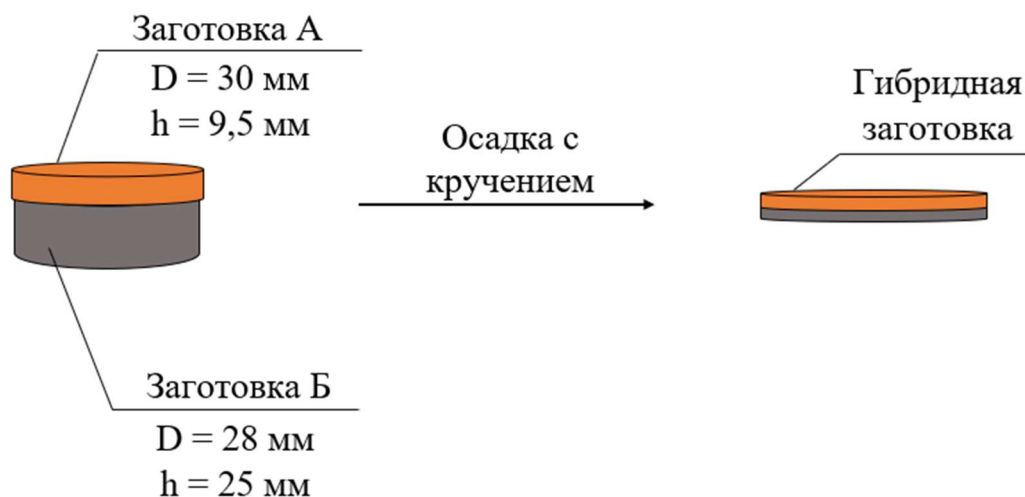


Рисунок 2.9 - Схема осадки с кручением заготовок А (BrX0,8) и Б (OT4-1)

2.2.3. Анализ методом конечных элементов

Все более широкое применение в области разработки и проектирования процессов обработки металлов давлением получило математическое моделирование с использованием метода конечных элементов [67]. Численное моделирование использовалось для изучения некоторых аспектов процесса осадки с кручением, в том числе характера течения металла, величины возникающих напряжений, влияния тепловыделения на течение материала, особенно на границе раздела инструмент - заготовка [68].

При разработке технологических процессов для назначения корректных режимов пластического формообразования необходимы реологические модели материалов, позволяющие максимально точно моделировать процессы, например, программой QForm (рисунок 2.10) [16, 74].

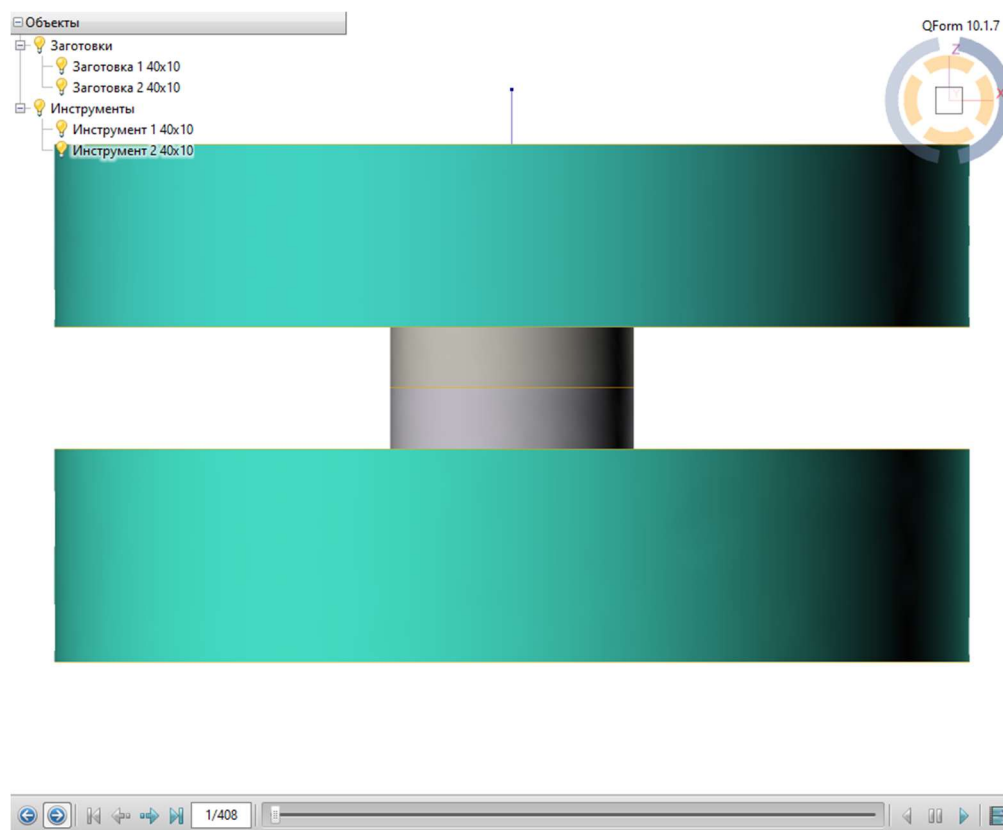
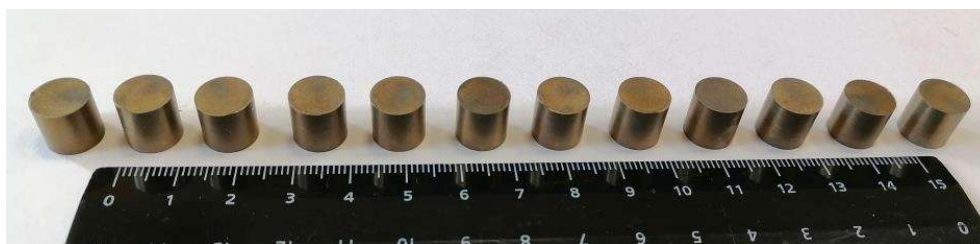


Рисунок 2.10 - Рабочее окно программы QForm (ООО КванторФорм)

Учитывая, что при моделировании процессов обработки давлением программой QForm отсутствуют данные исследуемых материалов, то необходимо было построить кривые «напряжение - деформации» при холодной и горячей температуре. Отсутствие этих материалов в базе данных программы следует к определению их реологических моделей.

С применением электроэрозии были изготовлены цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм (рисунок 2.11а). Для получения реологической модели был применен метод осадки без кручения [16, 69].



(а)



(б)

Рисунок 2.11 - Исходные образцы титанового сплава ОТ4-1 (а) и образцы после осадки (б)

Испытания провели на универсальных испытательных машинах моделей LFM250 при температуре 20°C и LFM50 при температурах 300, 400, 600 и 800°C. Испытания проводились со скоростями деформации $\dot{\varepsilon} = 4 \cdot 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} с⁻¹ на воздухе при постоянной температуре в изотермических условиях без применения смазки [16]. Образцы после осадки показаны на рисунке 2.11б. Скорость деформации поддерживалась постоянной за счет перемещения траверсы по рассчитанным в соответствии с формулой (2.1) [70, 71], которые задавалась контроллером испытательной машины [16, 72].

$$S_i = h_0 - \exp(-\dot{\varepsilon}_i \times t) \times h_0 \quad (2.1)$$

где S_i – перемещение траверсы испытательной машины; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; t – время; h_0 – исходная высота образца исследуемого материала.

При построении математической модели сопротивления деформации сплавов были применены эмпирические модели, предложенные А. Хензелем и Т. Шпиттелем (формула 2.2) [73], которые устанавливают связь между напряжением текучести и термомеханическими параметрами с 9-ю неизвестными коэффициентами:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_2} \varepsilon_i^{m_3} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_6} \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T} \quad (2.2)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_6 , m_7 , m_8 , m_9 – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

и 5-ю неизвестными коэффициентами (формула 2.3) [16, 74]:

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

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Оптимизация для нахождения неизвестных коэффициентов модели использовался модифицированный метод наименьших квадратов, известный как метод Левенберга-Маркардта [75] с применением программы MatLab.

Данная методика для определения реологической модели была применена для всех изучаемых материалов в настоящей работе.

2.2.4. Методика определения фактора трения

Для минимизации ошибок моделирования процесса фактор трения был определен экспериментально путем осадки образцов с размерами наружного и внутреннего диаметров и высоты 30:15:5 мм на 50% (рисунок 2.12) [76]. Испытание проведено при комнатной температуре на гидравлическом прессе ДБ-2432 силой 1,6 МН.

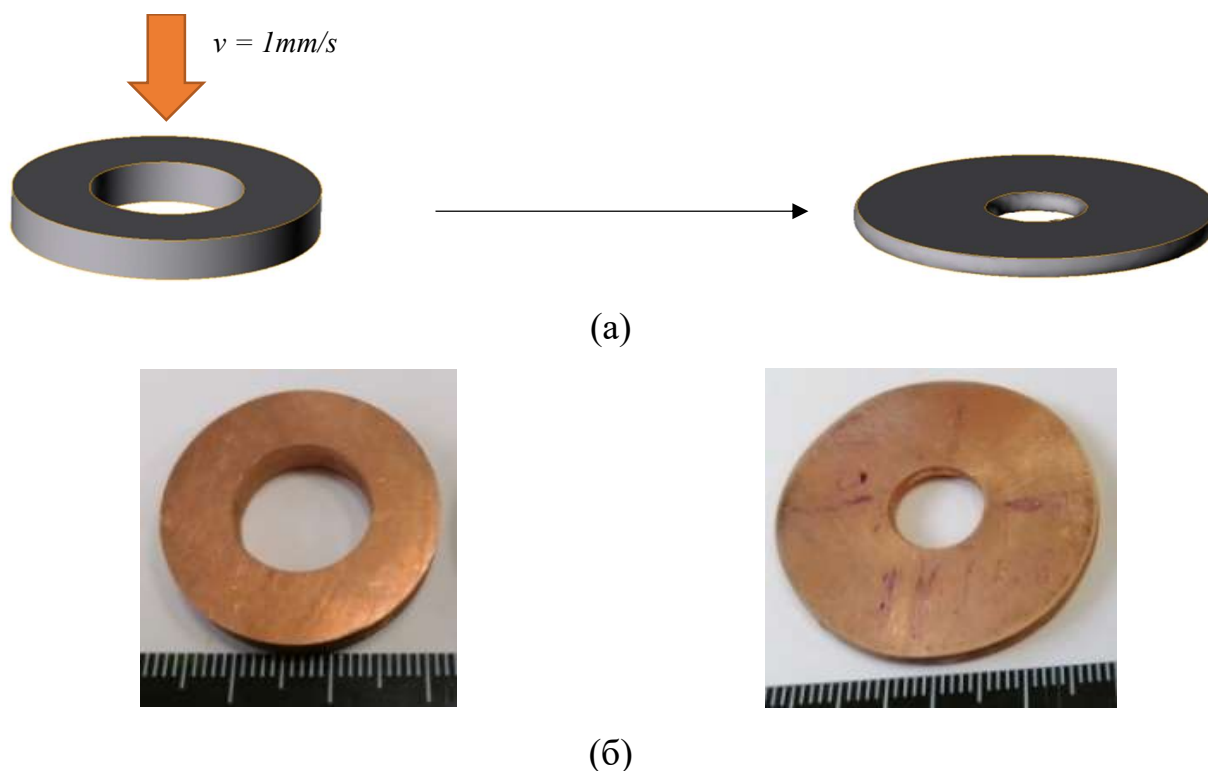


Рисунок 2.12 - Схема процесса осадки с кручением (а) и образец из медного сплава БрХ0,8 до осадки и после осадки (б) [77]

2.2.5. Методика определения микротвердости

Микротвердость определялась прибором «DuraScan 20» (рисунок 2.13) с нагрузкой на пирамиду 1Н (100 г) [78].



Рисунок 2.13 - Микротвердомер DuraScan 20

Выводы по главе 2

1. Представлены характеристики изучаемых сплавов (ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8): их химический состав и основные свойства.

2. Приведены данные по современному применяемому технологическому оборудованию, в том числе такому как модернизированный гидравлический пресс ДБ-2432 для проведения процесса осадки гибридных заготовок с кручением и осадки шайбы для определения фактора трения, бинокулярные микроскопы “Olympus Delta” и “FEI QUANTA 650” для изучения микроструктуры, испытательные машины моделей LFM250 и LFM50 для получения реологической модели материалов, прибор DuraScan 20 для проверки

микротвердости заготовок, электрические печи марок СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 и СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ для нагрева заготовок и инструментов.

3. Показано, что в настоящей работе применено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов. Для его реализации были определены и применены реологические модели материалов на базе уравнения Хензеля - Шпиттеля и применением компьютерной программы QForm (ООО КванторФорм).

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Определение реологической модели изучаемых материалов

В практике построения математической модели сопротивления деформации, для аппроксимации экспериментальных кривых «напряжение текучести – деформация», отражающих зависимость напряжения текучести от таких термомеханических параметров, как температура, деформация и скорость деформации, применяют математическую зависимость в виде степенной или экспоненциальной функции либо зависимость, основанную на определении термомеханических коэффициентов [74]. Зависимости «напряжение-деформация» аппроксимируются различными моделями, в том числе зависимостью Смирнова - Аляева [79], формулой, предложенной А.И. Целиковым, А.Т. Томленовым, В.И. Зюзиным [80], математической моделью Воуса [81] и т.д. Наибольшее распространение получили зависимости, найденные А. Хензелем и Т. Шпиттелем с 5 и 9 различными коэффициентами, зависящими от температуры, деформации и скорости деформации. Для определения рациональной области применения каждой из них нами была проведена следующая работа [71].

Полученные испытанием на сжатие зависимости напряжения текучести от величины и скорости деформации при различных температурах показаны на рисунке 3.1 [74].

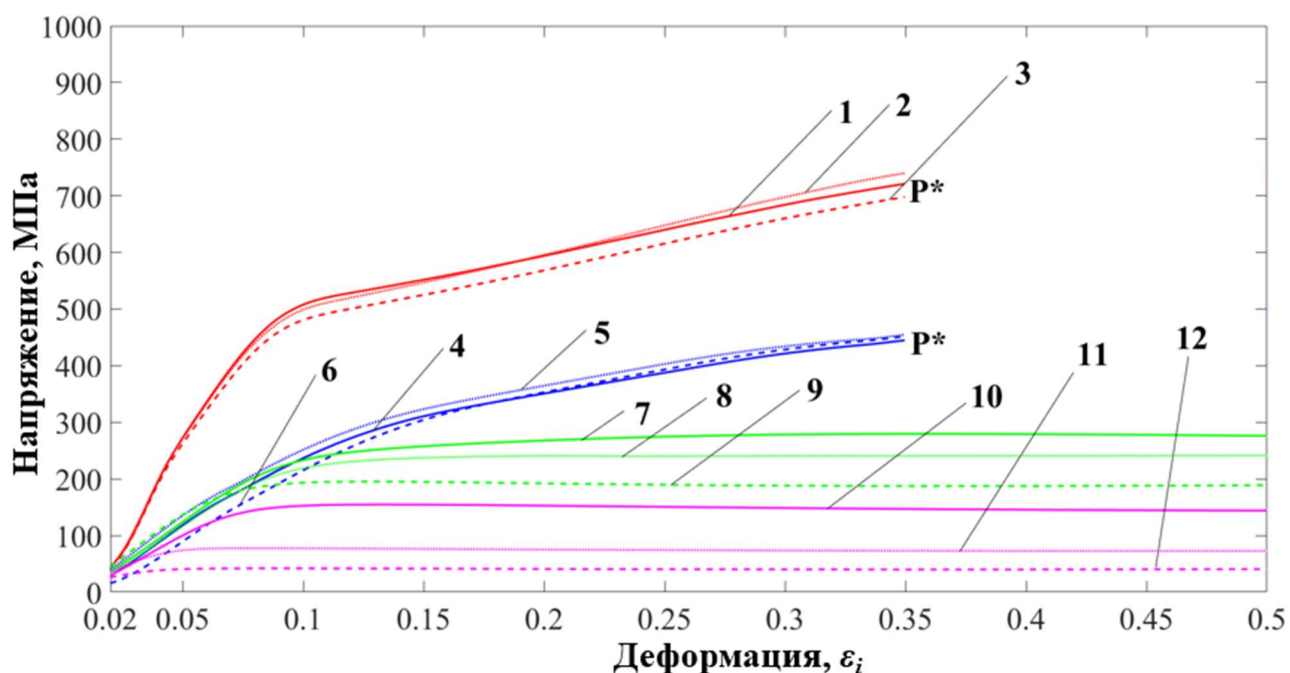


Рисунок 3.1 - Зависимость напряжения текучести титанового сплава ОТ4-1 от деформации при различных термомеханических условиях деформации [16, 74]:

- 1, 2, 3 – при температуре 20°C и скоростях деформаций 0.4; 0.01; 0.001 с⁻¹,
 4, 5, 6 - при температуре 400°C и скоростях деформаций 0.4; 0.01; 0.001 с⁻¹,
 7, 8, 9 - при температуре 600°C и скоростях деформаций 0.4; 0.01; 0.001 с⁻¹,
 10, 11, 12 - при температуре 800°C и скоростях деформаций 0.4; 0.01; 0.001 с⁻¹

P* - разрушение образца

Таблица 3.1 содержит коэффициенты по уравнению (2.2) для титанового сплава ОТ4-1 в двух температурных интервалах: от 20 до 400 °C и от 600 до 800 °C. Графическое представление этой формулы с применением найденных коэффициентов приведено на рисунке 3.2 [74].

Таблица 3.1 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для титанового сплава ОТ4-1

Температура деформации	Коэффициенты								
	<i>A</i>	<i>m</i> ₁	<i>m</i> ₂	<i>m</i> ₃	<i>m</i> ₄	<i>m</i> ₅	<i>m</i> ₇	<i>m</i> ₈	<i>m</i> ₉
20 - 400°C	532,6746	-0,0026	-0,0880	0,0051	-0,0597	0,0019	0,3680	-10 ⁻⁵	0,0938

600 - 800 °C	10,0133	-0,0024	-0,2885	-0,3952	-0,0623	-0,0035	1,8931	0,0007	0,7280
--------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------	--------

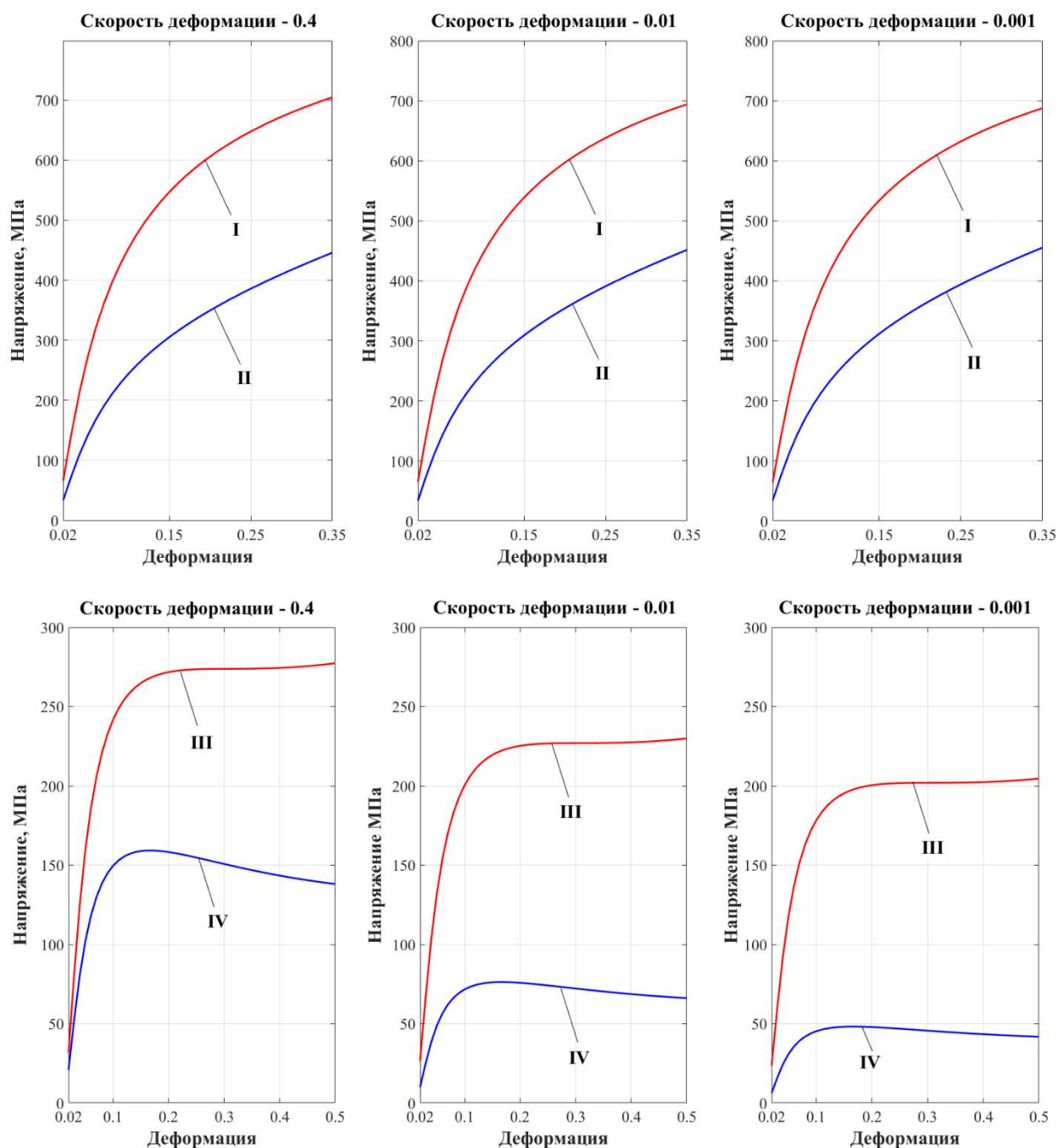


Рисунок 3.2 - Расчетные напряжения текучести по уравнению (2.2) при осадке образцов с различными скоростями деформации при различных температурах:

I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C

Для моделирования процесса осадки с кручением был применен программный комплекс QForm 9.0.8 [82] со следующими исходными данными:

обрабатываемый материал – титановый сплав ОТ4-1 с использованием найденной реологической модели; материал инструмента – сталь 5ХНМ; температура заготовки – 300°C; температура инструмента – 300°C; фактор трения – 0.8; скорость перемещения инструмента – 2 мм/сек.; угол поворота пуансона – 0 и 360° [16].

При разработке технологических процессов для выбора термомеханических режимов пластического формообразования необходимы реологические модели материалов, позволяющие максимально точно моделировать процесс формообразования заготовок [16]. Рассмотрим реологическую модель с 5-ю коэффициентами (формула 2.3) применительно к холодной и горячей деформации сплавов для определения рациональной области их использования. 5 найденных коэффициентов формулы 2.3 для титанового сплава ОТ4-1 показаны в таблице 3.2 [74]:

Таблица 3.2 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для титанового сплава ОТ4-1

<i>Температура деформации</i>	<i>Коэффициенты</i>				
	<i>A</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₃</i>	<i>m₄</i>
<i>20 - 400°C</i>	2904,0602	0,0013	0,7688	0,0029	1,5576
<i>600 - 800°C</i>	20775,5345	0,0044	0,6584	0,0710	2,3456

Расчетные кривые зависимостей напряжения течения от температуры заготовок и скоростей деформации, рассчитанные по формуле Хензеля - Шпиттеля с использованием 5 коэффициентов, приведенных в таблице 3.2, приведены на рисунке 3.3 [74].

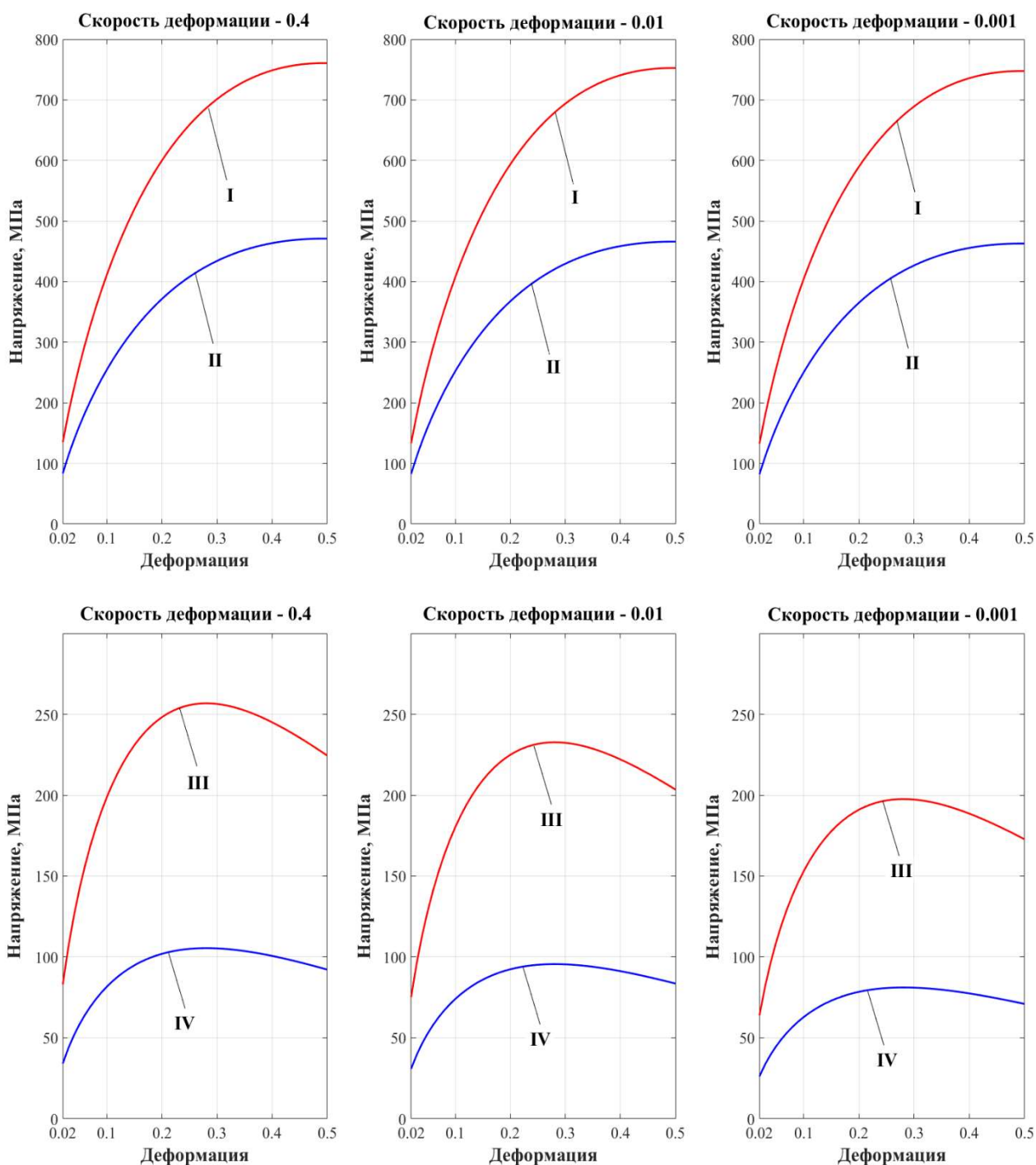


Рисунок 3.3 - Расчетные напряжения текучести по уравнению (2.3) при осадке образцов с различными скоростями деформации при различных температурах: I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C

Корректность найденных реологических моделей сплава ОТ4-1 была проверена путем моделирования осадки цилиндрического образца диаметром и

высотой 10 мм до высоты 6,8 мм при температуре 20°C. Результат моделирования представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Форма образующей при сжатии цилиндрического образца при температуре 20°C: (а) модель материала - формула (2.2); (б) модель материала – формула (2.3)

Аналогичным образом были определены коэффициенты формулы (2.3) для алюминиевых сплавов АМг2, АМг6 (таблица 3.3) и медного сплава БрХ0,8 (таблица 3.4):

Таблица 3.3 - Коэффициенты формулы 2.3 модели Хензеля–Шпиттеля алюминиевых сплавов АМг2 и АМг6 [83]

<i>Материал</i>	<i>Температура деформации</i>	<i>Коэффициенты</i>				
		<i>A</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₃</i>	<i>m₄</i>
АМг2	20 и 450°C	2223,1241	0,0027	0,9498	0,0173	3,4006
АМг6	20 и 450°C	2289,1625	0,0032	0,7932	0,0123	2,5108

Таблица 3.4 - Коэффициенты формулы 2.3 модели Хензеля - Шпиттеля медного сплава БрХ0,8

<i>Температура деформации</i>	<i>Коэффициенты</i>				
	<i>A</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₃</i>	<i>m₄</i>
20 - 400°C	999,0512	0,0006	0,7811	-0,0180	1,8756
600 - 800°C	3456,7181	0,0032	0,6755	0,0724	1,5664

В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина:

- средней абсолютной ошибки (S):

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}_i|}{|\sigma_i|} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

- коэффициента детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SE}{SE_{сред}} \quad (3.2)$$

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

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 температуры T_i , $\bar{\sigma}_i$ - i -е расчетное значение напряжения текучести, полученное по формулам 2.2 и 2.3 с учетом значений коэффициентов (см. таблицы 3.1 и 3.2); $\sigma_{исред}$ - среднее арифметическое значение напряжения текучести по полученным в эксперименте данным.

Второй показатель для оценки качества математической модели представлен формулой (3.2) и позволяет оценить какая доля дисперсии может быть предсказана моделью в известных экспериментальных данных. Считается, что при R^2 принимающем значение от 0,8 до 1,0 – математическая модель хорошего качества [74, 84].

Для верификации полученной модели выполнена постановка виртуального эксперимента в программном комплексе QForm. В виртуальном эксперименте осуществлялся процесс сжатия цилиндрических образцов из сплава OT4-1 аналогично тому, как выполнялся натурный эксперимент. Сжатие образцов в программе QForm сопровождалось записью силы деформирования и величины хода верхнего инструмента [85]. В качестве критерия точности определения математической модели материала при моделировании выбрана формула оценки средней абсолютной ошибки, записанная в виде [74]:

$$\delta = \left| \frac{P_{FEM} - P_{\text{эксп.}}}{P_{\text{эксп.}}} \cdot 100\% \right| \leq 5,0\% \quad (3.3)$$

где δ – средняя абсолютная ошибка; P_{FEM} – сила деформирования по результатам расчета в программе QForm; $P_{\text{эксп}}$ – сила деформирования, измеренная в эксперименте.

Реологическая модель должна соответствовать условию формулы (3.3).

3.2. Изучение влияния скорости скольжения металла по его поверхности на контактное напряжение

Особенностью процесса осадки с кручением является значительное различие в скорости скольжения металла по его поверхности, которая увеличивается от нуля в центре вращения до максимума на периферии заготовки. Программа QForm методом конечных элементов дает возможность оптимизировать процессы формообразования, в том числе осадку с кручением. Учитывая, что граничные условия в зоне контакта заготовки оказывают значительное влияние на характер течения металла, важно задать корректный закон трения для точного математического моделирования процесса. Без правильного задания граничных условий и, соответственно, определения напряжений на инструменте невозможно осуществить достоверное моделирование формообразующего процесса, что возможно при правильном вычислении касательных напряжений в каждой точке контакта заготовки с инструментом. Обычно, в расчетных программах применяют расчет касательных напряжений трения, основанный на законах Амонтона-Кулона, Зибеля или Леванова. Однако скорость скольжения металла по его поверхности существенно влияет на касательные напряжения в зоне контакта заготовок [86]. Как показали исследования, имеет место существенное различие экспериментальных данных и результатов моделирования, как по силе процесса формообразования, так и по температуре при назначении при моделировании

процесса осадки с кручением фактора трения постоянной величины. Ряд исследователей [87-93] считают, что для точного моделирования процесса формообразования заготовок необходимо максимально точно учитывать поверхностное напряжение. В частности, было установлено, чем выше скорость скольжения металла, тем меньше влияние поверхностного трения. Для определения величины поверхностного трения τ_R , основываясь на работах Alasti и Neumaier, В.А. Behrens предложил следующее уравнение (IFUM friction model) [77, 94]:

$$\tau_R = \left[0.3 \left(1 - \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_s} \right) \cdot \sigma_n + m \cdot k \cdot \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_s} \cdot \left(1 - \exp \frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s} \right) \right] \cdot f(v_{rel}) \quad (3.4)$$

где σ_{eq} – эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений),

σ_n - нормальное напряжение,

v_{rel} - скорость скольжения,

σ_s - напряжение текучести,

k - максимальное касательное напряжение при сдвиге

m - фактор трения.

В формуле 3.4 влияние скорости скольжения металла определяется уравнением:

$$f(v_{rel}) = \exp \frac{-1}{2} \left(\frac{v_{rel}}{C} \right)^2 \quad (3.5)$$

где v_{rel} - коэффициент, учитывающий влияние скорости скольжения.

В уравнении 3.5 коэффициент C отражает зависимость трения между заготовкой и инструментом от скорости проскальзывания (рисунок 3.5). С увеличением значения коэффициента C уменьшается влияние скорости скольжения на касательное напряжение скольжения.

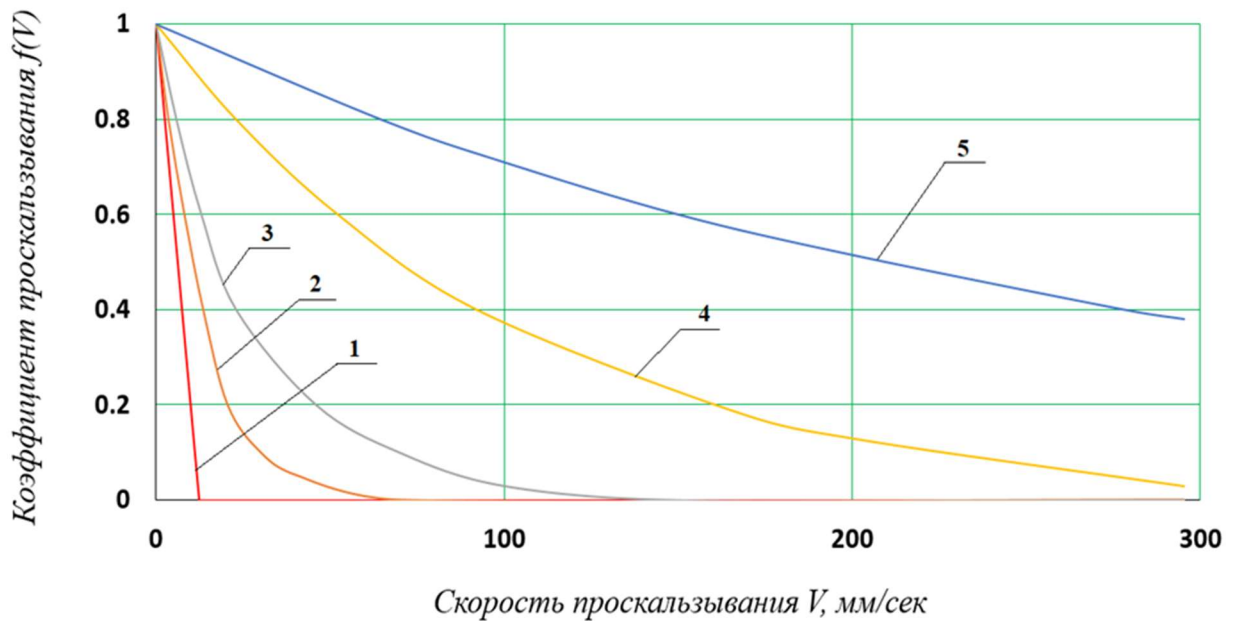


Рисунок 3.5 - Влияние коэффициента C на снижение контактного трения
 1 – $C = 1$, 2 – $C = 15$, 3 – $C = 30$, 4 – $C = 50$, 5 – $C = 150$

Учитывая, что при переходе в пластическое состояние $\sigma_{eq}/\sigma_s = 1$, уравнения 3.4 и 3.5 примут вид:

$$\tau_R = m \cdot k \cdot \left(1 - e^{\frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s}}\right) \cdot e^{-0.5 \left(\frac{v_{rel}}{C}\right)^2} \quad (3.6)$$

где:

- τ_k – величина поверхностного трения,
- σ_n – нормальное напряжение,
- σ_s – напряжение текучести,
- m – фактор трения,
- k – напряжение сдвига, равное $\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$.
- v_{rel} – скорость скольжения металла заготовки по инструменту,
- C – коэффициент, определяемый экспериментально.

Напряжения σ_n и σ_s рассчитывались в процессе моделирования осадки с кручением медного сплава БрХ0,8 с использованием определенной нами реологической модели по формуле, предложенной А. Хензелем и Т. Шпиттелем (таблица 3.4) [77].

Величина поверхностного трения с учетом скорости скольжения v_{rel} в процессе моделирования определялась разработанной нами совместно с фирмой “КванторФорм” подпрограммой «*friction.sliding_velocity*» (рисунок 3.6):

```

1  -- Задание коэффициентов
2  m = parameter ("m", 1) -- фактор трения (1/1)
3  a = parameter ("a", 1) -- коэффициент влияния контактного давления (1/1)
4  C = parameter ("C [mm/s]", 10)*1e-3 -- параметр влияния скорости проскальзывания(мм/с)
5
6  -- Переопределение математических операторов Lua для краткости записи
7  exp = math.exp
8  sqrt = math.sqrt
9
10 -- Расчет контактного напряжения
11 function FrictionStress (stress_flow, pressure, v_slide)
12     -- Блок защиты от деления на 0
13     if stress_flow <= 0 then stress_flow = 1 end
14     if C <= 0 then
15         C = 1
16         v_slide = 0
17     end
18
19     F = m * stress_flow / sqrt(3) *
20         (1 - exp(-a * pressure / stress_flow)) *
21         exp((-1 / 2) * (v_slide / C)^2)
22
23     return F

```

Рисунок 3.6 - Подпрограмма для учета влияния скорости скольжения металла

v_{rel}

Фактор трения m определяли экспериментально (см. подпункт 2.2.4), а коэффициент C находили путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных, на базе решения, наиболее точно отражающего реальный процесс формообразования. После осадки образцы для определения фактора трения имели размеры 38,2 : 8,39 : 2,5 мм. Уменьшение внутреннего диаметра составило 44,1% и уменьшение высоты 50%. В соответствии с графиком, приведенным на рисунке 3.7, фактор трения m равен 0,61 [77].

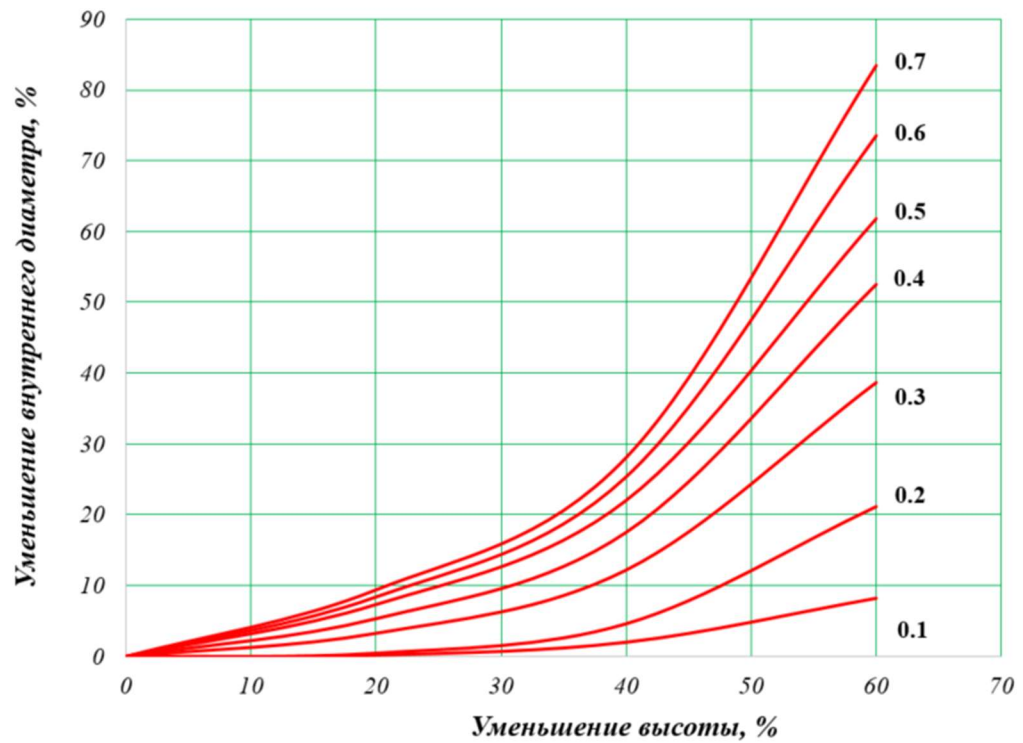


Рисунок 3.7 - График для определения фактора трения методом осадки образцов с соотношением геометрических размеров 6:3:1

Экспериментальную осадку с кручением, схема которой показана на рисунке 3.8а, была осуществлена на прессе (рисунок 3.8б) с применением заготовок из медного сплава БрХ0,8 диаметром 40 и высотой 7 мм, полученный методом электроэрозионной вырезки.





(в)



(г)

Рисунок 3.8 - Схема процесса осадки с кручением (а), пресс для его реализации (б), исходный образец из медного сплава БрХ0,8 (в) и образец после осадки с кручением (г)

Моделирование процесса осадки с кручением осуществили с применением программы QForm 10.1.5 и приведенной выше подпрограммой «*friction.sliding_velocity*». В итоге при значении коэффициента $C = 40$ результат моделирования наиболее точно совпадает с результатом эксперимента.

Для оценки влияния подпрограммы «*friction.sliding_velocity*» на контактное трение при осадке с кручением было проведено моделирование осадки заготовки из сплава БрХ08 с ее применением и без нее (рисунок 3.9). С учетом полученных данных по фактору трения при осадке кольцевых заготовок и с применением подпрограммы по учету влияния скорости скольжения металла была осуществлена осадка с кручением пакета из двух заготовок из медного сплава БрХ0,8 и моделирование процесса. Диаметр и высота каждой заготовки составляли 30 и 10 мм, соответственно. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.10.

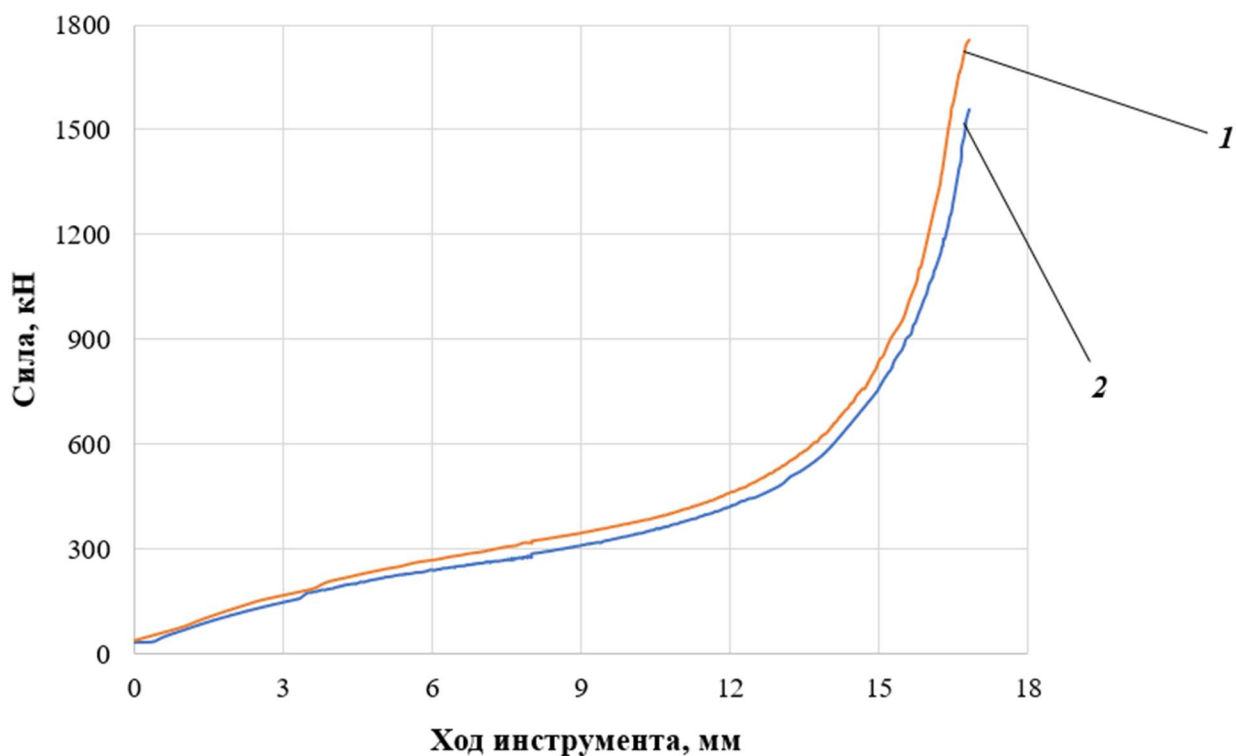


Рисунок 3.9 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования зависимости силы на инструменте при осадке с кручением гибридной заготовки из сплава БрХ0,8 (1 - с постоянным фактором трения $m = 0,61$, 2 - с применением подпрограммы при факторе трения $m = 0,61$ и $C = 40$)

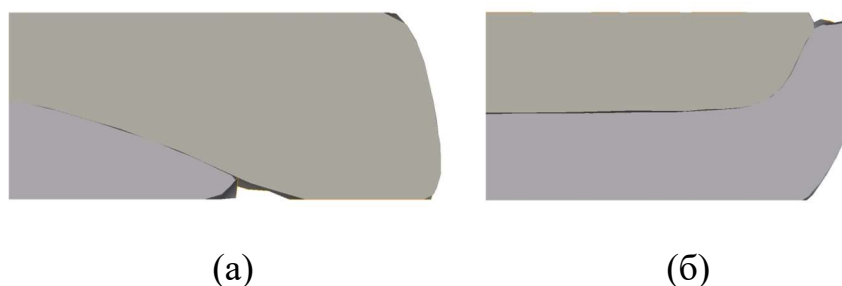


Рисунок 3.10 - Сравнение результатов моделирования процесса осадки пакета из двух заготовок из сплава БрХ08 (а - моделирование с постоянным фактором трения, б – моделирование с применением подпрограммы «friction.sliding_velocity»)

3.3. Моделирование процесса осадки с кручением гибридных заготовок

Результат моделирования процесса осадки с кручением при холодной температуре гибридной заготовки ОТ4-1 программой QForm 10.1.5 представлен на рисунке 3.11.

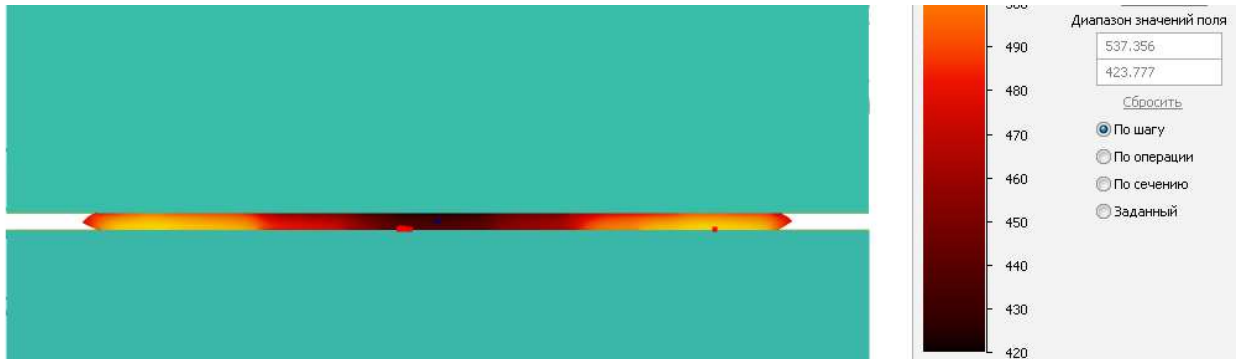


Рисунок 3.11 - Распределение температуры в титановой заготовке, осажденной с кручением

С использованием 9 неизвестных коэффициентов уравнения Хензеля - Шпиттеля титана ОТ4-1 и подпрограммы «*friction.sliding_velocity*» в программе QForm при моделировании процесса осадки с кручением по методике в главе 2 (подпункт 2.2.2) получен результат моделирования (рисунок 3.12).

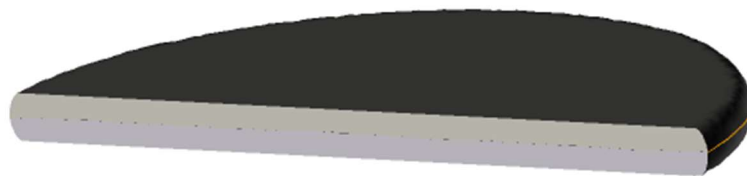
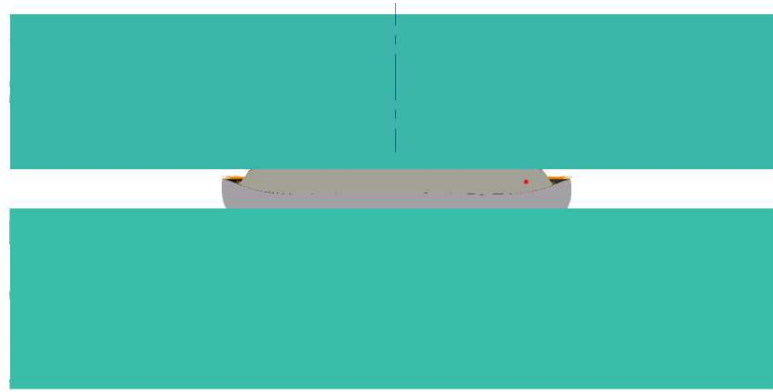
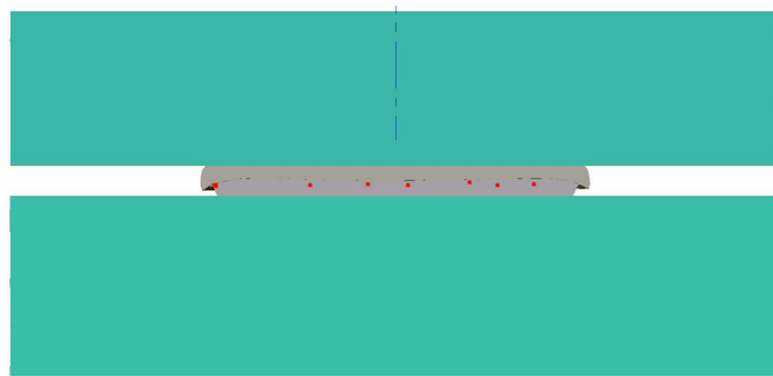


Рисунок 3.12 - Результат моделирования программы QForm при осадке с кручением гибридной заготовки ОТ4-1

При применении программы QForm с использованием 5 неизвестных коэффициентов для алюминиевых сплавов АМг2 и АМг6 в таблице 3.3 и подпрограммы «*friction.sliding_velocity*» получены результаты моделирования, показаны на рисунке 3.13:



(a)



(б)

Рисунок 3.13 - Результат моделирования программы QForm при осадке с кручением гибридных заготовок
а - сплав АМг2, б - сплав АМг6

Рисунок 3.14 представлены распределение температуры (а) и интенсивности напряжений (б) при моделировании процесса осадки заготовок с кручением с применением реологической модели в таблице 3.4 с помощью программы QForm.

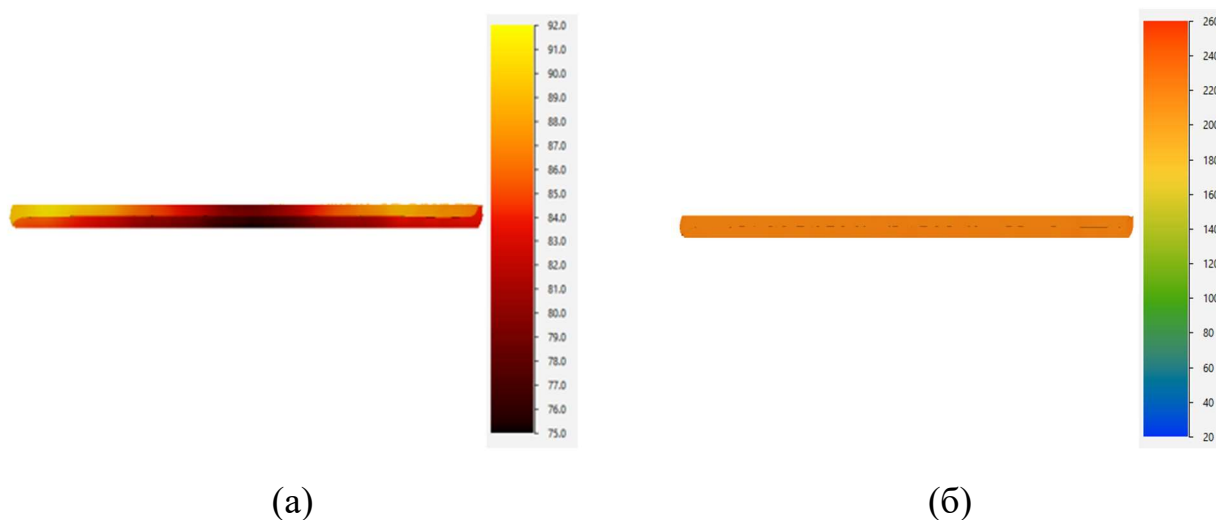


Рисунок 3.14 - Результаты моделирования процесса осадки заготовок БрХ0,8 с кручением, распределение температуры (а) и интенсивности напряжений (б) в меридиональном сечении [78]

Выводы по главе 3

1. Выполнен сравнительный анализ точностных параметров определения реологических модели Хензеля – Шпиттеля с использованием 5 и 9 неизвестных коэффициентов. Найдены 9 и 5 неизвестных коэффициентов для сплава ОТ4-1 и 5 неизвестных коэффициентов для сплавов АМг2, АМг6 и БрХ0,8.

2. Дана оценка критерия для оценки точности формул. Показаны расчетные напряжения с применением 9 и 5 неизвестных коэффициентов для сплава ОТ4-1.

3. Определено, что сила трения является важным фактором при соединении материалов методом осадки с кручением. Показано влияние фактора трения и скорости скольжения на величину поверхностного трения: чем выше скорость скольжения металла, тем меньше влияние поверхностного трения. Приведены формула для определения величины поверхностного трения и подпрограмма на языке LUA, применяемая для моделирования процесса с использованием данной формулы в компьютерной программе QForm.

4. Показаны результаты моделирования зависимости момента кручения на инструменте при осадке при различных значениях фактора трения m и коэффициента C . Представлены результаты моделирования процесса осадки пакета из двух заготовок из сплава БрХ0,8 и сравнение результатов моделирования с применением и без применения подпрограммы для проверки точности фактора трения m и коэффициента C .

5. Показаны результаты моделирования процесса осадки с кручением гибридных изучаемых заготовок с применением функциональных зависимостей Хензеля - Шпиттеля и подпрограммы «*friction.sliding_velocity*» программой QForm.


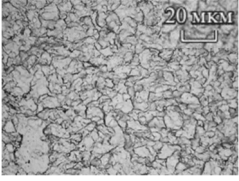
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ












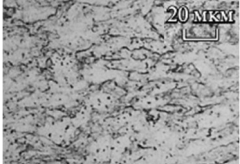


4.1. Микроструктура титановых образцов при пластической деформации заготовок из сплава ОТ4-1


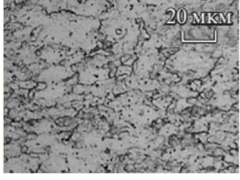

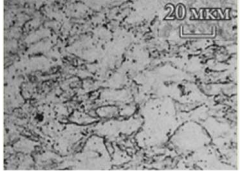

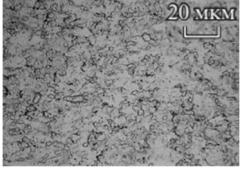

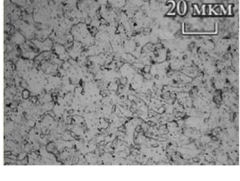
В процессе пластического формообразования структура сплавов претерпевает изменения, преимущественно зависящие от температуры металла в процессе обработки, скорости и величины деформации. Учитывая большое влияние структурного состояния металла на эксплуатационные свойства указанные параметры должны учитываться при разработке технологических процессов и выборе режимов обработки. Так, например, для титанового сплава ОТ4-1 наилучшее сочетание его механических свойств обеспечивают мелко- и среднезернистые структуры [95].

Результаты исследования микроструктуры 12 титановых образцов, осажденных при различных температурах и с различными скоростями деформации, выполненные в соответствии с методикой (глава 2), позволяют оценивать как предельную деформацию и изменение структуры в зависимости от температуры, величины и скорости деформации (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Влияние термомеханических режимов осадки на структуру титанового сплава ОТ4-1 [16, 96]

№	Фото образца с высотой	Температура образца, °С	Величина деформации ε	Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$	Структура, x 1000
1	 (h = 7,0 мм)	20	0,357	0,4	

2	 (h = 6,8 MM)	20	0,386	0,01	
3	 (h = 7,1 MM)	20	0,342	0,001	
4	 (h = 9,0 MM)	400	0,105	0,4	
5	 (h = 9,0 MM)	400	0,105	0,01	
6	 (h = 9,1 MM)	400	0,090	0,001	
7	 (h = 6,5 MM)	600	0,431	0,4	
8	 (h = 6,2 MM)	600	0,478	0,01	

9	 (h = 5,6 мм)	600	0,580	0,001	
10	 (h = 6,1 мм)	800	0,494	0,4	
11	 (h = 5,8 мм)	800	0,544	0,01	
12	 (h = 5,4 мм)	800	0,616	0,001	

4.2. Изготовление гибридных титановых заготовок при осадке с кручением

С учетом найденных в разделе 4.1. данных было выполнено получение гибридных заготовок из сплава ОТ4-1 [16]. Как и ожидалось, формообразование холодным инструментом при температуре 20°C приводило к разрушению заготовок (рисунок 4.1). Однако деформация горячих заготовок в соответствии методикой (подпункт 2.2.2) позволила получить бездефектные заготовки (рисунок 4.2.).



(a)



(б)

Рисунок 4.1 - Заготовка из титанового сплава ОТ4-1 до (а) и после осадки с кручением (б) при комнатной температуре



(a)



(б)

Рисунок 4.2 - Гибридная заготовка из сплава ОТ4-1, полученная осадкой с кручением (а) и ее сечение (б)

Исследование найденных заготовок с помощью бинокулярного микроскопа «Olympus Delta» с увеличениями 100, 500, 1000 и 2500 и твердомера «DuraScan 20» и электронном микроскопе «FEI QUANTA 650» с увеличением 5000 подтвердили хорошее качество полученных гибридных заготовок (рисунки 4.3 - 4.5).



Рисунок 4.3 - Структура исходного образца, увеличение x100

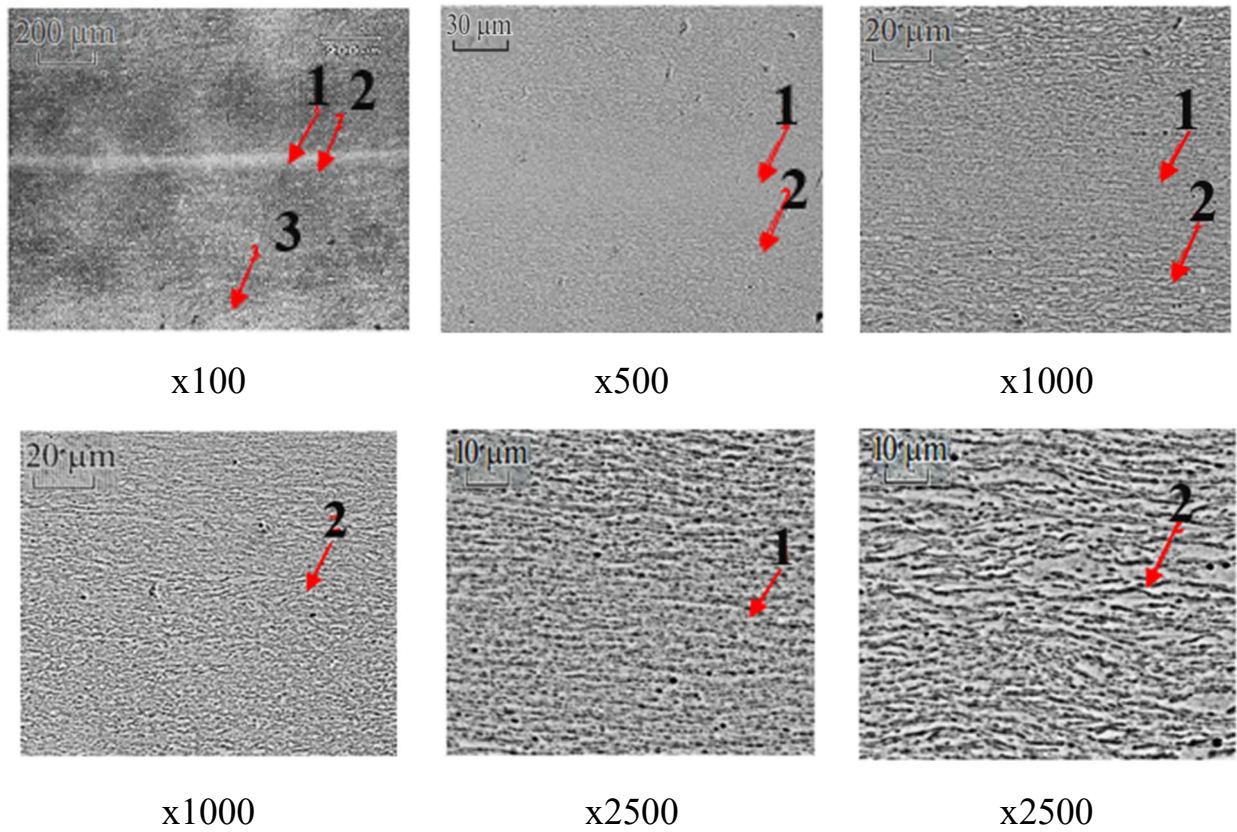


Рисунок 4.4 - Микроструктура гибридного образца из сплава ОТ4-1 в меридиональном сечении. 1- зона соединения, 2 – вблизи зоны соединения, 3 – зона основного металла

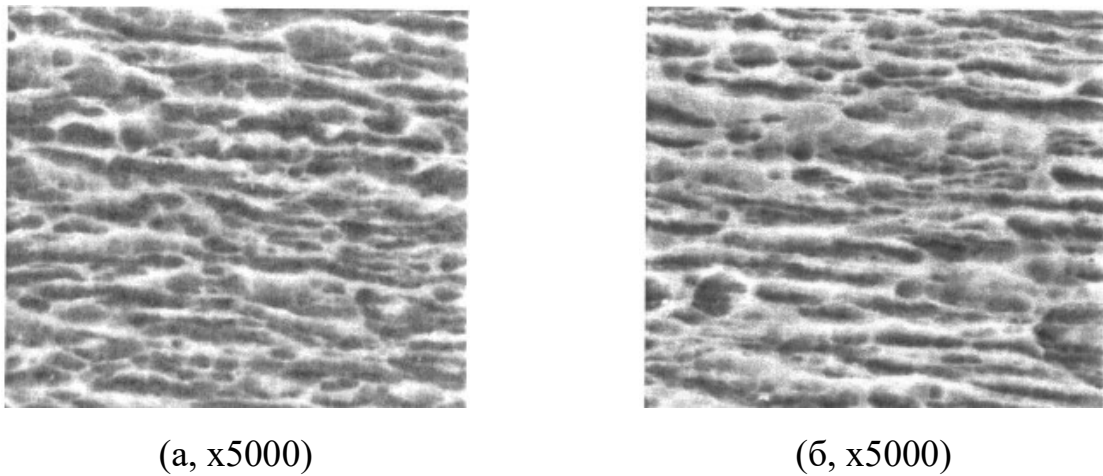
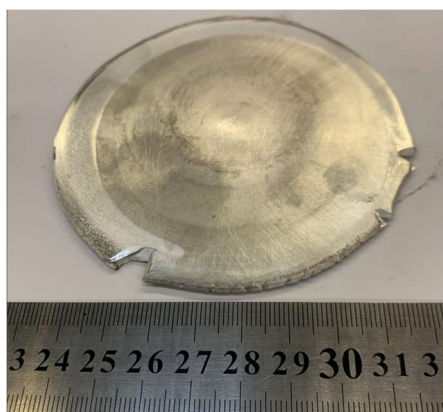


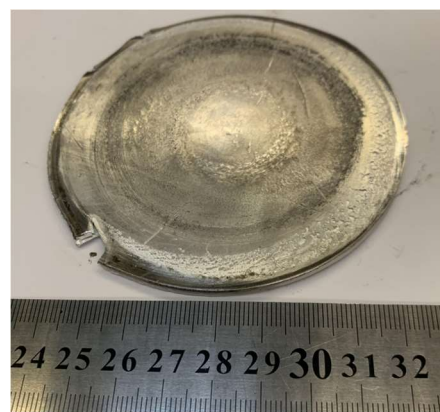
Рисунок 4.5 - Микроструктура образцов на электронном микроскопе, а – вблизи зоны соединения, б – зона соединения

4.3. Изготовление гибридных алюминиевых заготовок при осадке с кручением

На рисунке 4.6 показан внешний вид заготовки из алюминиевого сплава АМг2 после осадки с кручением двух одинаковых заготовок. Видно, что поверхность заготовки, контактирующая с вращающимся (верхним) инструментом (рисунок 4.6а), имеет матовый и блестящий светло-серый цвет. С противоположной стороны заготовка не проскальзывает по инструменту и поверхность имеет шероховатый и блестящий серый цвет. На краевой части образца наблюдаются надрывы величиной ~4-5мм.



(a)



(б)

Рисунок 4.6 - Вид сверху (а) и снизу (б) заготовки из сплава АМг2 после осадки с кручением

После процесса осадки с кручением 2 алюминиевых заготовок из сплава АМг6 получили гибридные заготовки. Внешним осмотром поверхность образца с одной стороны гладкая, светло-серого цвета (рисунок 4.7а), с другой стороны – шероховатая, серого цвета (рисунок 4.7б). С обеих сторон образца на поверхности наблюдаются кольцевые следы деформации и образование складок в краевых зонах. По краю образца отмечается большое количество широко раскрытых разрывов материала обеих пластин величиной ~2-13мм.



Рисунок 4.7 - Вид сверху (а) и снизу (б) заготовки из сплава АМг6 после осадки с кручением

Результаты исследования макро- и микроструктур заготовок под бинокулярным микроскопом (рисунки 4.8 - 4.11) показывают, что соединение в основной массе достаточно однородное.

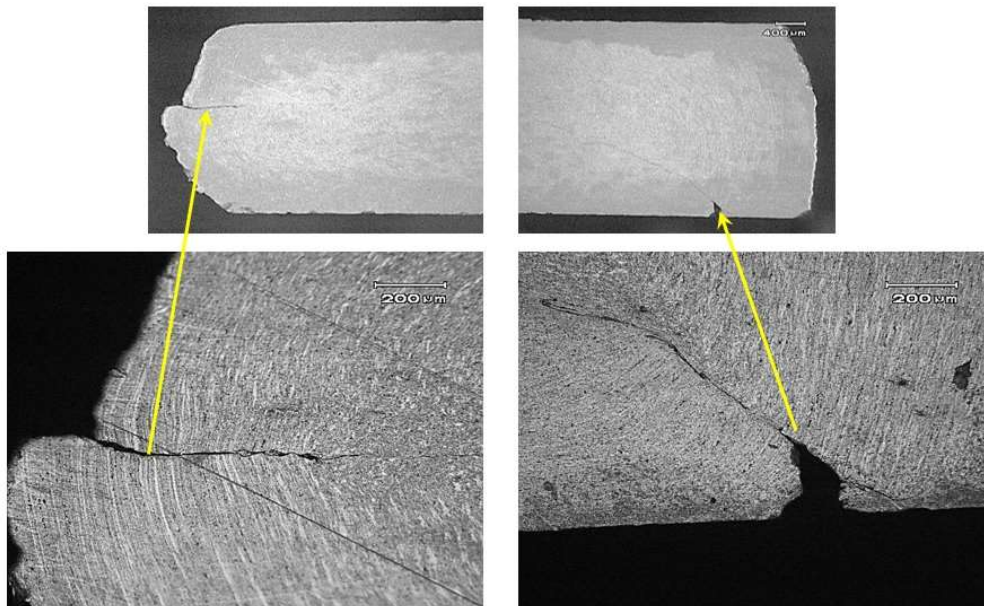
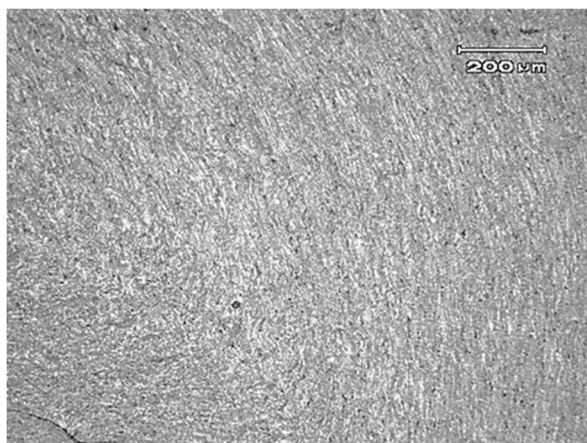
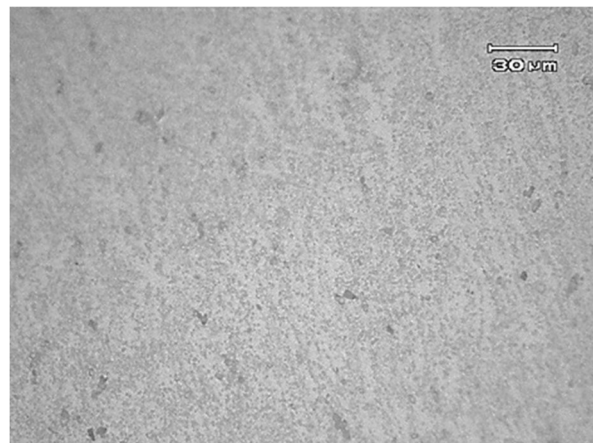


Рисунок 4.8 - Макроструктура заготовки из сплава АМг2 в краевых зонах



x 100

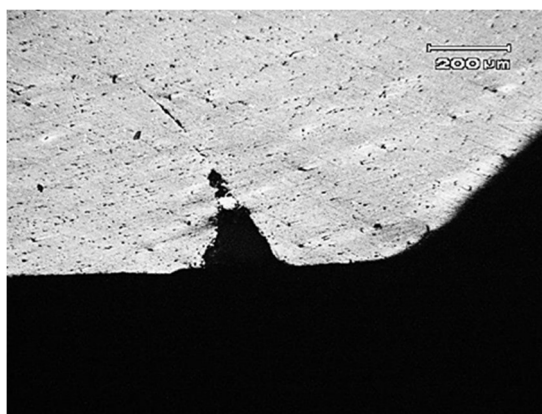


x 500

Рисунок 4.9 - Микроструктура в зоне соединения заготовок из сплава АМг2

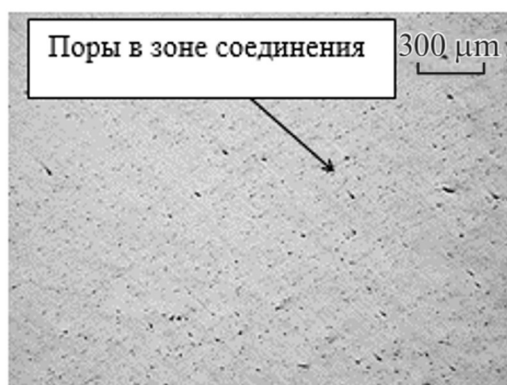


(a)



(б)

Рисунок 4.10 - Макрошлиф осаженной заготовки из сплава АМг6 (а) и ее внешнего торца (б)



до травления



после травления

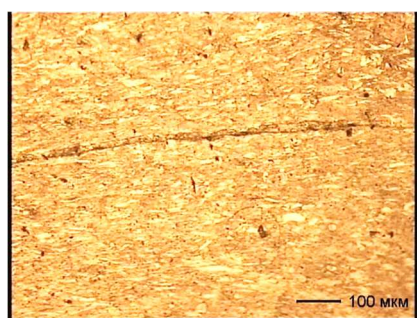
Рисунок 4.11 - Микроструктура зоны соединения заготовок из сплава АМг6 до и после травления (x100) [97]

4.4. Изготовление гибридных заготовок из медного сплава БрХ0,8 осадкой с кручением

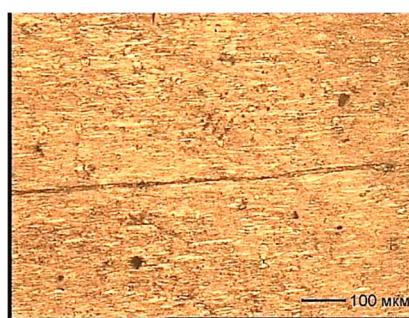
Медный сплав БрХ0,8 обладает высокими пластическими свойствами при комнатной температуре, что позволяет получать гибридные образцы при комнатной температуре (20°C) в соответствии со схемой, представленной на рис 2.8 (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 - Гибридная заготовка из после холодной осадки с кручением: а - внешний вид образца, б – макроструктура поперечного сечения.



(а, x1000)



(б, x1000)

Рисунок 4.13 - Микроструктура гибридного образца из сплава БрХ0,8 после холодной осадки с кручением: а – в периферии образца, б – в центре образца

С целью оценки качества соединения образцов осадкой с кручением была проведена их термообработка со следующими режимами: нагрев до температуры 900°C, выдержка в течение 4 часов и охлаждение на воздухе с последующим изучением микроструктуры (рисунки 4.13 и 4.14). Исследование макроструктуры гибридного образца после процесса осадки с кручением подтвердила его высокое качество [78].

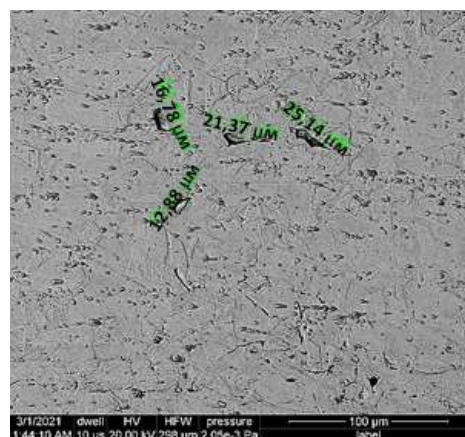


Рисунок 4.14 - Микроструктуры термообработанного образца после осадки с кручением гибридной заготовки [98]

4.5. Изготовление гибридных разнородных заготовок при осадке с кручением

Положительные результаты изготовления гибридных заготовок из однородных материалов явились основой для получения гибридных заготовок из двух разнородных материалов, в частности, титанового сплава ОТ4-1 и медного сплав БрХ0,8 процессом осадки с кручением при температуре 600°C по схеме, представленной на рисунке 2.9.

Полученные осадкой с кручением заготовки из двух разнородных материалов (титановый сплав ОТ4-1 и медный сплав БрХ0,8) (рисунок 4.15) нагревались до температуры 900°C и подвергались штамповке на винтовом прессе Lasco 400. Штамповка заготовок в штампе, подогретом до температуры 200°C, позволила получить кондиционный полуфабрикат (рисунок 4.16).



Рисунок 4.15 - Гибридная заготовка, полученная методом осадки с кручением



(а)



(б)

Рисунок 4.16 - Полуфабрикат детали «кронштейн», полученный штамповкой гибридной заготовки (а) и его сечение (б)

Полученные штамповкой заготовки разрезались электроэрозионным методом и исследовались в плоскости разрезки на бинокулярном микроскопе Olympus Delta с увеличениями 100, 200 и 500 (рисунки 4.17 - 4.19), что дает возможность изучить микроструктуру зоны контакта, а количественный микроанализ полуфабриката с применением бинарной фазовой диаграммы Ti–Cu (рисунок 4.21) дал возможность определить химический состав образовавшихся новых фаз [99].

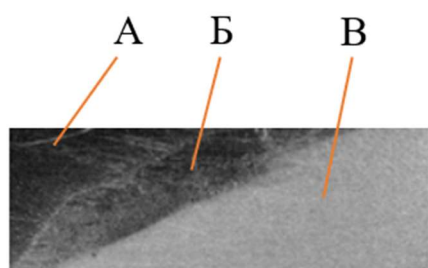


до травления (x100)

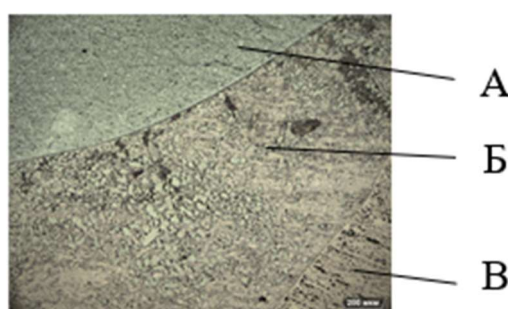


после травления (x100)

Рисунок 4.17 - Микроструктура в сечении полуфабриката



x10



x100

Рисунок 4.18 - Переходная зона гибридной заготовки
(А - титан, Б - переходная зона, В - бронза)

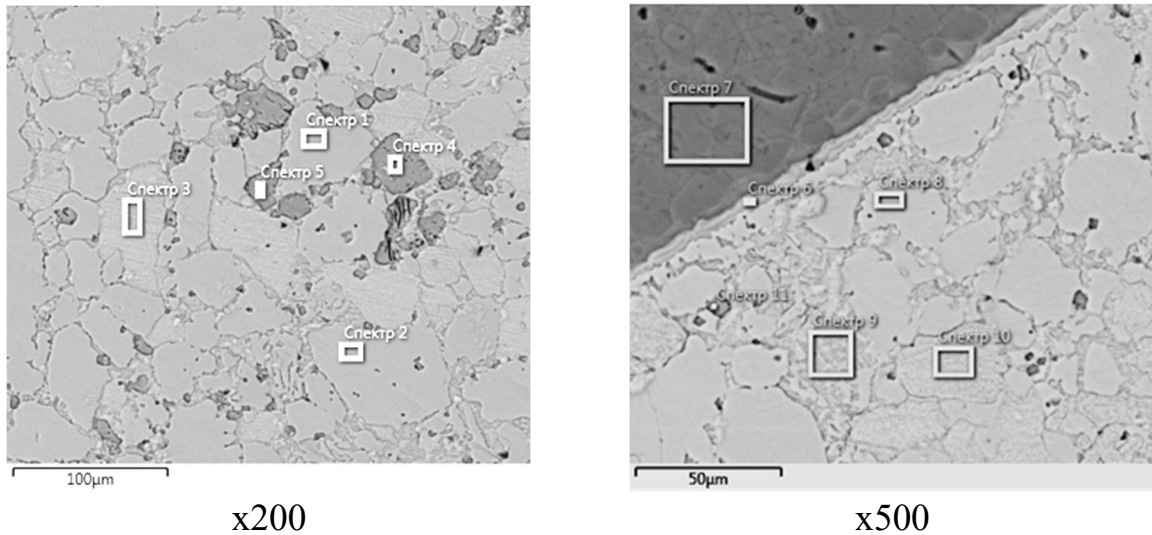


Рисунок 4.19 - Электронное изображение контактной зоны заготовок

Замер микротвердости заготовок был проведен в точках, показанных на рисунке 4.20. Результаты замера микротвердости позволяют качественно оценить зону соединения заготовок (таблица 4.2).

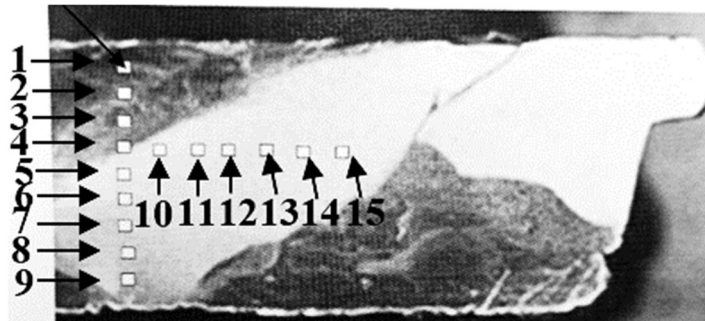


Рисунок 4.20 - Точки замера микротвердости.

Таблица 4.2 - Результат замера микротвердости заготовки

<i>№ точки</i>	<i>Твердость (HV0,1)</i>
1	93-94
2	106-112
3	411-425
4	349-354
5	250-259

6	232-245
7	234-240
8	246-251
9	236-240
10	248-252
11	238-243
12	227-234
13	236-240
14	232-236
15	227-232

Фазовой диаграмма Cu–Ti, показана на рисунок 4.21 [100] позволяет определить количественный состав гибридной заготовки из сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8 (таблица 4.3).

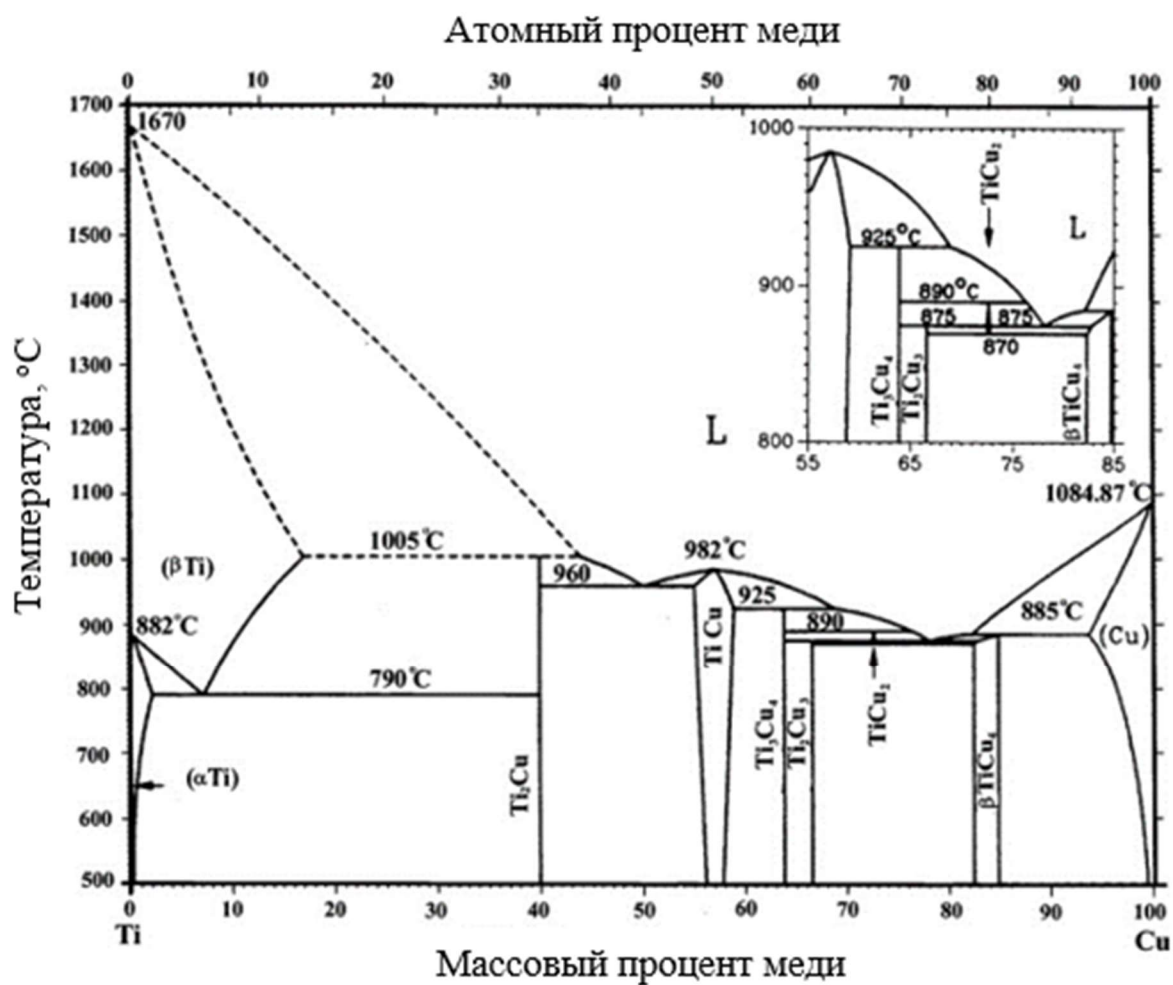


Рисунок 4.21 - Бинарная фазовая диаграмма Ti–Cu

Таблица 4.3 - Количественный микроанализ полуфабриката «титан - бронза» в области соединения (% мас.)

Название спектра	Ti	Cu	Состав по диаграмме состояния титан-медь
Спектр 1	26,27	73,73	TiCu ₂
Спектр 2	25,72	74,28	TiCu ₂
Спектр 3	6,10	93,90	TiCu ₄
Спектр 4	40,73	57,69	Ti ₂ Cu
Спектр 5	40,67	57,87	Ti ₂ Cu
Спектр 6	31,26	68,74	TiCu ₂
Спектр 7	96,67	-	Ti
Спектр 8	26,78	73,22	TiCu ₂

Спектр 9	10,69	89,31	TiCu ₄
Спектр 10	3,06	96,94	Cu
Спектр 11	26,48	73,52	TiCu ₂

Выводы по главе 4

1. Показана микроструктура титановых образцов, полученных при определении реологической модели сплава ОТ4-1 методом осадки без кручения цилиндрических заготовок при скоростях деформации 0.001, 0.01, 0.4 с⁻¹ и при температурах 20, 400, 600, 800°С. Установлено, что для определения режимов деформации заготовок необходимо изучить их микроструктуру до и после обработки при различных скоростях деформации и температурах.

2. Получены результаты осадкой с кручением гибридных титановых заготовок без предварительного нагрева холодным инструментом и при нагреве заготовок до температуры 600°С. Показаны результаты исследования микроструктур в зоне соединения 2 титановых гибридных заготовок.

3. Показаны результаты испытания осадки с кручением гибридных заготовок из алюминиевых сплавов АМг2 и АМг6 при температурах 20°С холодным инструментом. Представлены результаты исследования макро- и микроструктуры 2 алюминиевых гибридных заготовок в зоне соединения.

4. Получен гибридный образец из медного сплава БрХ0,8, осаженной с кручением при холодной температуре инструмента и заготовок (примерно 20°С). Микроструктура в зоне соединения 2 медных цилиндрических заготовок была представлена.

5. Представлены результат после процесса горячей осадки с кручением гибридной заготовки из двух разнородных материалов (титановый сплав ОТ4-1

и медный сплав БрХ0,8 при температуре 600°С) и результат штамповки при температуре 900°С. Показаны результат исследования микроструктуры полученного полуфабриката типа «кронштейн» в переходной зоне и результат замера микротвердости полуфабриката. Получен количественный микроанализ полуфабриката «титан - бронза» в области соединения.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

5.1. Определение реологических моделей исследуемых материалов

При температурах 20 и 400°C, вне зависимости от заданной скорости деформации из исследуемого диапазона значений 0,001 - 0,4 с⁻¹, на боковой поверхности деформируемого цилиндрического образца сплава ОТ4-1 появляются трещины (таблица 4.1). Трещинообразование наблюдается при достижении накопленной деформации $\varepsilon = 0.30 - 0.40$. В диапазоне температур от 600 °С до 800 °С деформация образцов сжатием на величину ε до 0.5 - 0.55 не приводит к появлению трещин. Учитывая эту особенность сопротивления исследуемого материала пластической деформации, при обработке экспериментальных данных, полученных с испытательной машины, были сделаны следующие допущения относительно математической модели сплава ОТ4-1 [74]:

- 1) в диапазоне температур от 20°C до 400 °С модель материала определяется при величине деформации в интервале от 0,01 до 0,35;
- 2) в диапазоне температур от 600°C до 800 °С модель материала определяется при значении деформации в интервале от 0,01 до 0,55;
- 3) диапазон температур нагрева сплава ОТ4-1 от 400°C до 600 °С не рассматривается;
- 4) деформирование сплава ОТ4-1 выполняется при скоростях деформации 0,001 с⁻¹, 0,01 с⁻¹, 0,4 с⁻¹ [74].

В таблице 5.1 представлены значения ошибки S (формула 3.1) для различных исследованных температурно-скоростных условий деформирования образцов при применении уравнения Хензеля - Шпиттеля с 9-ю коэффициентами (формула 2.2). В среднем, ошибка S в диапазоне температур 20-400°C не превышает 4 %; в диапазоне температур 600-800°C – 6,62 % [74].

Таблица 5.1 - Значения средней абсолютной ошибки S (в %) для модели материала, основанной на формуле (2.2)

Значение температуры, °С	Значение скорости деформации, с ⁻¹			Коэффициент детерминации R^2
	0,001	0,01	0,4	
20	3,1	3,5	3,3	0,860
400	4,9	4,7	4,5	0,895
600	7,8	7,9	6,5	0,817
800	3,9	8,5	5,1	0,846

В таблице 5.1 представлены также значения коэффициента детерминации (формула 3.2). Из рисунка 5.1 видно, что полученная модель имеет достаточно хорошее совпадение с данными эксперимента. Потеря точности расчета наблюдается для температур 600°С и 800°С в диапазоне значений деформации от 0,1 до 0,55, что может быть связано с влиянием неучтенных факторов в модели зависимости напряжения текучести от деформации [74].

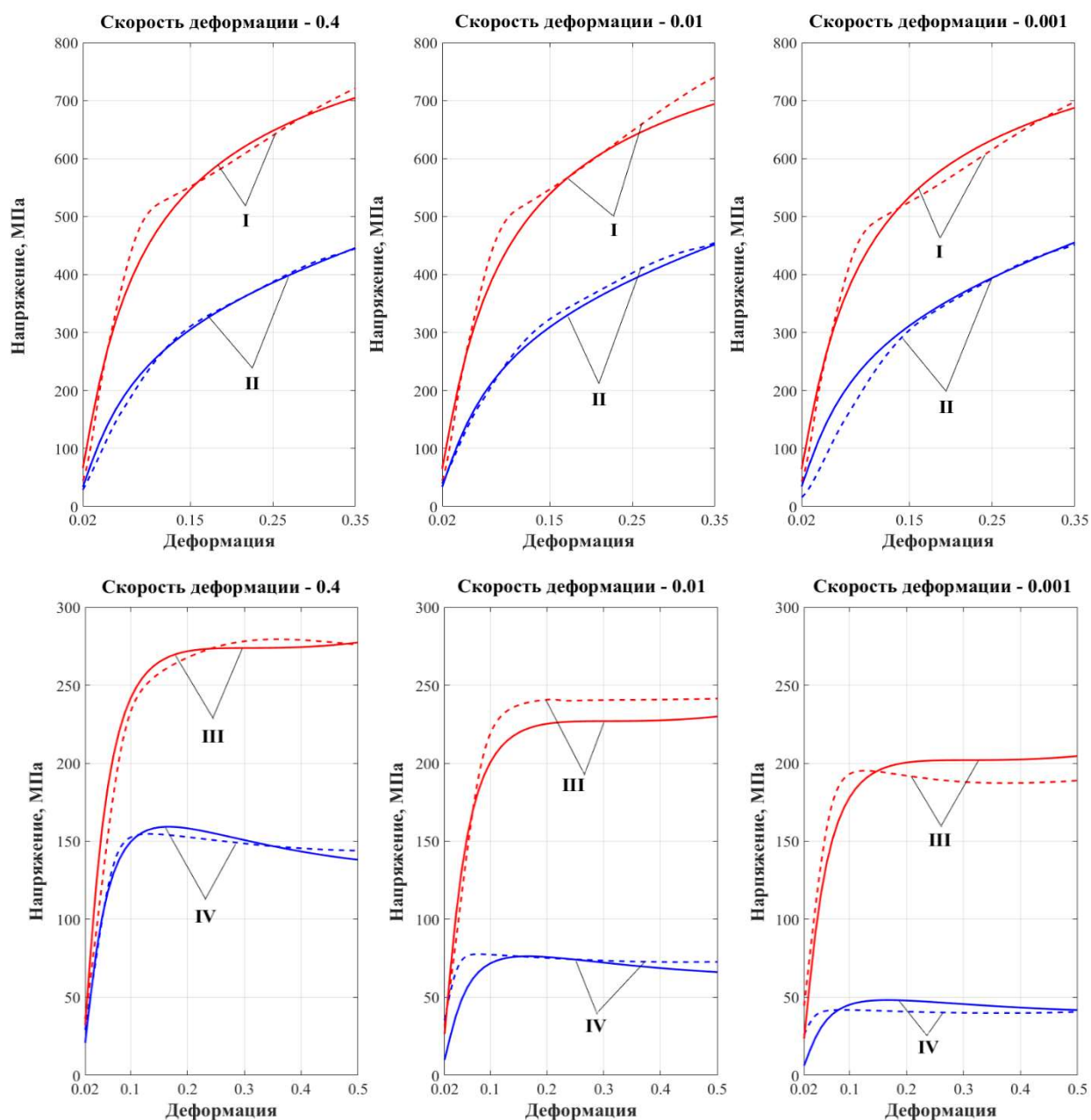


Рисунок 5.1 - Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов по формуле 2.2 с различными скоростями деформации при различных температурах [16]:

I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C градусов

(- - - данные эксперимента; — расчетная кривая)

По результатам моделирования и эксперимента, представленных на рисунке 5.2 видно, что в обоих случаях геометрические параметры заготовки (диаметр 14 мм и высота 5.4 мм) практически совпадают, что подтверждает адекватность найденной модели исследуемого сплава [16].

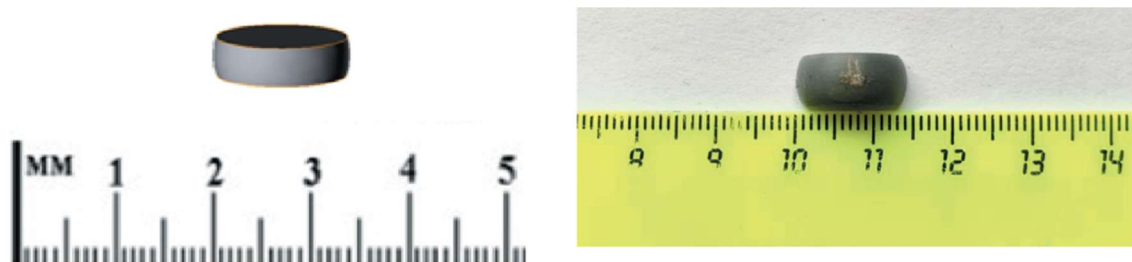


Рисунок 5.2 - Результаты моделирования и испытания осадки титановой заготовки из сплава ОТ4-1 при температуре 800°C.

В таблице 5.2 представлены значения ошибки S (формула 3.2) для различных исследованных температурно-скоростных условий деформирования образцов при применении уравнения Хензеля - Шпиттеля с 5-ю коэффициентами (формула 2.3). В среднем, ошибка S в диапазоне температур 20-400°C не превышает 7,47 %; в диапазоне температур 600-800°C - 36,13 % [74].

Таблица 5.2 - Значения средней абсолютной ошибки S (в %) для модели материала, основанной на формуле (2.3) [74]

Значение температуры, °C	Значение скорости деформации, с ⁻¹			Коэффициент детерминации R^2
	0,001	0,01	0,4	
20	6,2	7,5	7,3	0,802
400	8,1	7,4	8,3	0,901
600	13,4	44,6	39,1	0,463
800	45,7	25,2	48,8	65,348

Из рисунка 5.3 видно, что при температурах 20°C и 400°C модель материала, основанная на формуле (2.3), позволяет получить результаты сопоставимые по точности с результатами расчетов по модели с 9-ю коэффициентами. При температурах 600°C и 800°C наблюдается существенное ухудшение качества расчета значения напряжения текучести. Модель,

основанная на формуле (2.3), не позволяет предсказать значение напряжения текучести [74].

Сравнение кривых текучести построенных по результатам расчетов напряжения текучести по формулам (2.2) и (2.3), с учетом значений коэффициентов (см. таблицы 3.1 и 3.2), представлено на рисунке 5.4.

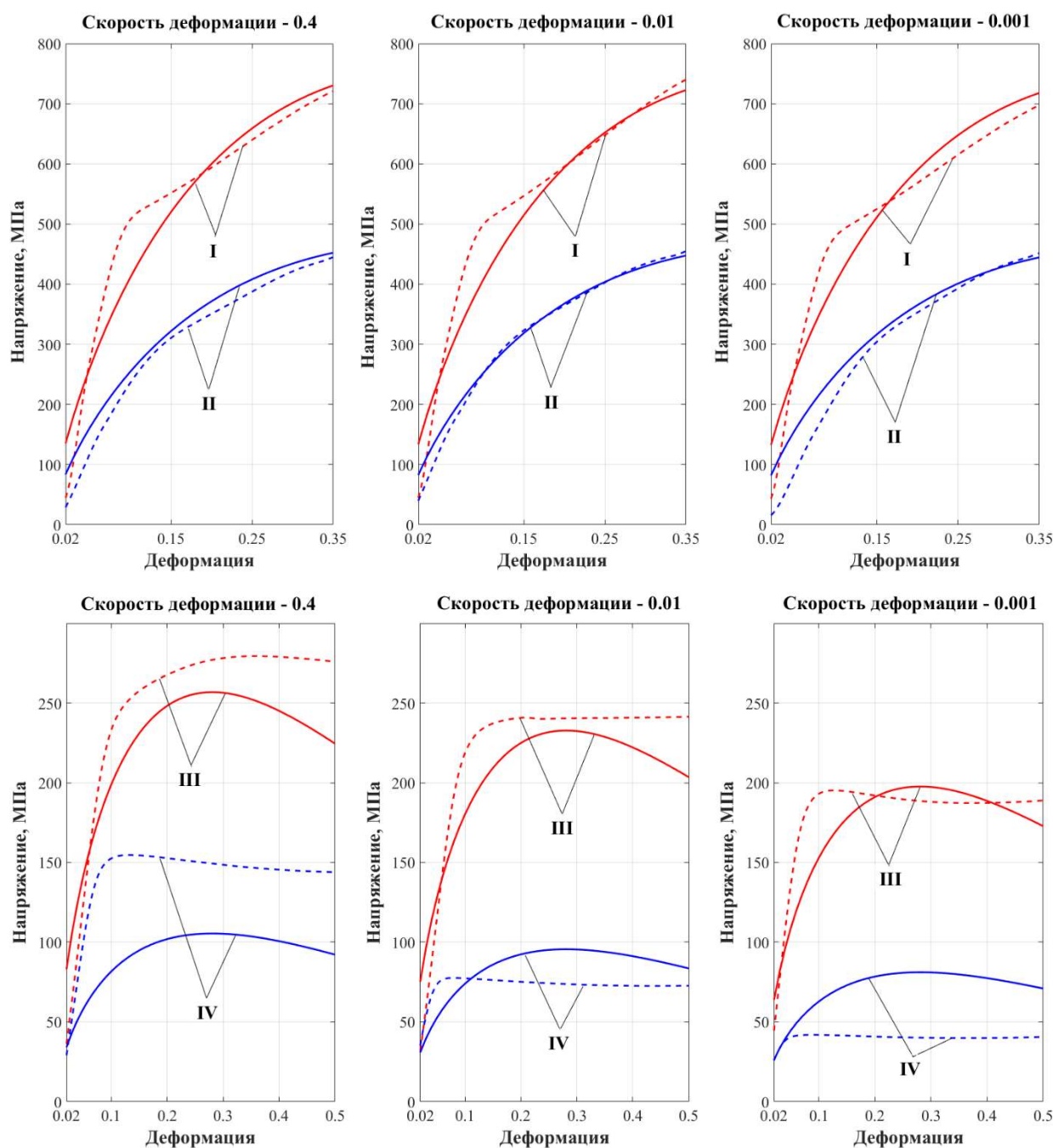


Рисунок 5.3 - Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов по формуле 2.3 с различными скоростями деформации при различных температурах [16]:

I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C градусов

(- - - данные эксперимента; — расчетная кривая)

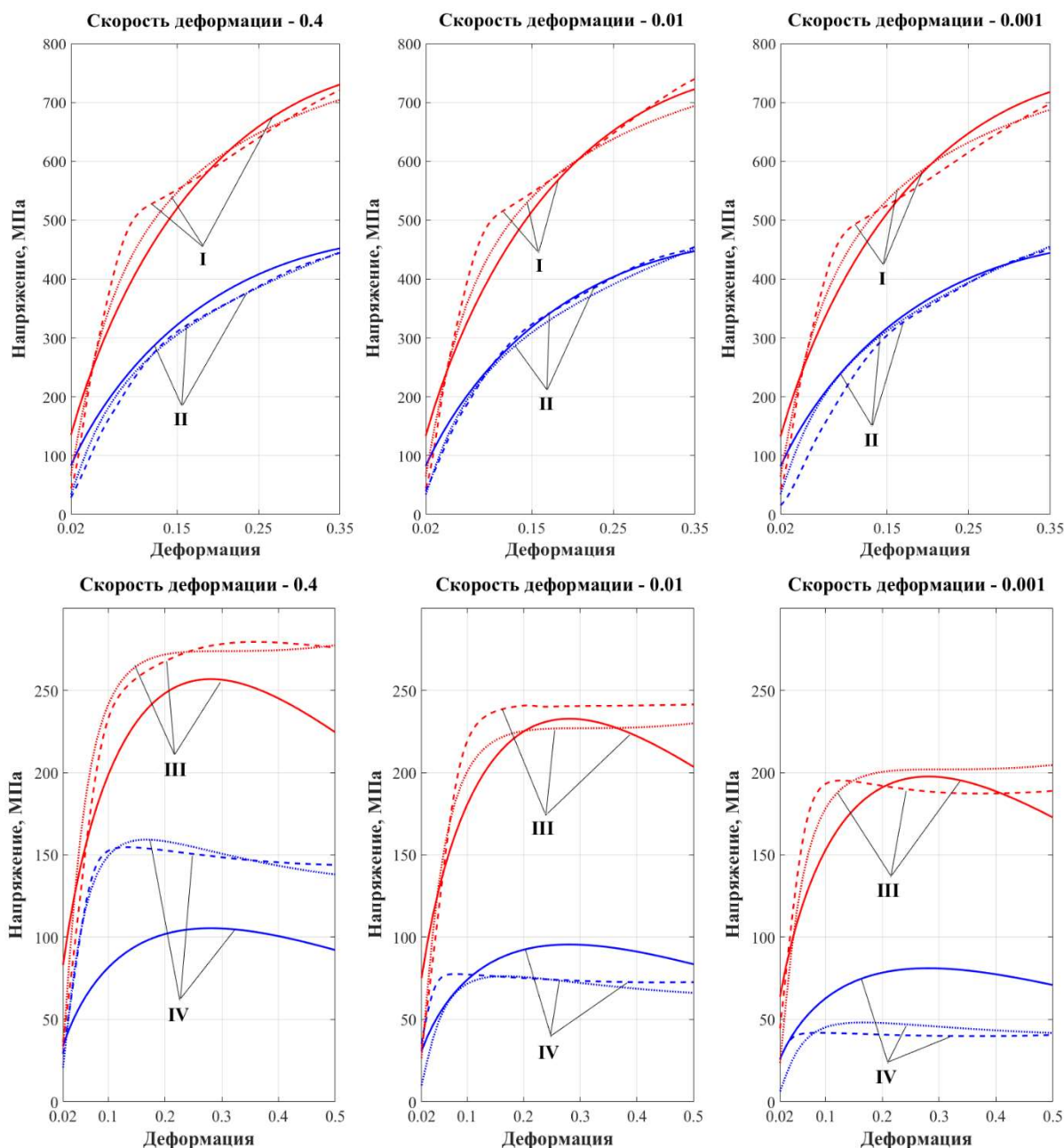


Рисунок 5.4 - Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов по формулам 2.2 и 2.3 с различными скоростями деформации при различных температурах [16]:

I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C градусов

(--- данные эксперимента; ···· расчетная кривая (формула 2.2); — расчетная кривая (формула 2.3))

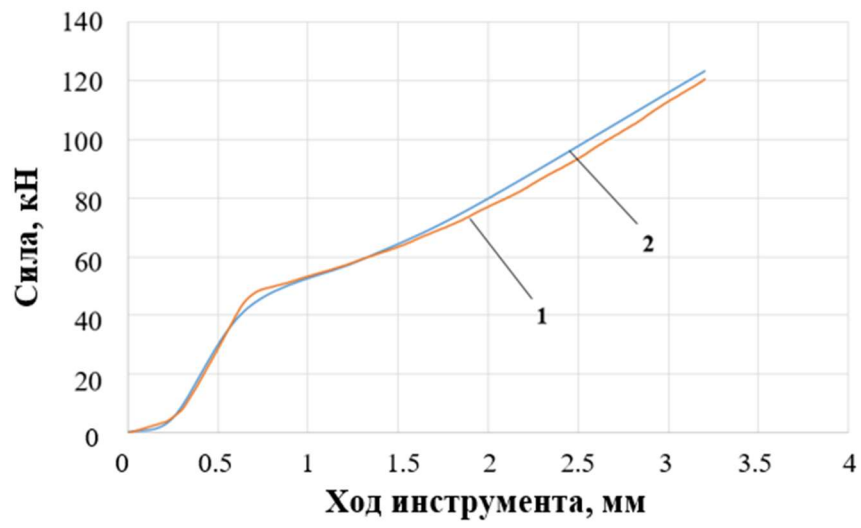
В области температур 20-400°C формулы (2.2) и (2.3) позволяют получить результаты не сильно отличающиеся друг от друга; точность расчета напряжения

текучности составляет 0,8-0,9 (см. таблицы 5.1 и 5.2). С ростом температуры испытания (см. рисунок 5.4), точность предсказания напряжения текучности ухудшается для модели, основанной на формуле (2.3), вплоть до того, что модель не может описать распределение экспериментальных данных (температура 800°C, см. рисунок 5.4). Еще одна особенность модели, основанной на формуле (2.3) – при температуре 600°C модель материала, основанная на формуле (2.3) демонстрирует ярко выраженную нелинейность с увеличением деформации, что не соответствует результатам натурального эксперимента (см. рисунок 5.4) [74].

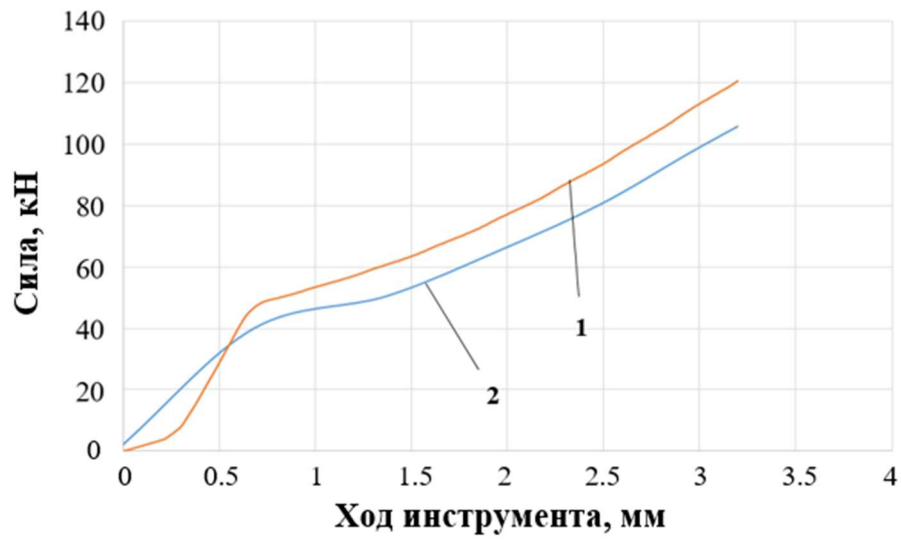
Таким образом, при моделировании процессов холодного и полугорячего формообразования заготовок из сплава ОТ4-1 в равной степени возможно применение математических моделей напряжений текучности, описываемых как формулой (2.2), так и формулой (2.3). При деформировании сплава ОТ4-1 при температурах 600°C и 800 °C характер кривых текучности кардинально меняется, что связано, по всей видимости, со структурными изменениями материала. Аппроксимация экспериментальных данных моделью, основанной на формуле (2.3), приводит к ошибке до 48,8 %, что свидетельствует о её непригодности для описания поведения сплава ОТ4-1 в диапазоне температур 600-800°C. Применение модели с 9-ю коэффициентами, основанной на формуле (2.2), позволяет повысить точность аппроксимации экспериментальных данных (ошибка уменьшается до 8,5 % и менее). Следовательно, при моделировании процессов горячей пластической деформации сплава ОТ4-1 расчет напряжения текучности должен выполняться с применением формулы (2.2). Тогда, математическая модель напряжения текучности сплава ОТ4-1 может быть представлена в виде (формула 5.1) [74]:

$$\sigma_i = \begin{cases} \text{формула (2.2) или формула (2.3), при } T \in [20; 400] \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{формула (2.2), при } T \in [600; 800] \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5.1)$$

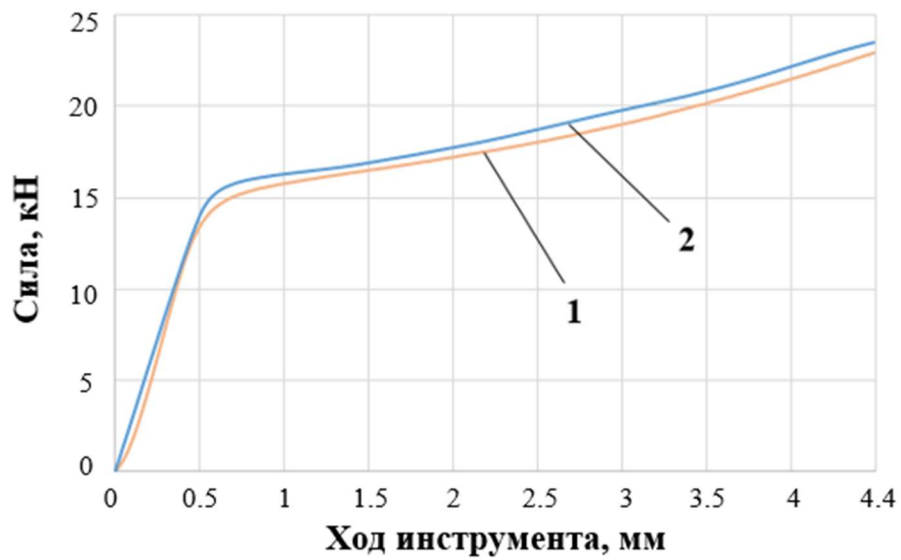
На рисунках 5.5 - 5.7, в качестве примера верификации, представлены результаты виртуального и натурального экспериментов при температурах 20°C и 800°C. В представленном примере модель с 9-ю коэффициентами обеспечивает более высокую точность расчета силы деформирования.



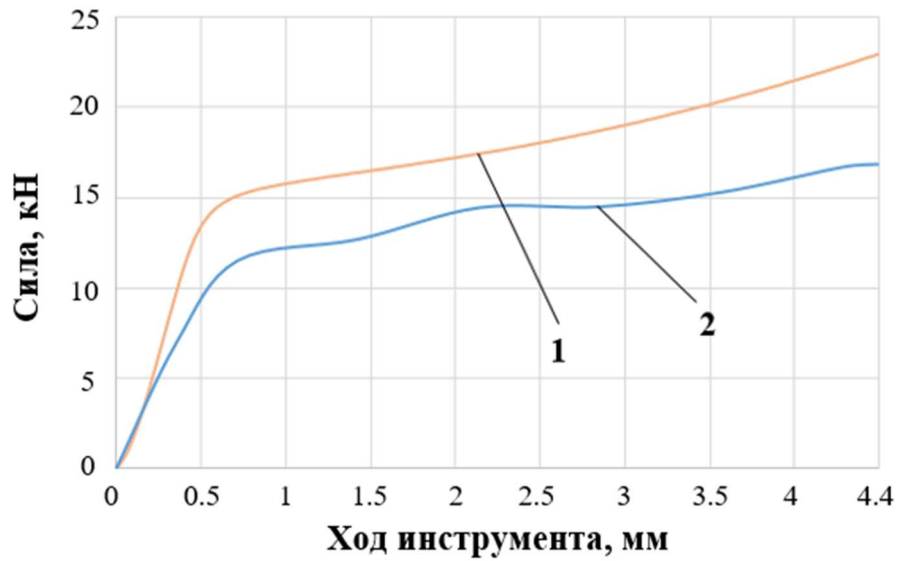
(a)



(б)



(в)

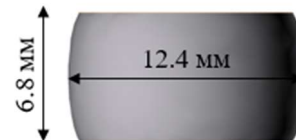


(г)

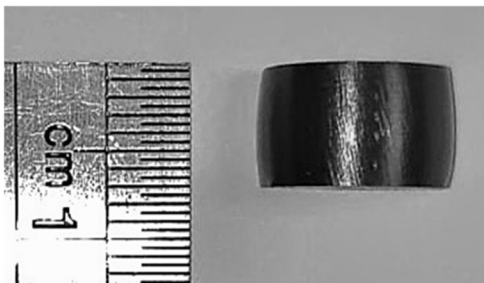
Рисунок 5.5 - Сравнение графиков «сила деформирования - ход инструмента» при моделировании сжатия образцов сплава ОТ4-1 при температуре 20°C (а, б) и 800°C (в, г) с применением модели материала: (а), (в) - формула (2.2); (б), (г) - формула (2.3); 1 - данные эксперимента; 2 - расчетные данные



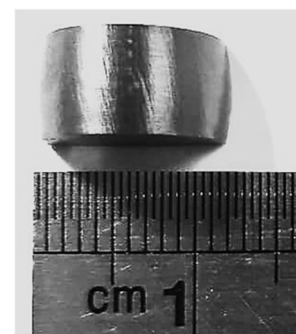
(а)



(б)



(в)

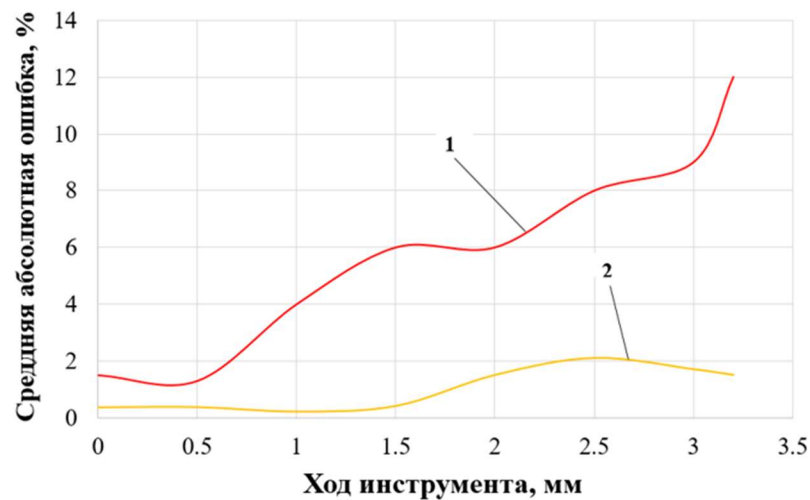


(г)

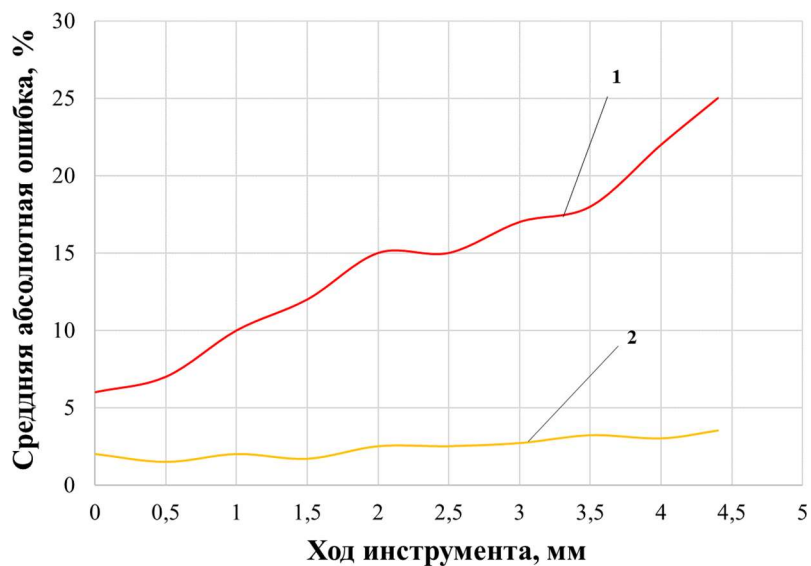
Рисунок 5.6 - Форма образующей при сжатии цилиндрического образца при температуре 20°C: (а) модель материала - формула (2.2); (б) модель материала - формула (2.3); (в и г) форма натурального образца после его сжатия

Форма боковой поверхности образца после его сжатия в виртуальном эксперименте достаточно точно соответствует геометрическим параметрам натурального образца, что может свидетельствовать, в сочетании с критерием (3.3), об адекватности модели материала, определяемой на основе формулой (2.2).

Сравнение значений силы деформации при сжатии заготовки из сплава ОТ4-1 при температурах 20°C и 800°C (см. рисунок 5.7) показало, что использование модели материала, основанной на формуле (2.2), обеспечивает погрешность расчета, не превышающую 2,5% (при 20°C) и 5,0% (при 800°C) [74]. Это отвечает критерию точности, установленную в формуле (3.3).



(а)



(б)

Рисунок 5.7 - Величина средней абсолютной ошибки δ силы сжатия образца при температуре 20°C (а) и 800°C (б):

1 - модель – формула (2.3) с 5-ю коэффициентами; 2 - модель – формула (2.2) с 9-ю коэффициентами

Из таблицы 4.1 видно, что наибольшее влияние на изменение микроструктуры оказывает температура. Деформация на величину $\varepsilon = 0.342 - 0.386$ при комнатной температуре со скоростями = 0.001, 0.01 и 0.4 формирует практически одинаковую несколько измельченную микроструктуру, характеризующуюся удлиненными зёрнами. В результате зависимости напряжения от деформации для различных скоростей практически совпадают. Аналогичная картина наблюдается при осадке образцов с нагревом заготовок до 400°C. Изотермическая осадка при температуре 600°C приводит к существенным изменениям структуры. На границе зёрен выделяются частицы диаметром 1–2 мкм, количество которых увеличивается со снижением скорости. Это облегчает протекание деформации, что отражается на характере кривой «напряжение - деформация». При температуре образцов 800°C начинают протекать процессы, связанные с рекристаллизацией и напряжение течения резко падает, причем возрастает роль скорости деформации. Сочетание осевой деформации с кручением позволяет существенно снизить нагрузку на инструмент и повышает однородность ультрамелкозернистой структуры. Выбор температурно-скоростного режима деформирования обеспечивает благоприятные условия для формоизменения исследуемого материала (таблица 4.1, образцы 10, 11, 12) [16].

В области температур 600–800°C преимущественное влияние на формирование микроструктуры оказывает скорость деформации (таблица 4.1, образцы 7 - 12). Выбор оптимального режима изотермического деформирования заготовки при осадке с кручением упрощает управление технологией получения заготовок с ультрамелкозернистой структурой. Например, при осадке образцов с деформацией около $\varepsilon = 0.5$ при температуре 600°C уменьшение скорости деформации на два порядка (с 0.4 до 0.001 с⁻¹) снижает напряжение текучести на 37%, а при температуре 800°C – уже на 215% [16].

5.2. Обработка процесса осадка с кручением титанового сплава

Несмотря на разогрев заготовок на контактных поверхностях, согласно результатам моделирования программой QForm 10.1.5 до 400 – 500 °С (рисунок 3.11), в процессе деформации произошло разрушение заготовок (рисунок 4.1) при холодной температуре [16].

Видно из рисунков 3.12 и 4.2, что при применении найденной реологической модели титанового сплава OT4-1 в программе QForm были получен результат моделирования, который совпадает с результатом испытания.

Титановый сплав OT4-1 относится к группе сплавов повышенной пластичности, однако при комнатной температуре она редко превышает 20%. Как видно из графика зависимости относительного удлинения образцов из сплава OT4-1, полученного анализом литературных и собственных данных (рисунок 5.8), пластичность материала начинает резко увеличиваться при 600 и выше градусах. Поэтому пакет из двух исходных заготовок предварительно нагревали в печи до 650°С с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп, подогретый до температуры 300°С.

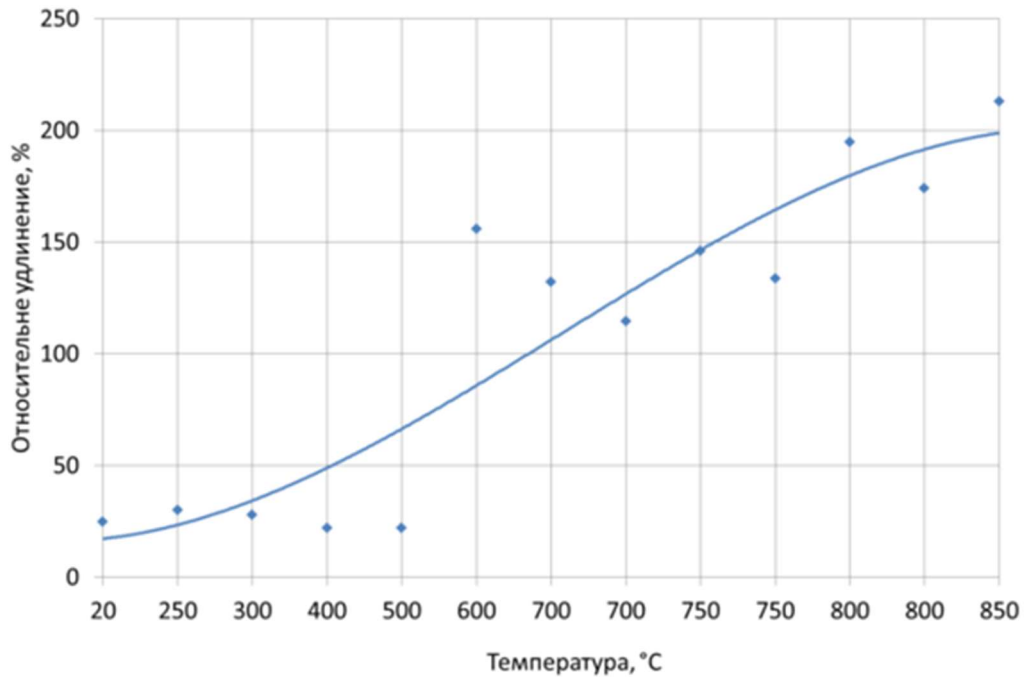


Рисунок 5.8 - Зависимость относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры

Если исходная заготовка имела равноосные α -зерна размером 10-15 мкм, то, как видно на рисунке 4.4 в зоне контакта наблюдается интенсивное измельчение зерен и структура представляет собой механическую смесь, вблизи зоны контакта микроструктура начинает укрупняться и постепенно переходит в структуру основного материала.

Металлографическое исследование зоны соединения на электронном микроскопе указывает на отсутствие различия микроструктуры вблизи зоны контакта и в зоне соединения, что подтверждает его высокое качество (рисунок 4.5).

Изучение влияние осадки с кручением на изменение микротвердости показало ее незначительное отличие по высоте образца. Однако следует отметить незначительное повышение ее значений у поверхности и в центральной зоне (рисунок 5.9). В периферийной зоне различие в микротвердости во Виккерсу составляет от 5 до 10 единиц, что также подтверждает качество соединения.

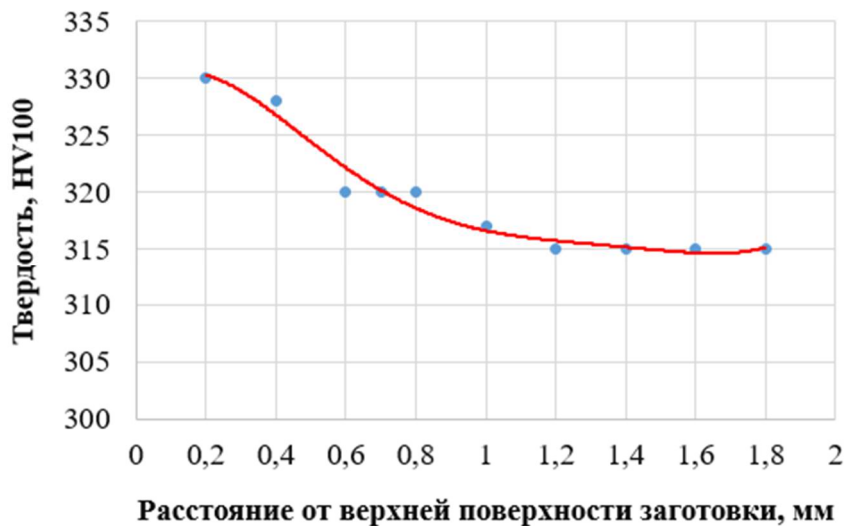


Рисунок 5.9 - Распределение микротвердости по толщине гибридного образца в центральной зоне

5.3. Отработка процесса осадка с кручением алюминиевых сплавов

Как следует из приведенных данных, осадка с кручением сплавов обеспечивает, за исключением краев заготовок, плотный контакт, а моделирование программой QForm с применением найденных реологических моделей достаточно точное прогнозирование геометрических параметров заготовок в процессе формообразования (см. рисунок 3.13).

Качество соединения заготовок, полученных осадкой с кручением, можно оценить по микроструктуре, приведенной на рисунках 4.8 - 4.11. Зону контакта заготовок удастся обнаружить только после травления, что говорит о высоком качестве их соединения. Микротвердость на поверхности и вблизи границы соединения заготовок составляет $HV_{0,1} = 73$ для сплава АМг2 и $HV_{0,1} = 112$ для сплава АМг6.

В процессе осадки происходит неравномерный нагрев заготовки, причем максимальная температура по результатам моделирования не превышает 230°C .

Результаты испытаний и исследования показаны, что осадка с кручением пакета из двух заготовок из изучаемых алюминиевых сплавов диаметром и высотой 40 и 10 мм соответственно каждая со скоростью вращения 12 об/мин и осевой силой 1,6 МН обеспечивает высокое качество соединения, что подтверждено выполненными металлографическими исследованиями.

5.4. Отработка процесса осадка с кручением медного сплава

Как видно из рисунка 4.12 граница соединения заготовки А и Б (см. рисунок 2.8) визуально практически не виден и обнаруживается только после травления, что говорит о его высоком качестве. После осадки твердость на поверхности и вблизи границы соединения заготовок различий не имеет и составляет $HV_{0,1} = 112-121$.

Моделирование позволило установить, что максимальная сила составляет 1,55 МН, которая не превышает возможностей применяемого оборудования, температура в зоне контакта не превышает 100°C , а интенсивность напряжений в зоне контакта образцов достигает 260 МПа. Высокие контактные напряжения в сочетании с повышенными температурами должны способствовать протеканию диффузионных процессов и обеспечить надежное соединение заготовок (рисунок 3.14).

После термической обработки образцов в результате рекристаллизации полностью исчезли следы границ соединения исходных заготовок за исключением мелких пор (рисунок 4.13), что говорит о необходимости тщательной очистки соединяемых поверхностей. Рекристаллизация приводит к образованию новых зерен размером около 12 – 25 мкм и граница соединяемых заготовок практически исчезает. Результаты изучения микроструктуры позволяют сделать вывод о том, что применение осадки с кручением для формирования гибридной заготовки позволяет избежать нагрева соединяемых материалов в области стыка до температуры плавления и это предотвращает

неоднородность свойств гибридной заготовки и обеспечивает практически 100% контакт соединяемых заготовок [78].

5.5. Отработка процесса осадка с кручением разнородных сплавов

Как видно из рисунков 4.15 и 4.16 данный метод изготовления позволяет получать заготовки с равномерным покрытием поверхности заготовки из титанового сплава ОТ4-1 слоем медного сплава БрХ0,8.

Результаты исследования микроструктуры в сечении полуфабриката (рисунки 4.17 и 4.18) показывают хорошее качество соединения двух составных заготовок. Область их контакта просматривается только после травления, что говорит о их высоком качестве диффузионного слияния. Размер зерен составляет $\approx 30 - 50$ мкм. Из результата замера видно, что микротвердость в переходной зоне составляет 390-400 HV_{0,1} (точки 3 и 4 в таблице 4.2), в других местах она в интервале 240-260 HV_{0,1}.

Результаты количественного микроанализа в зоне контакта образцов (рисунок 4.19 и таблица 4.3) показывают, что в зоне контакта отсутствуют пустоты, а в переходной зоне образуются металлические фазы TiCu₂, Ti₂Cu и TiCu₄, которые обеспечивают надежное соединение металлов. Таким образом разработанный процесс может быть применен для производства изделий типа «кронштейн».

С применением метода осадки с кручением были получены гибридные заготовки из двух разнородных материалов (титановый сплав ОТ4-1 и алюминиевый сплав АМг6) (рисунок 5.10) [101] и заготовки с тремя слоями из двух разнородных материалов (медный сплав БрХ0,8 и алюминиевый сплав АМг2) (рисунок 5.11). Методика изготовления данных заготовок представлена в приложении Г.

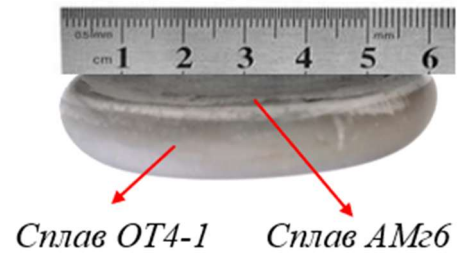
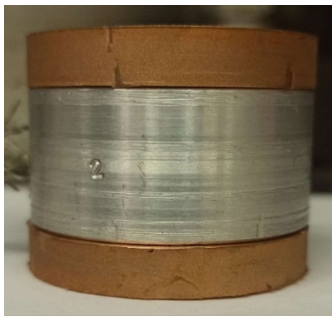


Рисунок 5.10 - Гибридная заготовка из сплавов АМгб – ОТ4-1



(а)



(б)



(в)

Рисунок 5.11 - Гибридная заготовка из сплавов БрХ0,8 – АМг2 – БрХ0,8

а - до осадки с кручением, б - после осадки с кручением

С применением метода осадки с кручением успешно получена гибридная заготовка из латуни Л63 и алюминиевого сплава АД1, пригодная для формообразования полуфабриката типа «колпачок» (рисунок 5.12).



Рисунок 5.12 - Полуфабрикат типа «колпачок»

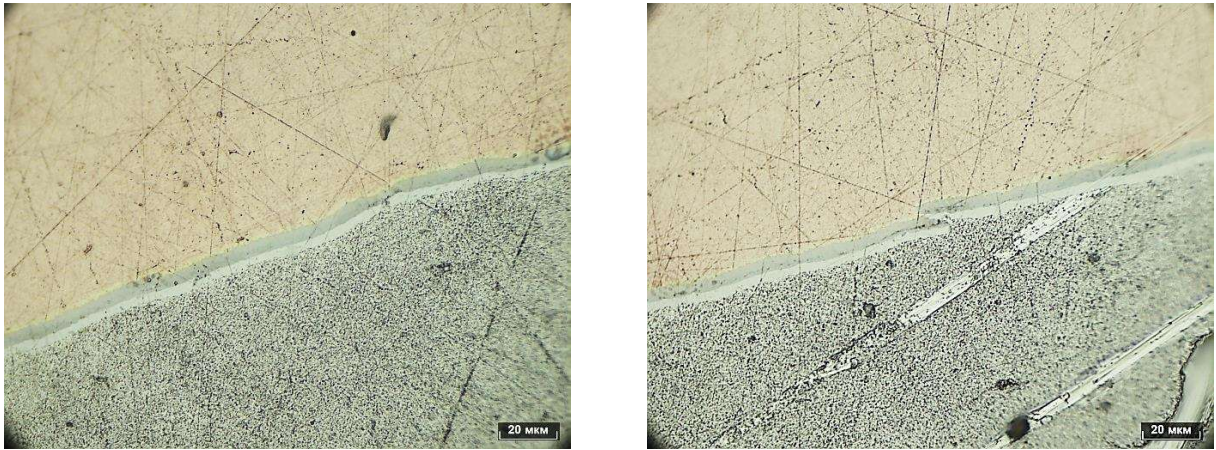


Рисунок 5.13 - Микроструктура заготовка до травления (x1000)

Полученные вытяжкой заготовки разрезались электроэрозионным методом и исследовались в плоскости разрезки на бинокулярном микроскопе (рисунок 5.13). Видно, что до травления заготовка имеет высокое качество соединения.

5.6. Анализ результатов определения зависимости с учетом скольжения металла по поверхности при осадке с кручением

Моделирование осадки шайбы с аналогичными размерами и из медного сплава БрХ08 с применением найденной реологической модели с различными факторами трения до получения заготовки с экспериментально найденными размерами позволило установить, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных имеет место при факторе трения равным 0,61. Как видно из графиков моделирование с фиксированным фактором трения m показывает на 10-15% более высокие значения силы (см. рисунок 5.14).

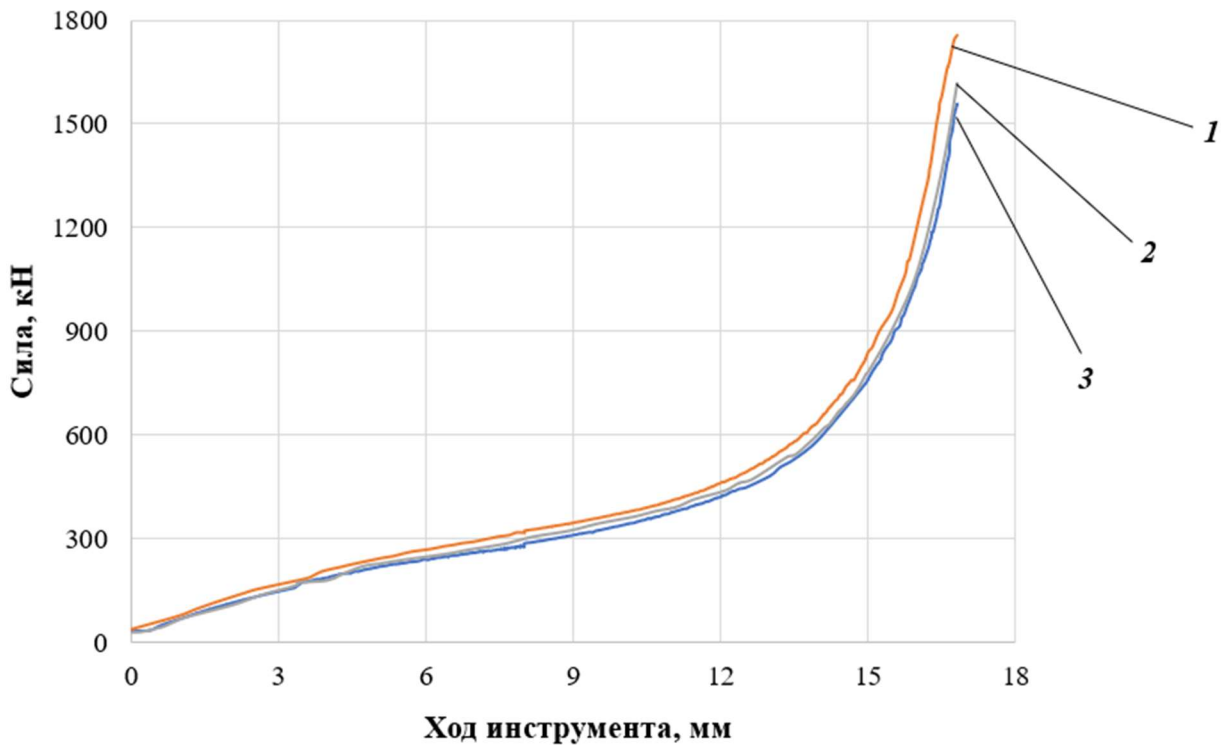


Рисунок 5.14 - График сравнения результатов эксперимента и моделирования зависимости «сила - ход инструмента» при осадке с кручением гибридной заготовки из сплава БрХ0,8

(1 - без применения подпрограммы, 2 - данные эксперимента,

3 - с применением подпрограммы при факторе трения $m = 0,61$ и $C = 40$)

Анализ полученных данных позволил получить зависимость, отражающую влияние скорости скольжения на контактное трение. Сравнительный анализ результатов моделирования осадки с кручением с назначением постоянного фактора трения равным 0,61 и с дополнительным использованием подпрограммы «*friction.sliding_velocity*» с фактором трения равными $m = 0,61$ и параметром влияния скорости проскальзывания $C = 40$ показал, что учет зависимости влияния скорости проскальзывания на контактное трение дает более точные результаты моделирования как по зависимости «сила – ход инструмента», так и по геометрическому подобию заготовок [102], получаемых моделированием и экспериментами (рисунок 5.14), что подтверждается макрошлифом, приведенным на рисунок 5.15.

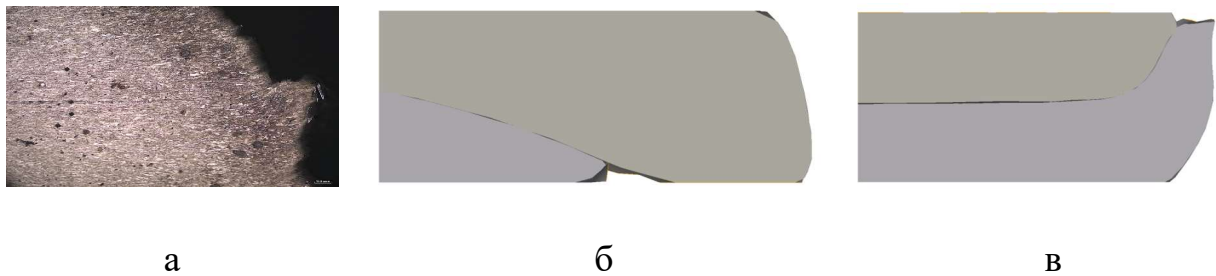


Рисунок 5.15 - Сравнение результатов процесса осадки пакета из двух заготовок из сплава БрХ0,8 (а - эксперимент, б - моделирование с постоянным фактором трения, в – моделирование с применением подпрограммы

С учетом найденных нами данных зависимость, отражающая влияние скорости скольжения на контактное трение, имеет вид:

$$\tau_R = 0.61 \cdot k \cdot \left(1 - e^{\frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s}}\right) \cdot e^{-0.5 \left(\frac{v_{rel}}{40}\right)^2} \quad (5.2)$$

Выводы по главе 5

1. Показано, что использование реологических моделей Хензеля-Шпиттеля с 9 и 5 коэффициентами для титанового сплава ОТ4-1 обеспечивает высокую степень соответствия с экспериментальными данными. Эти модели были получены путем сжатия цилиндрических образцов при различных скоростях деформации (0.4, 0.01, 0.001 с⁻¹) в изотермических условиях в температурном диапазоне от 20 до 400°С. Такое совпадение подтверждает целесообразности функциональной зависимости Хензеля-Шпиттеля с 5 коэффициентами для моделирования процессов холодной и горячей штамповки заготовок из сплава ОТ4-1. Для моделирования процессов полугорячей и горячей штамповки из титанового сплава ОТ4-1 в температурном интервале 600-800°С вследствие значительного влияния фазовых превращений необходимо применять реологическую модель Хензеля – Шпиттеля с 9 коэффициентами.

Определены реологические свойства алюминиевых сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6 и БрХ0,8 методом осадки цилиндрических образцов со скоростями деформации со скоростями деформации 10^{-3} , 10^{-2} , $4 \cdot 10^{-1}$ с различными температурами, позволяющие повысить точность конечно-элементного моделирования процессов формообразования заготовок.

2. Показано, что использование горячего формоизменения позволяет существенно расширить область применения процесса осадки с кручением за счет применения ее для пластической обработки труднодеформируемых материалов. Кроме того, применение найденной зависимости относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры позволило определить температурный режим нагрева заготовок и инструмента и получить гибридные заготовки из титанового сплава ОТ4-1 с хорошим качеством соединения, подтвержденное исследованием микроструктуры в меридиональном сечении образца.

3. Установлено, что осадка с кручением алюминиевых заготовок из сплавов АМг2, АМг6 с приведенными выше режимами превращает зернистую структуру сплава в микрокристаллическую механическую смесь, что способствует повышению прочностных и пластических характеристик.

4. Доказано, что применение осадки с кручением для формирования гибридной заготовки БрХ0,8 позволяет избежать нагрев соединяемых материалов в области стыка до температуры плавления, предотвращая неоднородность свойств гибридной заготовки, что подтверждается проведенными металлографическими исследованиями и изучением микротвердости.

5. Показано, что применение метода осадки с кручением с последующей горячей штамповкой позволяет получить гибридную заготовку из двух различных материалов (титановый сплав ОТ4-1 и медный сплав БрХ0,8). Из результата исследования микроструктуры видно, что заготовка имеет высокое качество соединения. Исследования микроструктуры и микротвердости

полученного полуфабриката позволило установить образование в переходной зоне металлических фаз $TiCu_2$, Ti_2Cu и $TiCu_4$, которые обеспечивают надежное соединение металлов. Метод осадки с кручением позволяет получить гибридные заготовки из титанового сплава ОТ4-1 и алюминиевого сплава АМг6, а также из алюминиевого сплава АМг2 и медный сплав БрХ0,8 с тремя слоями с высоким качеством соединения. Установлено, что процесс изготовления исходной заготовки методом осадки с кручением 2 разнородных материалов (латунь Л63 и алюминий АД1) с последующей холодной вытяжкой в штампе позволяет получать полуфабрикат типа «колпачок» с высоким качеством соединения, подтвержденным изучением микроструктуры.

6. Выявлено, что моделирование процесса осадки пакета заготовок с кручением с использованием метода конечных элементов, реализуемого программой QForm 10.1.5 и с применением найденных реологических свойств и подпрограммы «*friction.sliding_velocity*», включенной в пакет QForm, показало хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Получено, что при холодной осадке заготовок из медного сплава БрХ0,8 фактор трения m равен 0,61. Сравнительный анализ силовых параметров процесса и геометрической формы получаемых заготовок позволил определить коэффициенты m и C для конечно-элементного моделирования с применением программы QForm осадки с кручением, которые составили 0,61 и 40, соответственно. Выполненные теоретические и экспериментальные работы позволили получить зависимость, отражающую влияние скорости скольжения на контактное трение

$$\tau_R = m \cdot k \cdot \left(1 - e^{\frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s}}\right) \cdot e^{-0.5 \left(\frac{v_{rel}}{C}\right)^2}$$

позволяющую существенно повысить точность результатов моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом обосновании возможности изготовления гибридных заготовок из цветных металлов методом осадки с кручением, расширяющая область применения метода и позволяющая расширить применяемость и снижать массу осесимметричных изделий, решение которой имеет существенное значение в области машиностроения. В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. Впервые на основе установления взаимосвязей напряжений текучести и скорости деформаций, величин деформаций и температуры титанового сплава ОТ4-1 с применением уравнения Хензеля-Шпиттеля с 9-ю и 5-ю коэффициентами и на основе анализа экспериментальных данных, полученных осадкой цилиндрических образцов в диапазоне температура 20-800°C и скорости деформации 0,001-0,4 с⁻¹, и использованием программы MATLAB определены коэффициенты реологических моделей. Доказано, что установленные коэффициенты обеспечивают высокую адекватность уравнения, оцениваемую значением коэффициента детерминации R^2 (от 0,82 до 0,95), что подтверждено моделированием процессов обработки металлов давлением с применением программы QForm. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по выбору реологической модели для компьютерного имитационного моделирования процессов формообразования заготовок из титанового сплава ОТ4-1 с 9-ю или 5-ю коэффициентами в зависимости от термомеханических условий обработки.

2. Путем теоретического анализа влияния скорости скольжения металла на контактное трение, экспериментальных работ по осадке с кручением и определению фактора трения методом осадки кольцевых образцов из медного сплава БрХ0,8 с последующей математической обработкой и применением программы QForm совместно с компанией «Кваторформ» была создана

подпрограмма "*friction.sliding_velocity*". На основе установленной зависимости с 2 параметрами - фактором трения и коэффициентом, отражающим скорости скольжения, доказано, что использование данной подпрограммы при моделировании процесса осадки заготовок из медного сплава БрХ0,8 с кручением с применением программы QForm позволяет повысить точность расчетов из данного материала на 10-15%.

3. Проведено экспериментальное исследование микроструктур, позволившее сделать выводы о влиянии температурно-скоростных режимов деформации на структуру материалов в процессе формообразования гибридных заготовок из цветных сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8, что дало возможность разработать методику получения высококачественных гибридных заготовок методом осадки с кручением. Изучение микроструктур и микротвердости в зоне контакта гибридных заготовок подтвердило высокое качество их соединения. Выявлено влияние температурно-скоростных режимов деформации на структуру и микротвердость материалов в процессе формообразования гибридных заготовок из цветных сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8. Показано, что с увеличением скорости деформации размер зерен данных материалов уменьшается. Влияние скорости деформации на изменение структуры и особенно заметно при температуре свыше 600°C для сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8, а для алюминиевых сплавов АМг2 и АМг6, это заметно только при повышенных температурах (400 и 450°C). Оценка качества соединения заготовок из алюминиевых сплавов АМг2, АМг6, полученных осадкой с кручением по микроструктуре показала, что зону контакта заготовок удастся обнаружить только после травления и это является подтверждением высокого качества их соединения. Полученные данные легли в основу методики получения высококачественных гибридных заготовок методом осадки с кручением.

4. Впервые получены гибридные заготовки из однородных и разнородных материалов осадкой с кручением, что открывает новые перспективные направления в машиностроительных отраслях. На основе результатов исследований, была успешно создана технологическая схема обработки для

получения гибридных заготовок из титанового, алюминиевого и медного сплавов методом осадка с кручением, обеспечивающая изготовление высококачественных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhong, M. Time-varying effects of international nonferrous metal price shocks on China's industrial economy / M. Zhong, R. He, J. Chen, J. Huang // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. - vol. 528. - no. C. - 2019.

2. Shao, Y. Productivity growth and environmental efficiency of the nonferrous metals industry: an empirical study of China / Y. Shao, S. Wang // *Journal of Cleaner Production*. - vol. 137. - pp. 1663-1671. - 2016.

3. Lin, B. How technological progress affects input substitution and energy efficiency in China: a case of the non-ferrous metals industry / B. Lin, X. Chen // *Energy*. - vol. 206. - 2020.

4. Liu, D. Gold price forecasting and related influence factors analysis based on random forest / D. Liu, Z. Li // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. - vol. 502. - pp. 711-723. - 2017.

5. Jiang, P. A combined forecasting system based on statistical method, artificial neural networks, and deep learning methods for shortterm wind speed forecasting / P. Jiang, Z. Liu, X. Niu, L. Zhang // *Energy*. - vol. 217. - 2020.

6. Chen, Y. A novel grey wave forecasting method for predicting metal prices / Y. Chen, K. He, C. Zhang // *Resources Policy*. - vol. 49. - pp. 323-331. - 2016.

7. Marsha, A. T. M. Utilization of metallurgical wastes as raw materials for manufacturing alkali-activated cements / A.T.M. Marsha, T. Yangab, S. Adu-Amankwaha, S.A. Bernala. // *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials*. - pp. 335-383. - 2021.

8. El Khalloufi, M.; Drevelle, O.; Soucy, G. Titanium: An Overview of Resources and Production Methods / M. El Khalloufi, O. Drevelle, G. Soucy // *Minerals*. - vol. 11. - no. 12. - 2021.

9. Sibum, H. Titanium and titanium alloys - From raw material to semi-finished products / H. Sibum // *Advanced Engineering Materials*. - vol. 5. - p. 393-398. - 2003.

10. Leyens, C. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications / C. Leyens, M. Peters. - Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. - 2003.
11. Mutava, T. Characterisation of a Titanium Precursor Salt and Study of Some of the Treatment Steps Used for the Extraction Process. Ph.D. Thesis, Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2009.
12. Cui, C. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development / C. Cui, B. Hu, L. Zhao and S. Liu. // *Materials & Design*, vol. 32, p. 1684–1691, 2011.
13. Jackson, M. A review of advances in processing and metallurgy of titanium alloys / M. Jackson, K. Dring // *Materials Science and Technology*. - vol. 22. - no. 8. - p. 881–887. - 2006.
14. Kermeli, K. Energy efficiency improvement and GHG abatement in the global production of primary aluminium / K. Kermeli, PH. ter Weer, W. Crijns-Graus, et al. // *Energy Efficiency*. - vol. 8. - p. 629–666. - 2015.
15. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. - 2014. - p. 137.
16. **Нгуен, Х. Т.** Управление процессами формообразования заготовок из титановых сплавов (на примере сплава от4-1) с использованием моделирования реологии и режимов деформирования / П. А. Петров, **Х. Т. Нгуен**, И. А. Бурлаков, Р. Ю. Сухоруков // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2021. – № 6. – С. 88-95. – DOI 10.31857/S0235711921060134. – EDN RDSVXV.
17. Тихомиров, А. В. Особенности формирования структуры и свойства сплавов системы Al-Mg, механически легированных карбидом кремния / А. В. Тихомиров, А. А. Аксенов, С. Д. Калошкин, Е. В. Шелехов // *Материаловедение*. – 2006. – № 11. – С. 5-12. – EDN KNXPGH.

18. Петров, П.А. Функциональная зависимость сопротивления деформации сплавов системы Al-Mg, учитывающая процентное содержание магния/ П. А. Петров, В. Н. Фам // *Технология легких сплавов*. – 2024. -№1.

19. Береговой, В. В. Разработка и исследование технологии изготовления листовой осесимметричной детали с учетом влияния условий деформации: диссертация магистра : 15.04.01 / Береговой Виталий Витальевич. - М.: 2020. -84 с.

20. **Нгуен, Х. Т.** Перспективы применения гибридных заготовок в машиностроении / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, **Х. Т. Нгуен** // *Технология металлов*. – 2021. – № 8. – С. 10-23. – DOI 10.31044/1684-2499- 2021-0-8-10-23.

21. Mori, K. Joining by plastic deformation / K. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, A. E. Tekkaya // *CIRP Annals*. - 2013. - 62(2). - 673–694. doi:10.1016/j.cirp.2013.05.004

22. Kalpakjian, S. *Manufacturing Engineering & Technology* / S. Kalpakjian, SR. Schmid. - 6th ed. Prentice Hall: 6th ed. - 2010. - 900–920.

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

24. 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). - 571-600.

25. Slobodyan, M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review, *Nuclear Engineering and Technology* / M. Slobodyan. - Volume 53. - Issue 4. - 2021. - Pages 1049-1078, ISSN 1738-5733. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>.

26. 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). - 170-198.

27. 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 6217–6256.

28. 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) 925– 935.

29. Hovanski, Y. Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks/ Y. Hovanski, P. Upadhyay et. al. // *JOM*. 2015. V. 67. No 5. The Minerals Materials and Design. 2010. No 31. P. 1365-1383. Metals & Materials Society.

30. He, X. A review of numerical analysis of friction stir welding / X. He, F. Gu, A. Ball // *Progress in Materials Science* 65 (2014) pp. 1–66.

31. Li, Q. Cross wedge rolling failure mechanisms and industrial application / Q. Li, M. Lovell // *Int J Adv Manuf Technol* 37(3–4) (2008): 265–278. doi: 10.1007/s00170-007-0979-y

32. Knust, J. Preform optimization for hot forging processes using an adaptive amount of flash based on the cross section shape complexity / J. Knust, M. Stonis, B. Behrens // *Prod. Eng. Res. Devel.* 10, 587–598 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11740-016-0702-7>

33. Pater, Z. Cross-Wedge Rolling / Z. Paner // *Comprehensive Materials Processing*, 211–279 (2014). doi:10.1016/b978-0-08-096532-1.00315-0

34. Blohm, T. Basic study of incremental forming of serially arranged hybrid parts using cross-wedge rolling / T. Blohm, J. Langner, M. Stonis, B. Behrens // *Procedia Engineering*. - Volume 207. - 2017. - Pages 1677-1682. - ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.921>.

35. Klusin, V. A. Development of Cross-Wedge Rolling / E. M. Makusok, V. J. Scukin // *Nauka i Technika: Minsk*. - 1980. in Russian.

36. Wang, M. T. Current Trends in Cross Wedge Rolling for Part Forming / M. T. Wang, X. T. Li.; F. S. Du // *ISIJ Int.* 2005. - 45. - pp. 1521–1525.
37. Dong, Y. Analysis of Interfacial Slip in Cross-Wedge Rolling: A Numerical and Phenomenological Investigation / Dong, Y.; Tagavi, K.; Lovell, M. // *J. Mater. Process. Technol.* - 2000.- 97.- pp. 44–53
38. Guerra, M. Flow patterns during friction stir welding / Guerra, M., Schmidt, C., McClure, L.C., Murr, L.E., Nunes, A.C. // *Materials characterization.* - 2003. - 49:95-101.
39. Liu, H.J. Tensile properties and fracture locations of frictionstir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy / H, J, Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi // *J. of Materials Processing Technology.* - 2003. - 142:692–696.
40. Rhodes, C.G. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum / C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel et. al. // *Scripta Materialia*, 1987, 36/1:69-75.
41. Buffa, G. Friction Stir Welding of Tailored Blanks: Investigation on Process Feasibility / G. Buffa, L. Fratini, J. Hua, R. Shivpuri // *CIRP Annals*, 2006, 55(1), 279–282. doi:10.1016/s0007-8506(07)60416-8
42. Coelho, R. S. Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels / R.S. Coelho; A. Kostka; J.F. dos Santos; A. Kaysser-Pyzalla // *Mechanical properties and their relation to microstructure*, 2012, 556(none), –. doi: 10.1016/j.msea.2012.06.076
43. Mishra, RS. Friction Stir Welding and Processing / R. Mishra, Z. Ma // *Materials Science and Engineering R Reports*, 2005, 50(1–2):1–78.
44. Nandan, R. Recent Advances in Friction Stir Welding / R. Nandan, T. Debroy, H. Bhadeshia // *Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science*, 2008, 53(6):980–1023.

45. Колубаев, Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием [Электронный ресурс] / Е. А. Колубаев // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 6. - Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2013/6/572.pdf>

46. Субич, В. Н. Штамповка с кручением: Монография / В.Н. Субич, В. А. Демин, Н. А. Шестаков, А. В. Власов. - М.: МГИУ, 2008. – 389 с.

47. Утяшев, Ф.З. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб. - Уфа: Гилем, НИК Башк. Энцикл, 2013. – 376 с.

48. Ву, Ч. Б. Совершенствование технологии изготовления осесимметричных тонкостенных изделий на основе применения метода интенсивной пластической деформации: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Ву Чонг Бач. - М., 2020. - 135 с.

49. Полосаткин, Г.Д. Уменьшение трения на торцах при сжатии цилиндрических образцов / Г. Д. Полосаткин // Заводская лаборатория. - 1957. - №7. - с. 849-851

50. 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.

51. 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.

52. Валиев, Р. Р. Способ интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением при ступенчатом нагреве заготовок / Р. Р. Валиев, К. М. Нестеров, И. Н. Сабиров, И. В. Смирнов, Р. З. Валиев // Патент на изобретение РФ RU 2586188.

53. McEwan, K. Pressure Welding of Dissimilar Metals / K. McEwan, D. Milner // *British Welding Journal*. - 1962 9:406–420.
54. Cave, J. The Mechanisms of Cold Pressure Welding by Rolling / J. Cave, J. Williams // *Journal Institute of Metals*. - 1973. - 101:203–207.
55. Bay, N. Mechanisms Producing Metallic Bonds in Cold Welding / N. Bay // *Welding Research Supplement*. - 1983. - 62:137s–142s.
56. Clemmensen, C. Cold Welding 3—Influence of Surface Preparation on Bond Strength / C. Clemmensen, O. Juelstorp, N. Bay // *Metal Construction*. - 1986. - 18:625–629.
57. 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) 925–935.
58. Shao, H. *Metall. Mater. Trans. B* / H. Shao, J. Gould, and C. Albright. - 2007, vol. 38B, 321–31.
59. Panda, S. K. Formability Analysis of Diode-Laser-Welded Tailored Blanks of Advanced High-Strength Steel Sheets / S.K. Panda, V.H. Baltazar Hernandez, M.L. Kuntz, And Y. Zhou // *Metall Mater Trans A* 40, 1955–1967 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9875-4>
60. Chung, K.H. Characterization of mechanical properties by indentation tests and FE analysis-validation by application to a weld zone of DP590 steel / K. H. Chung et. al. // *International Journal of Solids and Structures*, Volume 46, Issue 2, 15 January 2009, Pages 344-363
61. Загиров, Н.Н. Теория обработки металлов давлением: Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы [Текст] / сост. Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с.
62. ГОСТ 19807-91 от 01.07.1992. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. [дата обращения 14.01.2022]. Доступно по ссылке:

https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/cataloginter?portal:componentId=26cba537-adcd-44ed-9a44-72c63a7c7bc2&portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigationalstate=JBPNS_rO0ABXc6AAZhY3Rpb24AAAABABBjb25jcmV0ZURvY3VtZW50AAZkb2NfaWQAAAABAUAzNDUxMgAHX19FT0ZfXw**

63. Фам, В. Н. Совершенствование технологии изготовления полых осесимметричных изделий с фланцем методом комбинированного выдавливания в изотермических условиях: дис. ... канд. техн. наук : 2.6.4 / Фам Ван Нгюк. - М., 2023. -192 с.

64. ТУ 48–21–588–87 от 01.05.1987. Листы из жаропрочных медных сплавов. [дата обращения 26.02.2022]. Доступно по ссылке: <https://kmd-m.ru/%D0%A2%D0%A3%2048-21-588-87.pdf>

65. **Нгуен, Х. Т.** Получение гибридных заготовок из титанового сплава ОТ4-1 горячей осадкой с кручением / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, **Х. Т. Нгуен**, Ф. Т. Д. Во // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. - № 1.

66. **Нгуен, Х. Т.** Формообразование гибридных заготовок из алюминиевых сплавов осадкой с кручением / П. А. Петров, В. Н. Фам, И. А. Бурлаков, **Х. Т. Нгуен** // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 3. – С. 106-112.

67. Petrov, M. Experimental and numerical research on forging with torsion / M. A. Petrov, V. N. Subich, P. A. Petrov // AIP Conference Proceedings 16 October 2017; 1896 (1): 190024. <https://doi.org/10.1063/1.5008237>

68. Petrov, P. Finite-Element Modelling of Forging with Torsion: Investigation of Heat Effect / P. Petrov, A. Matveev, M. Kulikov, B. Stepanov, M. Petrov, I. Burlakov, U. Dixit // Procedia Manufacturing, Volume 47, 2020, Pages 274-281, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.221>.

69. **Nguyen, K. T.** Controlling Shape Formation of Workpieces From Titanium Alloys (as Exemplified by the OT4-1 Alloy) Using Simulation of Rheology and Regimes of Deformation / P. A. Petrov, **K. T. Nguyen**, I. A. Burlakov, R. Yu. Sukhorukov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - vol 50. - no 6. - 2021. - P. 547-553.

70. Петров, П. А. Исследование упрочнения алюминиевого сплава АМг6 на начальном участке кривой текучести при повышенных температурах / П. А. Петров, В. И. Перфилов // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии : Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 14–17 марта 2006 года / Под общей редакцией С.П. Мочалова. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2006. – С. 205-212. – EDN SZZBEL.

71. **Нгуен, Х. Т.** Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации / Ф. Т. Д. Во, П. А. Петров, И. А. Бурлаков, В. Н. Фам, **Х. Т. Нгуен**, А. А. Гневашев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. - Т. 21. - №3. - С. 78-88.

72. **Нгуен, Х. Т.** Построение реологических модели алюминиевого сплава RS-356 / Ф. Т. Д. Во, **Х. Т. Нгуен**, И. А. Бурлаков // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС. - 2022. - № 5. - 2022. - С. 31-34.

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

74. **Нгуен, Х. Т.** Анализ реологических моделей титанового сплава OT4-1 при различных режимах деформации / **Х. Т. Нгуен**, П. А. Петров, И. А. Бурлаков, Ф. Т. Д. Во // Технология легких сплавов. – 2023. – № 1. – С. 80-88. – DOI 10.24412/0321-4664-2023-1-80-88. – EDN VVXVFW.

75. Marquardt, D.W. 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.

76. **Nguyen, K. T.** Determining the Effect of the Sliding Velocity on Contact Friction under Upsetting with Torsion / P. A. Petrov, I. A. Burlakov, Yu. A. Gladkov, A. A. Gartvig, and **K. T. Nguyen** // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - vol 52. - no 2. - 2023. - P. 120-128.

77. **Нгуен, Х. Т.** Определение фактора трения для моделирования процесса осадки с кручением / **Х. Т. Нгуен** // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: Сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26–28 апреля 2022 года. - Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - 2022. - С. 539-543. – EDN QGCZAW.

78. **Нгуен, Х. Т.** Осадка с кручением как метод изготовления гибридных заготовок / П. А. Петров, **Х. Т. Нгуен**, И. А. Бурлаков // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. - Донецк: ДонНТУ. - 2021. - С. 419-423.

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

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

81. Voce, E. The Relationship Between Stress and Strain for Homogeneous Deformation / E. Voce // J.Inst.Met., 74 (1948) 537-562.

82. Руководство пользователя системы QFORM ООО "КванторФорм" [Электронный ресурс], 2019. - Режим доступна в программе.

83. **Нгуен, Х. Т.** Оценка качества соединения гибридных алюминиевых заготовок методом осадки с кручением / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, **Х. Т. Нгуен**, Ф. Т. Д. Во // Заготовительные производства в машиностроении

(кузнечнопрессовое, литейное и другие производства). – 2024. - № 3. - С. 116 - 121

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

85. Петров, П. А. Построение кривых текучести алюминиевых сплавов системы Al-Mg на основе натурального и вычислительного экспериментов / П. А. Петров, Фам Ван Нгок, Ву Чонг Бач [и др.] // Технология металлов. – 2022. – № 5. – С. 42-51. – DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-5-42-51. – EDN WEKSAY.

86. Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. Теоретическое обоснование процессов ОМД. Пер. с нем. / Э. Зибель. - М., ОНТИ, 1934. 199 с.

87. Davoudi, M. Investigation of Effective Geometrical Parameters on Wear of Hot Forging Die / M. Davoudi, Ali Farokhi Nejad, S. Koloor, M. Petru // J. of Materials Research and Technology. 2021. V. 15. P. 5221.

88. Widomski, P. Comprehensive Review of Methods for Increasing the Durability of Hot Forging Tools / P. Widomski, Z. Gronostajski // Procedia Manufacturing. 2020. V. 47. P. 349.

89. Lee, K.J. Pressure and sliding velocity dependent surface asperity based friction model: Application to springback simulation / K. J. Lee, M. G. Lee // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. V. 651. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012079>

90. Cillaurren, J. Contact pressure and sliding velocity ranges in sheet metal forming simulations / J. Cillaurren, L. Galdos, M. Sanchez, F. Zabala, E. Sáenz de Argandoña, J. Mendiguren // ESAFORM. 2021. <https://doi.org/10.25518/esaform21.426>

91. Sigvant, M. Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results / M. Sigvant et al. // Procedia Manufacturing. 2019. V. 29. P. 512. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169>

92. Waanders, D. Temperature Dependent Friction Modelling: The Influence of Temperature on Product Quality / D. Waanders, J. Marangalou, M. Kott, S. Gastebois, J. Hol // *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 47. P. 535.

93. Behrens, B. A. Tribology in Hot Forging. In: *Comprehensive Materials Processing* / B. A. Behrens, A. Bouguecha, I. Lüken, J. Mielke, M. Biströn // *Comprehensive Materials Processing*. 2014. V. 5. P. 211.

94. Behrens, B. A. Advanced friction modeling for bulk metal forming processes / B. A. Behrens, A. Bouguecha, T. Hadifi et al. // *Prod. Eng. Res. Devel.* 5, 621–627 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11740-011-0344-8>

95. **Нгуен, Х. Т.** Исследование влияния температурно-скоростных режимов деформации на структуру материалов в процессе формообразования гибридных заготовок из цветных сплавов / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, В. Н. Фам [и др.] // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2022. – № 6. – С. 104-112. – DOI 10.31857/S0235711922050121. – EDN AYKYGB.

96. **Nguyen, K. T.** 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, V. N. Fam, **K. T. Nguyen**, P. T. D. Vo and R. Yu. Sukhorukov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* (vol 51 no 6) - 2022 / p. 582-589.

97. **Nguyen, K. T.** Shape Formation of Hybrid Workpieces from Aluminum Alloys by Torsional Upsetting / P. A. Petrov, V. N. Fam, I. A. Burlakov, **K. T. Nguyen**// *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* (vol 52 no 3) - 2023 / p. 286-292.

98. **Нгуен, Х. Т.** Методика исследования течения материала гибридной заготовки при штамповке с кручением / **Х. Т. Нгуен**, П. А. Петров, И. А. Бурлаков // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021) : Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. – Москва: Федеральное

государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. - 2021. - С. 65-69.

99. **Нгуен, Х. Т.** Изготовление гибридных деталей типа «кронштейн» методом осадки с кручением / **Х. Т. Нгуен**, П. А. Петров, И. А. Бурлаков // Технология легких сплавов. – 2024. - № 1.

100. Elrefaey, A. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer / A. Elrefaey, W. Tillmann // Journal of materials processing technology. – 2009. – Т. 209. – №. 5. – P. 2746-2752.

101. **Нгуен, Х. Т.** Изготовление осесимметричных гибридных заготовок из разнородных материалов методом осадки с кручением / П. А. Петров, И. А. Бурлаков, **Х. Т. Нгуен** // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 12 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет. - 2023. - С. 323-327. - EDN OXCKCR.

102. **Нгуен, Х. Т.** Определение влияния скорости скольжения на контактное трение при осадке с кручением / Петров П.А., Бурлаков И.А., Гладков Ю.А., Гартвиг А.А., **Х. Т. Нгуен** // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. - №2. - С. 34-43.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»

А. Г. Матвеев



от «09» октября 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-1

1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки из сплава ОТ4-1 диаметром и высотой 18x18 мм.

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

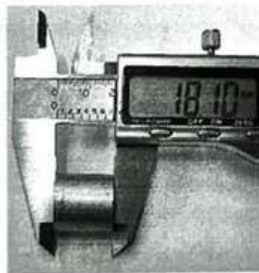


Рис. 1. Исходная заготовка

2 Осадка без кручения

Разметить 2 заготовки при комнатной температуре на нижней плите штампа, установленного на гидропрессе мод. ДБ-2432, и осадить за один ход ползуна до высоты 9 мм (деформация примерно 50%). Скорость осевого перемещения ползуна 1 мм/сек.

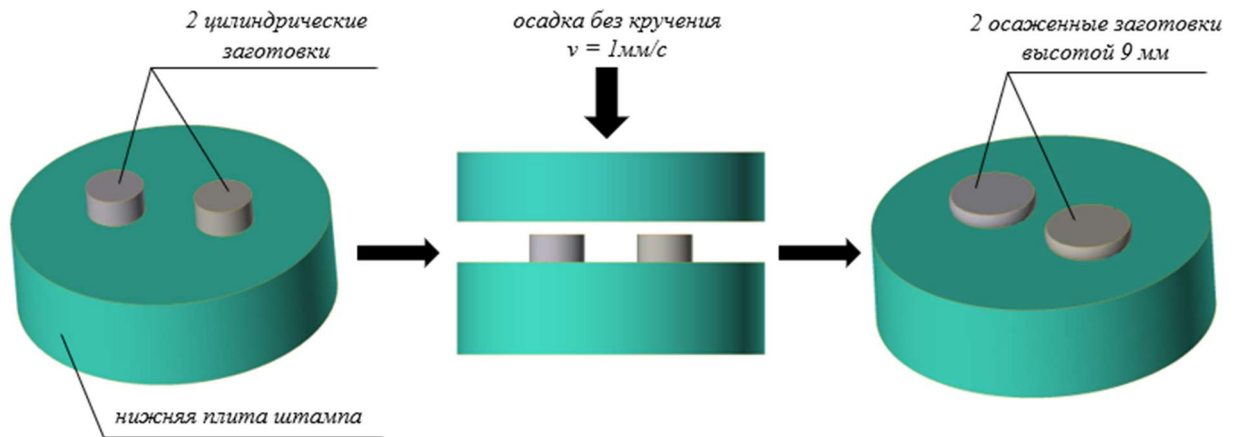


Рисунок 2 - Схема осадки без кручения



Рисунок 3 - Заготовка после осадки без кручения

3 Нагрев осажённых заготовок

Пакет из двух осажённых титановых заготовок предварительно нагреть в электрической печи мод. СНОЛ-1,6.2,5.1/9-ИЗ до $650 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 20 минут с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп.

4 Осадка с кручением. Получение гибридных титановых заготовок

После нагрева перенести пакет двух заготовок на поверхность нижней плиты штампа.

Немедленно осадить с кручением их до высоты 2,0 - 2,1 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин.

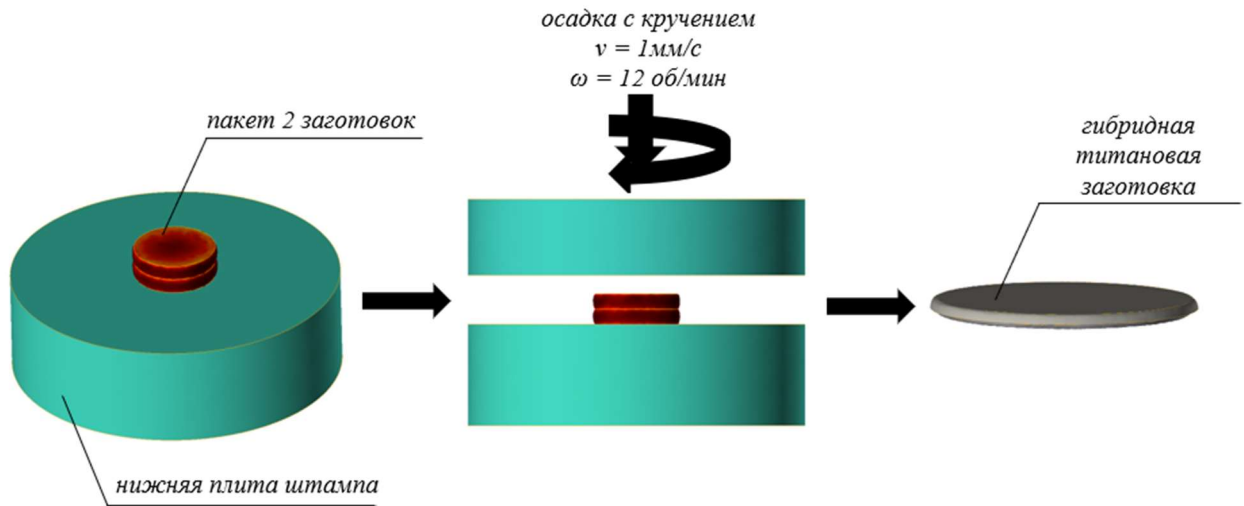


Рисунок 4 - Схема осадки с кручением



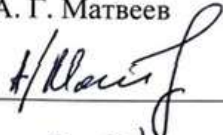
Рисунок 5 - Гибридная заготовка

5 Поднять траверсу пресса и извлечь гибридную заготовку

Разработчик _____

Нгуен Х. Т.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»
А. Г. Матвеев


от «09» октября 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки из сплава АМг2 диаметром 40 мм и высотой 10 мм.

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

2 Осадка с кручением. Получение гибридных алюминиевых заготовок

Собирать 2 алюминиевые в одну гибридную и устанавливать на поверхность нижней плиты штампа гидропресса мод. ДБ-2432.

Опустить верхний инструмент, пока он не коснется заготовки. Проводить процесс осадки с кручением при комнатной температуре до высоты заготовки 2,1 - 2,4 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин.

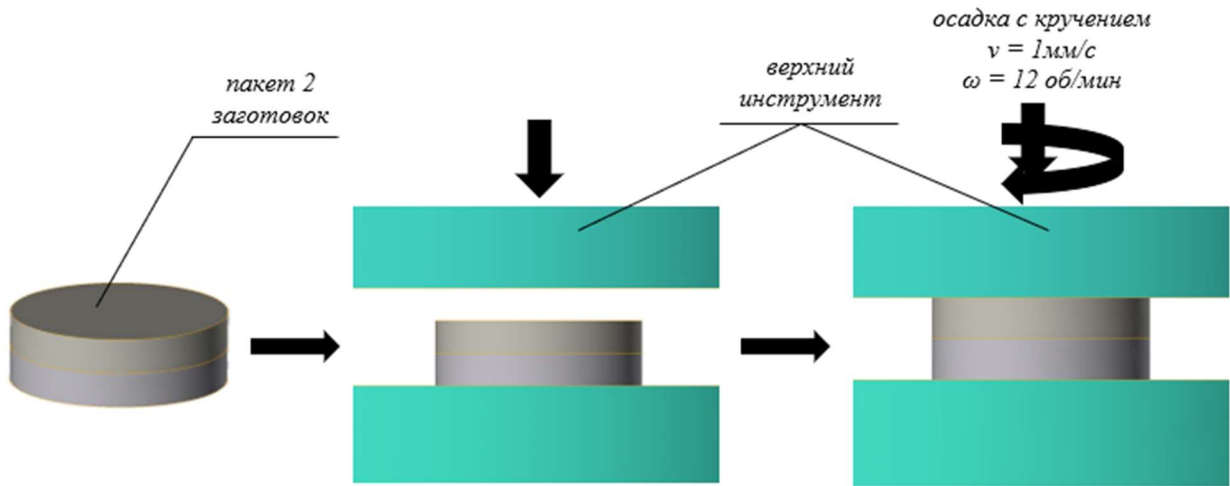


Рисунок 1 - Схема осадка с кручением

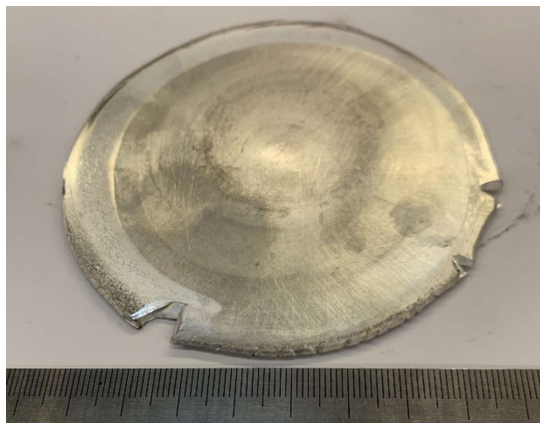


Рисунок 2 - Гибридная заготовка

3 Поднять траверсу прессы и извлечь гибридную заготовку

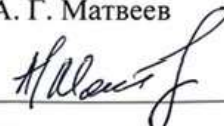
Методика аналогична для сплава АМгб.

Разработчик _____

Нгуен Х. Т.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»

А. Г. Матвеев



от «09» октября 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДНОГО
СПЛАВА

1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки из сплава БрХ0,8 диаметром 30 мм и высотой 10 мм.

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

2 Осадка с кручением. Получение гибридных медных заготовок

Собирать 2 медных в одну гибридную и устанавливать на поверхность нижней плиты штампа гидропресса мод. ДБ-2432.

Опустить верхний инструмент, пока он не коснется заготовки. Проводить процесс осадки с кручением при комнатной температуре до высоты заготовки 3,5 - 3,7 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин (см. рис. 1 в приложении Б).



Рисунок 1 - Гибридная заготовка

3 Поднять траверсу прессы и извлечь гибридную заготовку

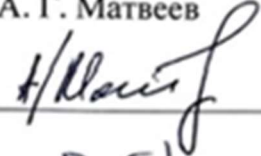
Разработчик _____

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines.

Нгуен Х. Т.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедры
«Обработка материалов давлением
и аддитивные технологии»

А. Г. Матвеев



от «09» октября 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ
РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ

1 Гибридная заготовка из сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8

1.1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки:

- из медного сплава БрХ0,8 диаметром 30 мм и высотой 9,5 мм.
- из титанового сплава ОТ4-1 диаметром 28 мм и высотой 25 мм.

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

1.2 Нагрев заготовок

Пакет из двух заготовок предварительно нагреть в электрической печи мод. СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 до $650 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 60 минут с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп.

1.3 Осадка с кручением. Получение гибридных заготовок

После нагрева перенести пакет двух заготовок на поверхность нижней плиты штампа.

Немедленно осадить с кручением их до высоты 8,5 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин.

1.4 Поднять траверсу прессы и извлечь гибридную заготовку

2 Гибридная заготовка из сплавов ОТ4-1 и АМг6

2.1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 2 цилиндрические заготовки:

- из алюминиевого сплава АМг6 диаметром 30 мм и высотой 10 мм.
- из титанового сплава ОТ4-1 диаметром 28 мм и высотой 25 мм.

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

2.2 Нагрев заготовок

Предварительно нагреть титановую заготовку в электрической печи мод. СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 до $750\pm 10^\circ\text{C}$ в течение 60 минут и алюминиевую заготовку в электрической печи мод. СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ до $400\pm 10^\circ\text{C}$ в течение 20 минут с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп.

2.3 Осадка без кручения

Разметить титановую заготовку на нижней плите штампа, установленного на гидропрессе мод. ДБ-2432, и осадить за один ход ползуна до высоты 12,5 мм (деформация примерно 50%). Скорость осевого перемещения ползуна 1 мм/сек. Затем снова нагреть ее в электрической печи мод. СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 до $750\pm 10^\circ\text{C}$ в течение 60 минут.

После этого разметить алюминиевую заготовку на нижней плите штампа, установленного на гидропрессе мод. ДБ-2432, и осадить за один ход ползуна до

высоты 6,5 мм. Скорость осевого перемещения ползуна 1 мм/сек. Затем снова нагреть ее в электрической печи мод. СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ до $400\pm 10^\circ\text{C}$ в течение 20 минут.

2.4 Осадка с кручением. Получение гибридных заготовок

Собирать 2 заготовки в одну гибридную и устанавливать на поверхность нижней плиты штампа гидропресса мод. ДБ-2432.

Опустить верхний инструмент, пока он не коснется заготовки. Проводить процесс осадки с кручением при комнатной температуре до высоты заготовки 8,5 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин (рисунок 1).

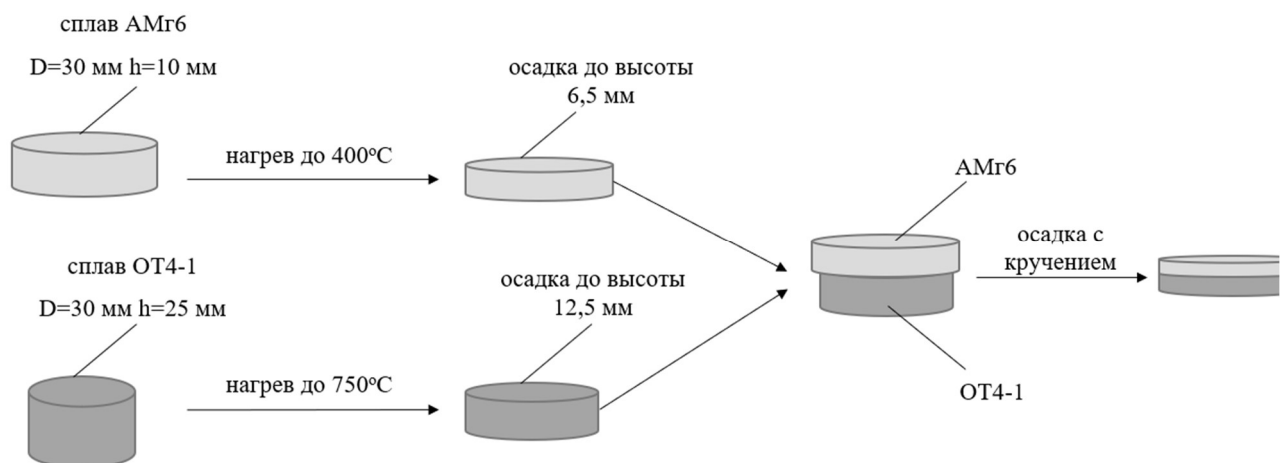


Рисунок 1 - Схема осадки с кручением

2.5 Поднять траверсу пресса и извлечь гибридную заготовку

3 Гибридная заготовка из сплавов БрХ0,8 и АМг2 с тремя слоями

3.1 Подготовка исходных заготовок

Электроэрозионной резкой изготовить 3 цилиндрические заготовки:

- 2 штуки из медного сплава БрХ0,8 диаметром 40 мм и высотой 7,5 мм.
- 1 штука из алюминиевого сплава АМг2 диаметром 40 мм и высотой 20 мм.

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

3.2 Нагрев заготовок

Предварительно нагреть 2 медных заготовок в электрической печи мод. СНОЛ 1,6.2,5.1/9-ИЗ до $600\pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 20 минут с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп.

3.3 Осадка с кручением. Получение гибридных заготовок

Собирать 3 заготовки в одну гибридную (рисунок 2) и устанавливать на поверхность нижней плиты штампа гидропресса мод. ДБ-2432 (алюминиевая заготовка в середине).



Рисунок 2 - Гибридная заготовка до осадки с кручением

Опустить верхний инструмент, пока он не коснется заготовки. Проводить процесс осадки с кручением при комнатной температуре до высоты заготовки 8,5 мм со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/сек с частотой его вращения 12 об/мин.

3.4 Поднять траверсу пресса и извлечь гибридную заготовку

Разработчик _____ Нгуен Х. Т.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**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

Проректор по научной работе
 к.т.н.

А.Ю. Наливайко
 «19» января 2024 г

АКТ

№ 01-01/24
Максимова Полина
 (место составления)

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Исследование закономерностей процесса формообразования осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом осадки с кручением», выполненной аспирантом кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Хань Тоан Нгуен.

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

по теме «Исследование закономерностей процесса формообразования осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом осадки с кручением» имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении аспирантов по научной специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» в форме лекции и практической работы по теме «Исследование влияния скорости скольжения металла на контактное напряжение с применением компьютерного моделирования».

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

Номер протокола и дата заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол №5 от 28.12.2023.

Начало использования объекта внедрения: 29 января 2024 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

« _____ » _____ 202... r.

VĂN BẢN

Về việc sử dụng kết quả của luận án tiến sĩ “Nghiên cứu các tính quy luật của quá trình tạo hình phối composite đối xứng trục từ hợp kim màu bằng phương pháp dập xoắn” của ông Nguyễn Khánh Toàn trong quá trình đào tạo tại 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: Trưởng Ban Kế hoạch TS. Vũ Trọng Bách và Chủ nhiệm khoa KTCS PGS, TS. Trần Thế Văn đã họp và xác nhận các kết quả trong luận án tiến sĩ của ông Nguyễn Khánh Toàn đã được ứng dụng trong quá trình đào tạo khi tiến hành các thí nghiệm và giảng dạy thực hành cho sinh viên theo mã ngành 7510201 “Kỹ thuật cơ khí”, chuyên ngành “Gia công áp lực”.

Trưởng phòng Đào tạo,

TS Nguyễn Mạnh Hùng

Trưởng Ban Kế hoạch,

TS Vũ Trọng Bách

Chủ nhiệm khoa KTCS,

PGS, TS Trần Thế Văn

Заместитель директора по учебной работе
университета им. «Чан Дай Нгхиа»
к.т.н., доцент. Лыонг Хонг Сам
«_____» _____ 202... г.

АКТ

об использовании результатов кандидаткой диссертации Нгуен Хань Тоана на
тему:

«Исследование закономерностей процесса формообразования
осесимметричных составных заготовок из сплавов цветных металлов методом
осадки с кручением»

в учебном процессе университета им. «Чан Дай Нгхиа», г.Хошимин, Вьетнам

Комиссия в составе председателя – Начальник отдел обучения университета им. «Чан Дай Нгхиа», к.т.н., Нгуен Мань Хунг и членов: Начальника отдела планирования и обучения, к.т.н. Ву Чонг Бач и декана факультета «Машиностроение», к.т.н., доцент Чан Тхэ Ван составила настоящий акт, которым подтверждается, что результаты диссертации Нгуен Хань Тоана использованы в учебном процессе при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Обработка металлов давлением».

Начальник отдел обучения,
к.т.н.

Нгуен Мань Хунг

Начальник отдел планирования и обучения,
к.т.н.

Ву Чонг Бач

Декана факультета «Машиностроение»,
к.т.н., доцент

Чан Тхэ Ван