

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)

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

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель:

**Бурлаков Игорь Андреевич**

доктор технических наук, с.н.с., главный специалист УГТ ПК «Салют» АО «ОДК», профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

Официальные оппоненты:

**Хван Александр Дмитриевич**

доктор технических наук, доцент, директор инновационного бизнес-инкубатора ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

**Сидоров Александр Александрович**

кандидат технических наук, ООО «ТЕСИС», заместитель начальника отдела инженерного анализа, г. Москва

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

Защита состоится «05» июня 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте [paltievichar@mai.ru](mailto:paltievichar@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте по адресу: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=179340](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=179340).

Автореферат разослан «  »            2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

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 OT4-1 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.

**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°С и скоростей деформации 0,001-0,4 с<sup>-1</sup>. 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%.

### **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 «колпачок») 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 рецензируемых изданиях 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выполненной работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимости, а также перспективы применения на предприятиях. Приведены основные результаты, выносимые на защиту, данные о публикациях по теме работы, ее структуре и объеме.

**В первой главе** рассматривается значение цветных металлов в машиностроении и возможность изготовления из них гибридных заготовок. Для их получения обработкой давлением применяют различные

методы. Наряду с поперечно - клиновой прокаткой и сваркой трением с перемешиванием применяют осадку с кручением.

Штамповка методом осадки с кручением может быть реализована на специализированном оборудовании, в котором инструмент совершает поступательное и вращательное движение.

При механической подготовке поверхности образуется упрочненный поверхностный слой с микродефектами, которые при пластической деформации приводят к образованию микротрещин. При раскрытии трещин материал заготовки выдавливается через них и встречается с аналогичным металлом противоположной заготовки с последующим диффузионным соединением. Более поздние исследования трещин холодных сварных швов на сканирующем электронном микроскопе отечественных и зарубежных ученых подтвердили эту гипотезу, показав, что подготовка поверхности перед холодной сваркой имеет первостепенное значение (Ken-ichiro Mori, Niels Bay, Колубаев Е.А., Слободян М. С., Xiaosong He, Fengxiang Xu, Graf M., Härtel S., Pater Z.).

**Во второй главе** представлена методика выполнения работы. Для исследования были выбраны сплавы ОТ4-1, АМг2, АМг6, БрХ0,8, даны их химические составы и основные свойства. Определение химического состава осуществляли с помощью оптического эмиссионного спектрометра OBLF MVS1000 (Германия). Деформацию гибридных заготовок выполняли на модернизированном гидравлическом прессе ДБ-2432 с нагревом заготовок и инструментов в печах марок СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 и СНОЛ 1,6.2,5.1/9-И3. Микроструктура полученных заготовок исследовалась на бинокулярных микроскопах моделей “Olympus Delta” и “FEI QUANTA 650”. Образцы для получения реологических моделей осаживались на испытательных машинах моделей LFM250 и LFM50. Микротвердость полученных образцов определяли на микротвердомере мод. DuraScan 20. Скорость деформирования и температура деформируемых заготовок определялись при помощи датчиков перемещения и хромель-алюмелевых термопар.

Математическое моделирование процессов было выполнено с использованием метода конечных элементов и компьютерной программы QForm. Для его реализации были определены и применены реологические модели материалов на базе уравнения Хензеля-Шпиттеля.

**В третьей главе** показаны результаты моделирования процесса осадки с кручением гибридных заготовок. Для построения математических моделей изучаемых материалов экспериментальные кривые «напряжение текучести – деформация» аппроксимированы уравнением Хензеля-Шпиттеля с 9-ю неизвестными коэффициентами, отражающим зависимость напряжения текучести от температуры ( $T$ ), величины деформации ( $\epsilon$ ) и скорости деформации ( $\dot{\epsilon}$ ).



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

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

Коэффициенты уравнения (1) были определены с помощью вычислительных программ MATLAB и EXCEL методом Левенберга–Маркардта, описанным в второй главе, с применением результатов предварительных экспериментов на цилиндрических образцах размером 10 x10 мм, осаженных в диапазоне скоростей деформации 0,001, 0,01, 0,4 и температур 20, 400, 600, 800°C из сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8, и температурах 20, 300, 400, 450°C из сплавов АМг2 и АМг6 соответственно. Неизвестные девять коэффициентов для титанового сплава ОТ4-1 приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты уравнения Хензеля–Шпиттеля для титанового сплава ОТ4-1 (9 коэффициентов)

Температура деформации	Коэффициенты								
	$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_7$	$m_8$	$m_9$
20 - 400°C	532,6746	-0,0026	-0,0880	0,0051	-0,0597	0,0019	0,3680	-10 <sup>-5</sup>	0,0938
600 - 800°C	10,0133	-0,0024	-0,2885	-0,3952	-0,0623	-0,0035	1,8931	0,0007	0,7280

Аналогичным методом были установлены коэффициенты для уравнения Хензеля-Шпиттеля с 5-ю коэффициентами:

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

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

Пять установленных коэффициентов уравнения 2 для титанового сплава ОТ4-1, алюминиевых сплавов АМг2, АМг6 и медного сплава БрХ0,8 показаны в таблицах 2-4:

Таблица 2 - Коэффициенты уравнения Хензеля–Шпиттеля для титанового сплава ОТ4-1 (5 коэффициентов)

Температура деформации	Коэффициенты				
	$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
20 - 400°C	2904,0602	0,0013	0,7688	0,0029	1,5576
600 - 800°C	20775,5345	0,0044	0,6584	0,0710	2,3456

Таблица 3 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для алюминиевых сплавов АМг2, АМг6 (5 коэффициентов)

Материал	Температура деформации	Коэффициенты				
		$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
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 4 - Коэффициенты модели Хензеля–Шпиттеля для медного сплава БрХ0,8 (5 коэффициентов)

Температура деформации	Коэффициенты				
	<i>A</i>	<i>m</i> <sub>1</sub>	<i>m</i> <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>m</i> <sub>4</sub>
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

Особенностью процесса осадки с кручением является значительное различие в скорости скольжения металла по его поверхности. Скорость, величина которой увеличивается от нуля в центре вращения до максимума на периферии заготовки, значительно влияет на поверхностное трение. Для определения величины поверхностного трения  $\tau_R$ , основываясь на работах Alasti, Neumaier и В.А. Behrens, было применено следующее уравнение (IFUM friction model):

$$\tau_R = \left[ 0.3 \left( 1 - \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_s} \right) \cdot \sigma_n + m \cdot k \cdot \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_s} \cdot \left( 1 - \exp \frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s} \right) \right] \cdot f(v_{rel}) \quad (3)$$

где  $\sigma_{eq}$  – эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений);  $\sigma_n$  – нормальное напряжение;  $v_{rel}$  – скорость скольжения;  $\sigma_s$  – напряжение текучести;  $k$  – напряжение сдвига, равное  $\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ ;  $m$  – фактор трения.

В уравнении 3 влияние скорости скольжения металла определяется как

$$f(v_{rel}) = \exp \frac{-1}{2} \left( \frac{v_{rel}}{C} \right)^2 \quad (4)$$

Учитывая, что при переходе в пластическое состояние  $\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_s} = 1$  мы имеем одно уравнение с двумя неизвестными коэффициентами  $m$  и  $C$ . Фактор трения  $m$  определяли экспериментально методом осадки на 50% кольцевой заготовки с размерами наружного диаметра, внутреннего диаметра и высоты 30:15:5 мм, соответственно. Коэффициент  $C$  находили путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных, на базе решения, наиболее точно отражающего реальный процесс формообразования.

С целью применения данных параметров была использована разработанная совместно с компанией «Квантоформ» подпрограмма «friction.sliding\_velocity».

Моделирование процесса осадки с кручением гибридных заготовок из сплавов ОТ4-1, АМг2, АМг6 осуществлено с применением реологических моделей (уравнение Хензеля–Шпиттеля) программой QForm 10. Процесс моделирования образцов из медного сплава БрХ0,8

выполнен с использованием 5 неизвестных коэффициентов уравнения Хензеля-Шпиттеля и подпрограммы «*friction.sliding\_velocity*».

**В четвертой главе** даны результаты экспериментального исследования. Изучение микроструктуры осуществлено на цилиндрических образцах размером 10 x10 мм, осаженных в диапазоне скоростей деформации 0,001, 0,01, 0,4 и температур 20, 400, 600, 800°C из сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8, и температурах 20, 300, 400, 450°C из сплавов АМг2 и АМг6, соответственно.

Результаты испытаний осадкой с кручением гибридных заготовок и изучения их микроструктур после испытания показаны на рисунках 1-9.



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

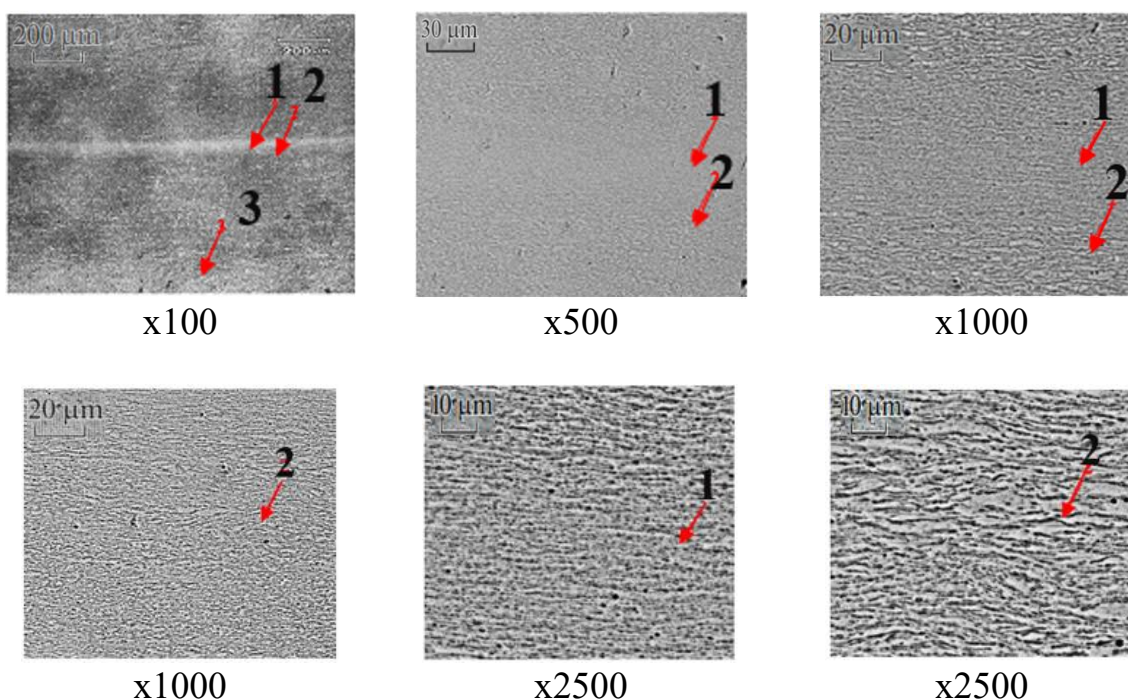


Рисунок 2 - Микроструктура гибридного образца из сплава ОТ4-1 в меридиональном сечении.

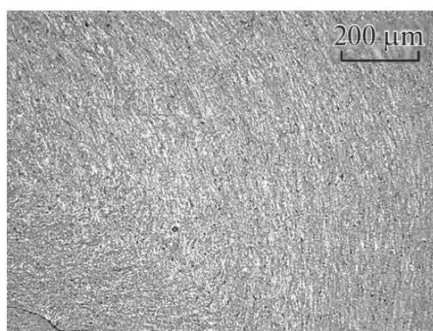
1- зона соединения, 2 – вблизи зоны соединения, 3 – зона основного металла



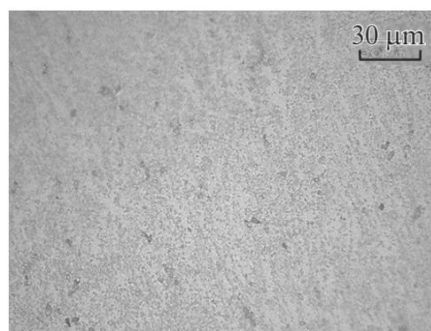
Рисунок 3 - Гибридная заготовка из сплава АМг2 после холодной осадки с кручением



Рисунок 4 - Гибридная заготовка из сплава АМг6 после холодной осадки с кручением

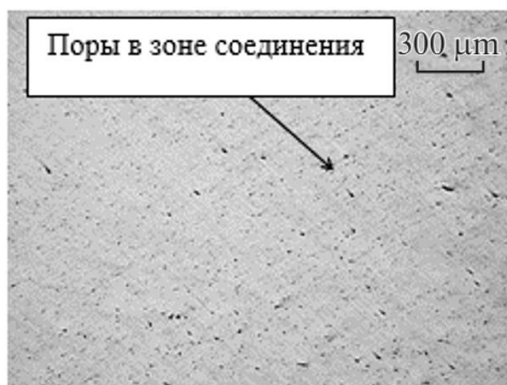


х 100



х 500

Рисунок 5 - Микроструктура в зоне соединения двух заготовок из сплава АМг2



*до травления*



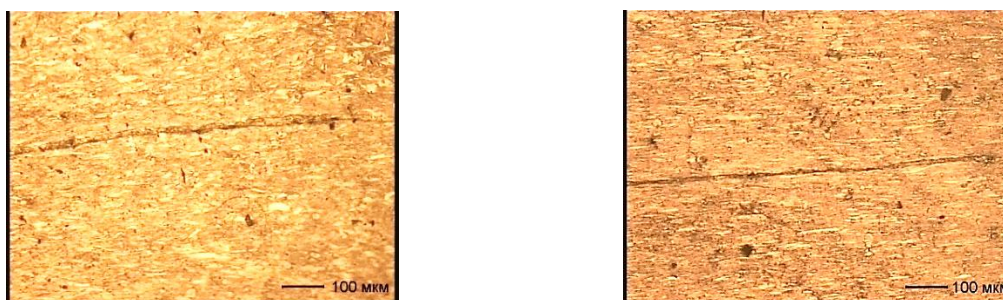
*после травления*

Рисунок 6 - Микроструктура зоны соединения двух заготовок из сплава АМг6 до и после травления (x100)



Рисунок 7 - Гибридная заготовка из сплава БрX0,8-Ш после холодной осадки с кручением:

а - внешний вид образца, б – макроструктура поперечного сечения.



а (x100)

б (x100)

Рисунок 8 - Микроструктура гибридного образца из сплава БрX0,8-Ш после холодной осадки с кручением:

а – в периферии образца, б – в центре образца



Рисунок 9 - Гибридная заготовка из 2 разных сплавов: OT4-1 и БрX0,8 после горячей осадки с кручением

**В пятой главе** дан анализ результатов проведенных экспериментальных исследований. На рисунке 10 представлено сравнение расчетных кривых с данными экспериментов при осадке образцов из титанового OT4-1. Видно, что в области температур 20-400°C уравнения (1) и (2) позволяют получить результаты незначительно отличающиеся друг от друга; точность расчета напряжения текучести составляет 0,8-0,9. С ростом температуры испытания, точность прогнозирования напряжения текучести снижается для модели, основанной на уравнении (2), вплоть до того, что модель не может описать распределение экспериментальных данных (температура 800°C). Таким образом, математическая модель напряжения текучести сплава OT4-1 может быть представлена в виде:

$$\sigma_i = \begin{cases} \text{уравнение (1) или уравнение (2), при } T \in [20; 400] \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{уравнение (1), при } T \in [600; 800] \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

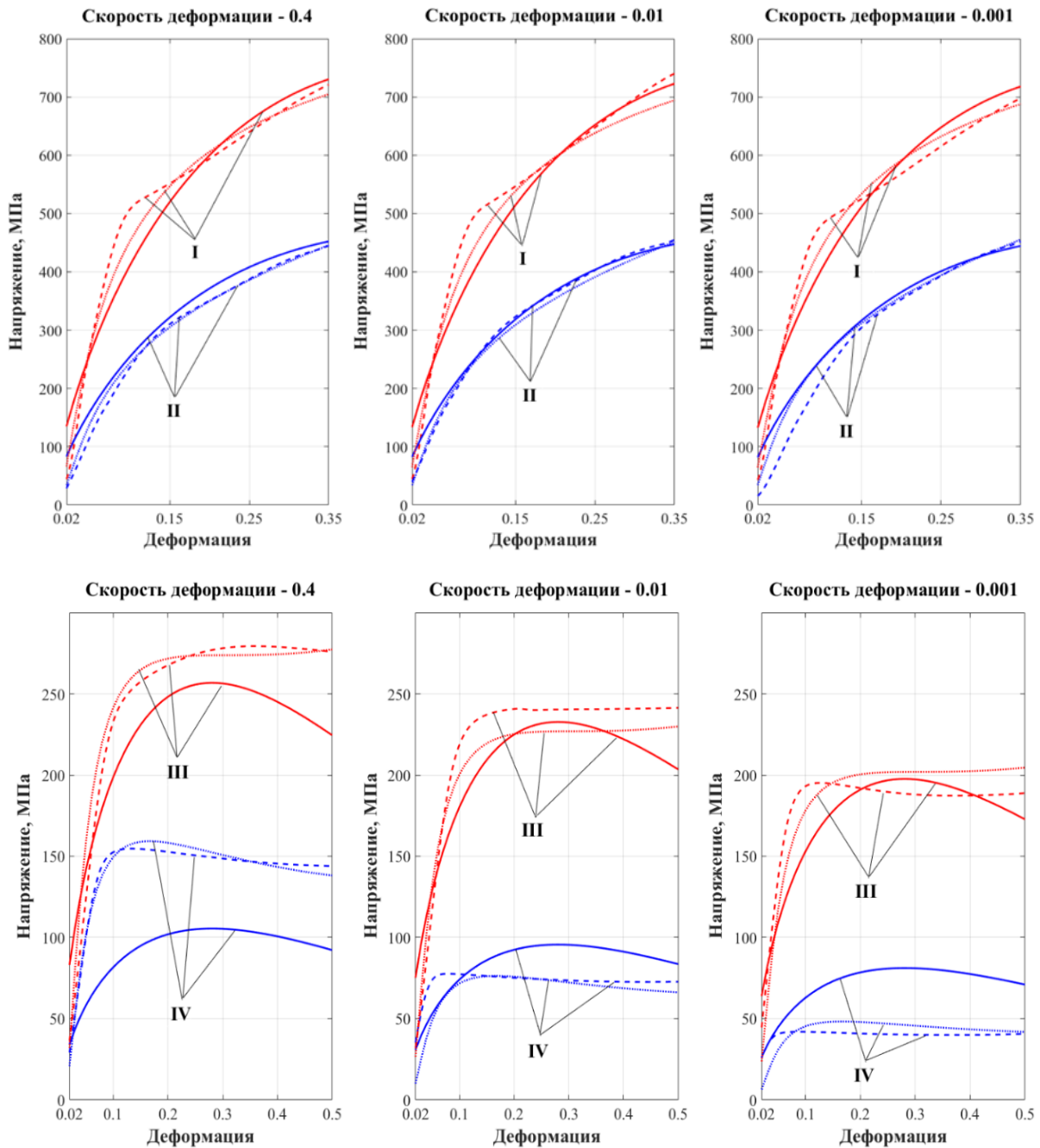


Рисунок 10 - Сравнение экспериментальных и расчетных напряжений текучести при осадке образцов по уравнениям 1 и 2 с различными скоростями деформации при различных температурах: I – 20°C; II – 400°C; III – 600°C; IV – 800°C градусов (--- данные эксперимента; ···· расчетная кривая (уравнение 1); — расчетная кривая (уравнение 2))

В зоне контакта (см. рисунок 2) наблюдается интенсивное измельчение зерен, и структура представляет собой механическую смесь. По мере удаления от зоны контакта микроструктура начинает укрупняться и постепенно переходит в структуру основного материала. Металлографическое исследование зоны соединения на электронном микроскопе подтверждает его высокое качество.

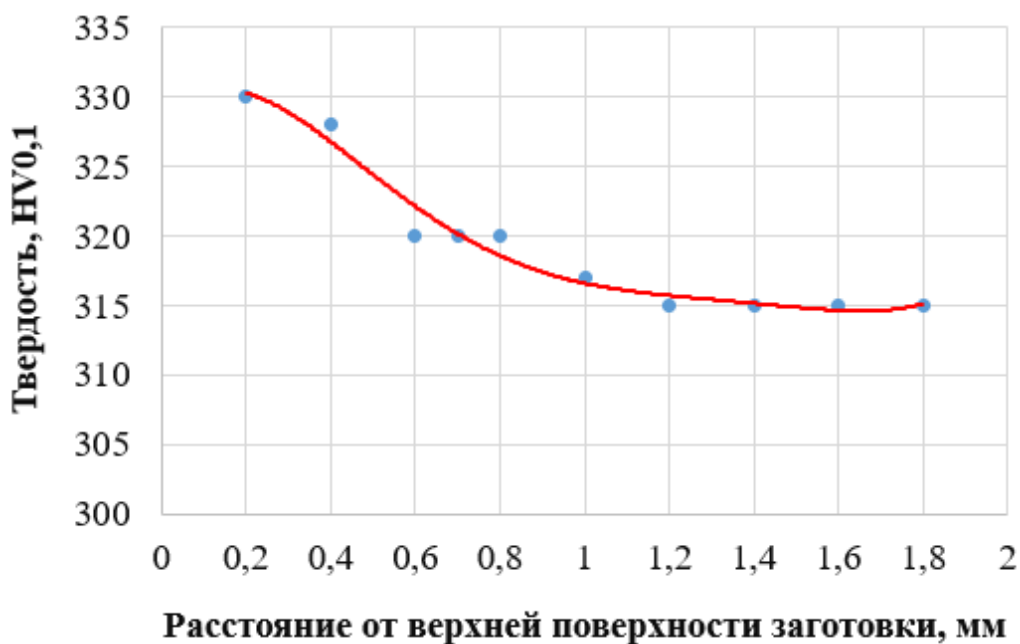


Рисунок 11 - Распределение микротвердости по толщине гибридного образца ОТ4-1 в центральной зоне

Изучение влияния осадки с кручением на изменение микротвердости показало ее незначительное различие по высоте образца ( $HV_{0,1}=330-315$ , нагрузка 100 г). Однако следует отметить незначительное повышение ее значений у поверхности и в центральной зоне (рисунок 11). В периферийной зоне различие в микротвердости по Виккерсу составляет от 5 до 10 единиц, что также подтверждает качество соединения.

#### **Сплавы АМг2 и АМг6:**

Качество соединения заготовок, полученных осадкой с кручением, можно оценить по микроструктуре. 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  $230^{\circ}\text{C}$ .

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

В результате рекристаллизации полностью исчезли следы границы соединения исходных заготовок за исключением мелких пор, что говорит о необходимости тщательной очистки соединяемых поверхностей.

### Сплав БрХ0,8:

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 способствуют протеканию диффузионных процессов и обеспечивают надежное соединение заготовок.

После осадки твердость на поверхности и вблизи границы соединения заготовок различий не имеет и составляет HV0,1 = 112-121. Граница соединения заготовок визуально практически не видна (рисунок 7) и обнаруживается только с помощью микроскопа (рисунок 8), что говорит о его высоком качестве.

После экспериментального определения коэффициентов  $m$  и  $C$  была найдена зависимость контактного трения от скорости скольжения металла для медного сплава БрХ0,8 (уравнение 6).

$$\tau_R = 0,61 \cdot k \cdot \left(1 - e^{\frac{-|\sigma_n|}{\sigma_s}}\right) \cdot e^{-0,5 \left(\frac{v_{rel}}{40}\right)^2} \quad (6)$$

Сравнительный анализ результатов моделирования осадки с кручением пакета из двух заготовок из медного сплава БрХ0,8 диаметром и высотой каждой заготовки 30 и 10 мм соответственно 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, получаемых моделированием и экспериментами (рисунок 12).

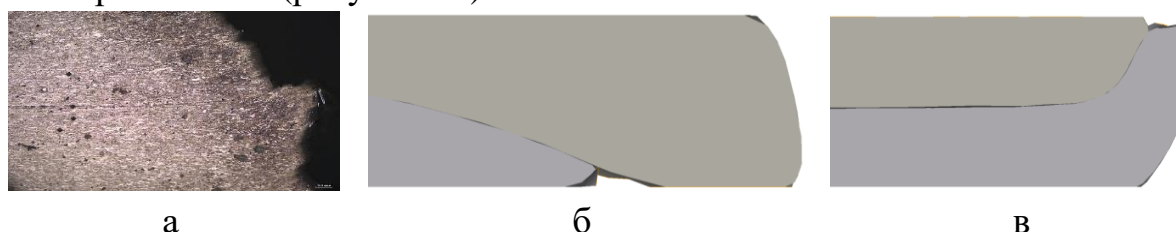


Рисунок 12 - Сравнение результатов процесса осадки пакета из двух заготовок из сплава БрХ0,8 (а - эксперимент, б - моделирование с постоянным фактором трения, в – моделирование с применением подпрограммы «*friction.sliding\_velocity*»)



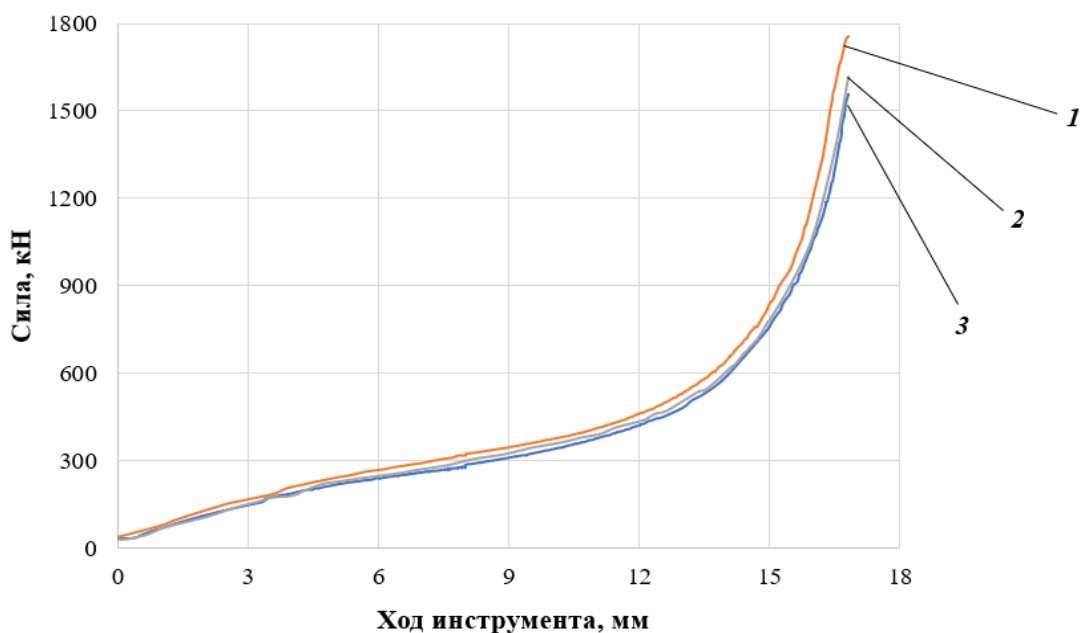


Рисунок 13 - Сравнение результатов эксперимента и моделирования зависимости силы на инструменте при осадке с кручением гибридной заготовки из сплава БрХ0,8 (1 - без применения подпрограммы, 2 - данные эксперимента, 3 - с применением подпрограммы при факторе трения  $m = 0,61$  и  $C = 40$ )

Для оценки положительного влияния применения подпрограммы «friction.sliding\_velocity» на точность определения контактного трения было проведено моделирование процесса осадки с кручением гибридной заготовки из сплава БрХ0,8 с ее применением и без нее (рисунок 13) с последующим сравнением с экспериментальными данными. Как видно из графика моделирование с фиксированным фактором трения  $m$  показывает на 10-15% более высокие значения силы. Применение подпрограммы позволяет получить более точные результаты силы формообразования и, следовательно, повысить точность моделирования.

**Соединение заготовок из разных сплавов:**

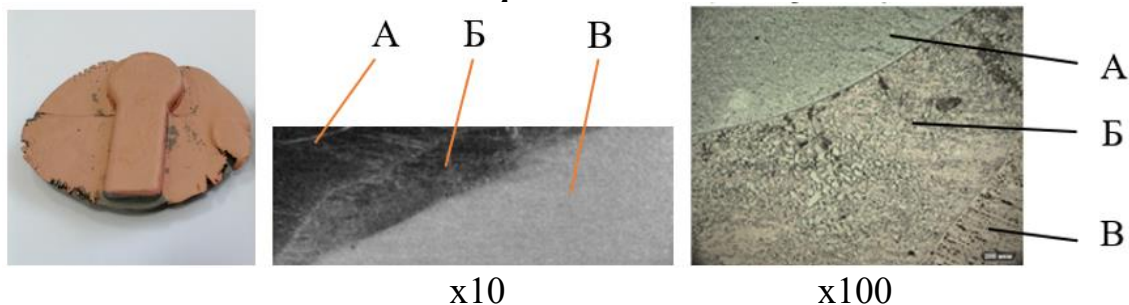


Рисунок 14 - Полуфабрикат из гибридной заготовки «Титан-Бронза» и его сечение (А - титан, Б - переходная зона, В - бронза)

После получения гибридной заготовки из сплавов ОТ4-1 и БрХ0,8 методом горячей осадки с кручением полученный образец подвергли штамповке при температуре 900 °С. Результаты испытания подтвердили

высокое качество полуфабриката (рисунок 14). Микротвердость в переходной зоне составляет 390-400 HV0,1, а в других местах она в интервале 240-260 HV0,1. Результаты количественного микроанализа в зоне контакта образцов (рисунок 15 и таблица 5) показывают, что в зоне контакта отсутствуют пустоты, а в переходной зоне образуются соединения  $TiCu_2$ ,  $Ti_2Cu$  и  $TiCu_4$ , которые обеспечивают надежное соединение металлов. Таким образом разработанный процесс может быть применен для производства изделий типа кронштейна.

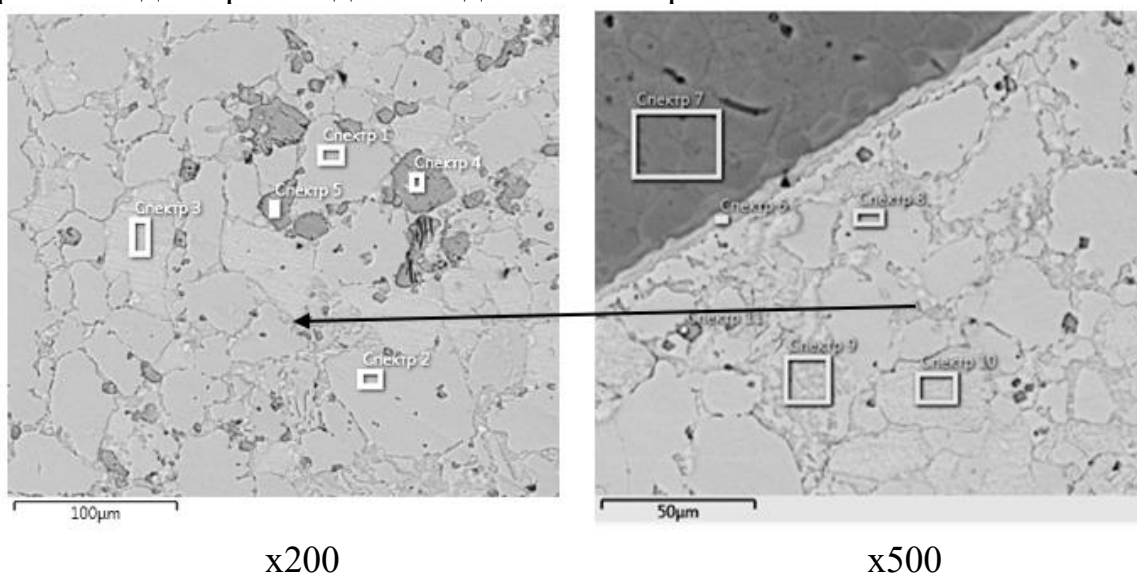


Рисунок 15 - Электронное изображение контактной зоны заготовок  
Таблица 5 - Количественный микроанализ полуфабриката «титан - бронза» в области соединения (% мас.)

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	$Ti_2Cu$
Спектр 5	40,67	57,87	$Ti_2Cu$
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 РАБОТЕ

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 применимость 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<sup>-1</sup>, 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Нгуен, Х. Т. Анализ реологических моделей титанового сплава ОТ4-1 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

### Публикации в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science:

6. **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.

7. **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.

8. **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.

9. **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.

### Публикации в изданиях, индексируемых РИНЦ:

10. **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.

11. **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.

12. **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.

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

14. **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.

**Статьи в сборниках материалов научных конференций:**

15. **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 РАН. - 2021. - С. 65-69.

16. **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.

17. **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.

18. **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.

19. **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.

Подписано к печати \_\_.\_\_.2024 г. Формат 60x84 1/16

Объем 1,0 усл.п.л. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

-----  
Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе

\_\_\_\_\_, Г. \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_