



**Репнин Арсений Вячеславович**

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН  
МУЛЬТИМАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

Санкт-Петербург  
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Попович Анатолий Анатольевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, доцент **Шереметьев Вадим Алексеевич**,  
заведующий лабораторией «Сплавы с памятью формы», доцент кафедры  
«Обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС» (г. Москва)

доктор технических наук **Марков Михаил Александрович**,  
начальник сектора «Жаростойкая керамика» ФГУП НИЦ «Курчатовский  
институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация:**

**федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева», г. Самара**

Защита состоится «27» февраля 2025 года в 16-00 ч. на заседании диссертационного совета У.2.6.1.21 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, ул. Политехническая, д. 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» января 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.2.6.1.21,  
доктор технических наук



Н.Г. Разумов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Мультиматериалы – материалы с пространственным изменением состава, которое позволяет существенно повысить локальные свойства изделий с целью повышения эксплуатационных характеристик. Комбинируя различные материалы, можно локально изменить твердость, модуль упругости, износостойкость, теплопроводность и т.д., сохранив при этом высокие прочностные характеристики мультиматериалов в целом. Для создания сложнопрофильных мультиматериальных изделий перспективным является использование аддитивного производства (АП). Особенности данного метода позволяют реализовать новую уникальную возможность создания пространственного изменения состава-структуры-свойств изделий (трехмерное изменение химического состава обуславливает трехмерное изменение свойств), что было недоступно для традиционных технологий. Мультиматериалы могут быть изготовлены из металлов, полимеров, керамики и даже из комбинации этих материалов.

Первая установка АП для изготовления мультиматериалов представляла собой 3D-принтер, работающий по технологии экструзии материала (полимеров), который был разработана в 2006 году. Со временем количество 3D-принтеров, использующих мультиматериальную печать полимеров, увеличилось, а затем появились и 3D-принтеры, использующие металлы и керамику. На основе анализа роста публикаций на тему мультиматериалов из металлов видно, что с 2017 года начались наиболее активные работы в данном направлении. Это может быть связано с расширением технологических возможностей получения мультиматериалов из металлов методом АП. То есть данная тема исследований является достаточно новой, что может говорить о наличии большого объема неисследованных вопросов. В качестве метода АП, который используется для изготовления металлических мультиматериалов можно выделить селективное лазерное плавление (СЛП). Использование СЛП позволяет получать изделия более сложной формы с высокой точностью и обеспечивать прецизионное изменение химического состава по сравнению с другими методами АП.

Так как технология мультиматериального СЛП достаточно новое исследовательское направление, как и мультиматериальное АП в целом, то на данный момент не сформировано исследовательских школ, но есть ряд лабораторий, которые занимаются исследованиями в данном направлении. Исследовательская лаборатория в университете Минью (Брага, Португалия) под руководством профессора Filipe Samuel Correia Pereira Da Silva имеет большой опыт в исследовании мультиматериалов, полученных методом СЛП. Лаборатория в Государственном университете Вашингтона под руководством профессора Amit

Vandyopadhyay проводила исследования получения мультиматериалов методом прямого подвода энергии и материала. Из китайских исследовательских лабораторий, работающих по направлению получения мультиматериалов методом СЛП, можно отметить Харбинский инженерный университет с лабораторией во главе с Shoufeng Yang, а также Хуачжунский университет науки и технологии и лабораторию Yusheng Shi.

На основе литературного обзора исследований мультиматериалов, полученных методом СЛП, видно, что во многих случаях локальные свойства отдельных зон имеют характерные для того или иного сплава значения. В связи с этим в исследованиях целесообразнее акцентировать внимание на такой составляющей мультиматериалов, как переходная зона. Переходная зона представляет собой результат взаимодействия двух материалов в процессе изготовления. Она имеет определенные особенности, которые обуславливаются выбранным технологическим процессом. Например, при использовании СЛП, где основной операцией является плавление порошкового слоя лазером, возможно возникновение следующих особенностей: образование дефектов из-за несоответствия параметров изготовления химическому составу; изменение микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости переходной зоны из-за смешивания двух сплавов при плавлении и диффузии элементов после кристаллизации. Эти особенности должны быть исследованы, чтобы оценить их влияние на свойства мультиматериалов в целом, что и стало целью данной работы. Также для упрощения проведения исследований была сформирована классификация мультиматериалов. Она разделяет все мультиматериалы, получаемые методом СЛП на три группы: мультиматериалы на основе однородных сплавов, разнородных свариваемых сплавов и разнородных несвариваемых сплавов.

Актуальность работы подтверждается финансированием данной тематики за счет научного гранта РФ № 23-79-30004, финансовой поддержки Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашения о предоставлении субсидий № 075-15-2022-311 и № 075-03-2023-004), а также субсидии по соглашению с Минобрнауки России от 25.04.2024 № 075-15-2024-562: «Научные основы создания природоподобных материалов и конструкций с заданным комплексом свойств с использованием передовых технологий цифрового проектирования, моделирования и аддитивного производства».

**Цель работы:** установить структурно-фазовые особенности переходной зоны в мультиматериалах различных систем, полученных методом СЛП, а также оценить её влияние на механические и функциональные свойства мультиматериалов на основе однородных сплавов – системы ВТ6/ВТ1-0, AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu и 316L/FeNi64, на основе разнородных свариваемых

сплавов – система ВЖ159/БрХЦрТ В, на основе разнородных несвариваемых сплавов – системы Ti6Al4V/Inconel 718 и 316L/NiTi.

Для достижения поставленной цели при выполнении работы решались следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние процесса СЛП на структурно-фазовое состояние переходной зоны мультиматериальных образцов ВТ6/ВТ1-0, AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu и 316L/FeNi64, полученных методом СЛП. Проанализировать химический состав и твердость переходной зоны мультиматериальных образцов. Исследовать эффект мультиматериального строения ВТ6/ВТ1-0 на механические свойства и вязкость разрушения. Оценить влияние различного содержания Cu в порошковой смеси AlSi10Mg+Cu на механические свойства мультиматериальных образцов AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu. Проанализировать функциональные свойства мультиматериала 316L/FeNi64 (изменение формы);

2. Проанализировать влияние технологического процесса СЛП на дефектообразование, а также структурообразование в переходной зоне мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В. Исследовать влияние термической обработки на структуру, химический и фазовый составы, а также твердость переходной зоны. Оценить влияние переходной зоны на механические свойства мультиматериальных образцов;

3. Отработать технологию изготовления мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718 и 316L/NiTi методом СЛП, за счет формирования переходных слоев. Провести исследования формирования микроструктуры, химического и фазового состава, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов. Определить влияние использования различных переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлено влияние параметров СЛП на структурно-фазовое состояние переходной зоны мультиматериальных образцов ВТ6/ВТ1-0. Показано, что микроструктура переходной зоны характеризуется как структурой присущей сплаву ВТ6 (ламели из  $\alpha+\beta$  фаз), так и структурой свойственной ВТ1-0 (структура корзинного плетения, состоящая из  $\alpha$ -фазы). Выявлено наличие градиентного изменения содержания Al и V при переходе от сплава ВТ6 к сплаву ВТ1-0. Установлено, что мультиматериальное строение обеспечивает возможность локального повышения вязкости разрушения.

2. Установлены свойства мультиматериальных образцов AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu с различным содержанием Cu в порошковой смеси AlSi10Mg+Cu. Для получения наиболее высоких значений прочностных свойств рекомендовано ограничение максимального количества Cu до 3-4 мас. %. Такая добавка, во-первых, позволяет создавать область мультиматериала с повышенной твердостью – значения твердости выше на 30 % по сравнению с областью AlSi10Mg. Во-

вторых, обеспечивать значения механических свойств мультиматериальных образцов на уровне чистого AlSi10Mg.

3. Установлено влияние строения мультиматериальных образцов 316L/FeNi36 на функциональные свойства (изменение формы). В плоском образце с продольным разделением материалов увеличение соотношения сплава 316L к FeNi36 (более чем 2 к 1) и общей толщины образца (более чем 750 мкм) негативно сказывается на функциональных свойствах (оптимальная толщина из рассмотренных – 750 мкм, где 250 мкм – FeNi36 и 500 мкм – 316L). При оптимальной толщине и соотношении материалов максимальное перемещение составляет  $0,05L$  (где  $L$  – длина образца). Характер изменения формы напрямую связан с коэффициентом линейного расширения FeNi36. Наиболее эффективная область температур с точки зрения реализации эффекта изменения формы – 25-215°C.

4. Установлена взаимосвязь между параметрами СЛП и пористостью переходной зоны мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В. Повышение плотности энергии (до 120-140 Дж/мм<sup>3</sup>) приводит к снижению пористости в переходной зоне ВЖ159/БрХЦрТ В, а её ширина при данных параметрах составляет ~ 300 мкм. Установлено, что после проведения испытаний на растяжение в изломе переходная зона характеризуется особенностями сплава БрХЦрТ В (наличие ямок и отсутствие гладкого рельефа) и сплава ВЖ159 (наличие микротрещин).

5. Определено влияние использования переходного слоя из чистых металлов – Cu и Nb на структурообразование, химический и фазовый составы, а также твердость и механические свойства мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718. Установлено, что использование выбранных параметров печати обуславливает формирование переходных зон различной ширины: более широкие переходные зоны формируются на границе Ti6Al4V/Cu и Cu/Nb. Получено, что при использовании переходных слоев в мультиматериальных образцах не наблюдается формирование охрупчивающих интерметаллидов. Мультиматериальные образцы с переходными слоями из Cu+Nb имеют значения механических свойств выше (предел прочности ~ 910 МПа), чем мультиматериальные образцы с одним переходным слоем из Cu (предел прочности ~ 790 МПа).

6. Установлены физико-химические закономерности влияния переходного слоя из сплава CoCrFeNiMn в мультиматериальных образцах 316L/NiTi на их структуру и свойства при изготовлении методом СЛП. Показано, что в переходной зоне образуется островковая макросегрегация, которая возникает под действием эффекта Марангони. Анализ фазового и химического состава, а также твердости показал, что в островковых макросегрегациях возможно образование окручивающего интерметаллида FeTi.

### **Методы исследования:**

Изготовление мультиматериальных образцов в том числе осуществлялось на уникальной установке СЛП собственной разработки и других установках СЛП. В работе применялись современные методы анализа микроструктуры, фазового и химического составов переходных зон мультиматериальных образцов. Оценку механической и усталостных свойств мультиматериальных образцов проводили на современных испытательных машинах. Функциональные свойства анализировались на испытательном стенде собственной разработки.

### **Практическая значимость работы:**

1. Даны практические рекомендации по выбору ширины слоев более пластичного материала в мультиматериальных образцах ВТ6/ВТ1-0 (из рассмотренных вариантов – 600 мкм ВТ1-0 и 1200 мкм ВТ6). Использование разработанной методики может повысить трещиностойкость, например, в дисках компрессора газотурбинных двигателей из сплава ВТ6, где в качестве более вязких слоев может выступать сплав ВТ1-0;

2. Выявлено оптимальное количество меди, которое обеспечивает наибольшее повышение свойств при её добавлении к порошку сплава AlSi10Mg в мультиматериальных образцах AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu (до 3-4 мас. %);

3. Установлено соотношение сплавов 316L и FeNi64 в мультиматериальном образце, которое обеспечивает наиболее высокие функциональные свойства (изменение формы) в мультиматериальных образцах 316L/FeNi36 (250 мкм FeNi64 и 500 мкм 316L). Полученные изделия с подобным строением могут найти применение при создании роботизированных систем;

4. Разработаны режимы изготовления мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В методом СЛП, обеспечивающие минимальное количество дефектов. Для переходной зоны БрХЦрТ В/ВЖ159 – 325-375 Дж/мм<sup>3</sup>, для ВЖ159/БрХЦрТ В – 120-140 Дж/мм<sup>3</sup>.

5. Определены металлы (Cu и Nb), которые могут быть использованы в качестве переходных слоев в мультиматериалах Ti6Al4V/Inconel 718 для бездефектного формирования изделий с высокими прочностными свойствами и сниженной массой. Данная методика изготовления может быть использована при производстве изделий газотурбинных двигателей, в которых необходимо сочетание высокой жаропрочности и обеспечение снижения массы;

6. Спроектировано и изготовлено оборудование для получения мультиматериальных изделий с трехмерным изменением химического состава методом СЛП.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Особенности изготовления и формирования структурно-фазового состояния мультиматериалов различных систем, полученных методом СЛП;

2. Результаты исследования закономерностей структурообразования в переходной зоне мультиматериальных образцов ВТ6/ВТ1-0, оказывающих влияние на вязкость разрушения;

3. Особенности изменения структурно-фазового состояния переходной зоны и формирования свойств мультиматериальных образцов AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu;

4. Результаты исследования влияния мультиматериального строения 316L/FeNi64 на функциональные свойства (изменение формы);

5. Результаты исследования влияния технологических параметров СЛП и термической обработки на структурообразование в переходной зоне и формирование свойств мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В;

6. Особенности изготовления изделий Ti6Al4V/Inconel 718 с использованием переходных слоев из Cu и Nb, и мультиматериальных изделий 316L/NiTi с использованием переходного слоя из ВЭС – CoCrFeNiMn.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: «Современные материалы, передовые производственные технологии и оборудование для них», 2023 г. Санкт-Петербург; «Международная научно-практическая конференция «АЕТ 2024», 2024 г. Санкт-Петербург; Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology, 2024 г. Самарканд.

#### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 9 статей в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, в том числе 4 публикации в журналах 1-го и 2-го квартилей (Q1 и Q2).

**Личный вклад автора состоит** в планировании исследований, изготовлении образцов для проведения исследований, подготовке оборудования для проведения исследований, проведение исследований, обработке результатов проведенных исследований, анализе результатов проведенных исследований.

#### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы, содержит 161 машинописный лист, включая 90 рисунков, 28 таблиц, 126 наименования библиографических ссылок.

#### **Благодарности:**

Соискатель хотел бы выразить благодарность научному руководителю – д.т.н., проф., директору ИММиТ Поповичу Анатолию Анатольевичу за поддержку и наставничество на всех этапах выполнения диссертации, а также сотрудникам Лаборатории "Синтез новых материалов и конструкций" и НОЦ «Конструкционные и функциональные материалы» за помощь в проведении исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основании литературных данных проведен анализ современного состояния вопроса исследования мультиматериалов, получаемых методом СЛП, а также оборудования для их изготовления. Осуществлен выбор мультиматериалов для проведения исследований, выбор принципов работы оборудования для проектирования и изготовления собственной установки мультиматериальной печати методом СЛП. Сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** приводится описание используемых в работе исходных порошковых материалов и оборудования для изготовления мультиматериалов, а также методов исследования.

Исходные порошки металлов и сплавов для выбранных мультиматериалов имели заданный химический состав и были получены методом газовой атомизации, за исключением порошковых композиций Al-Si-Mg-Cu и FeNi64. Для них порошок представлял смесь составляющих: для Al-Si-Mg-Cu – порошки AlSi10Mg и Cu, для FeNi64 – порошки Fe и Ni.

Мультиматериальные образцы изготавливались на установке 3DLam Mini. Заводская модель 3D-принтера была модифицирована для создания мультиматериальных образцов. Была изменена система подачи порошка – добавлен дополнительный бункер для второго материала и устройство его дозирования. Кроме того, мультиматериальный модуль имеет модифицированную систему распределения второго материала. Также часть образцов изготавливалась с использованием установки SLM280HL.

Для исследований дефектов, микроструктуры, химического и фазового составов, твердости переходных зон мультиматериалов, а также их свойств использовалось современное аналитическое и испытательное оборудование.

**В третьей главе** представлены результаты исследования структурообразования и формирования свойств мультиматериалов VT6/VT1-0, AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu и 316L/FeNi64, полученных методом СЛП.

Мультиматериальный образец VT6/VT1-0 имеет небольшое количество мелких сферических пор. Поры присутствуют в зоне сплава VT6 и в зоне VT1-0, а также в переходной зоне. Микроструктура мультиматериального образца VT6/VT1-0 в области сплава VT6 характеризуется ламелями из  $\alpha+\beta$  фаз, которые представляют собой видманштетт (рисунок 1-а). В области сплава VT1-0 микроструктура представляет собой видманштетт и структуру корзинного плетения, состоящие из  $\alpha$ -фазы. В переходной зоне происходит изменение химического состава (содержание Al) и твердости по сечению образца (рисунок 1-

б и в). Средняя микротвердость по Виккерсу в области сплава ВТ6 составила примерно 300 НВ, которая постепенно снижалась до значений равных примерно 254 НВ в областях ВТ1-0.

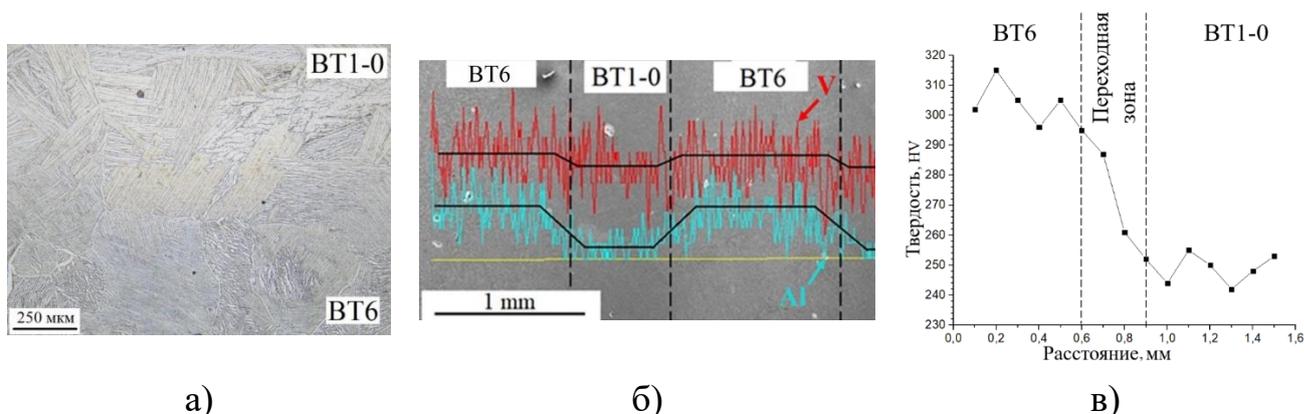


Рисунок 1 – Исследование переходной зоны мультиматериального образца ВТ6/ВТ1-0: а) исследование микроструктуры, б) исследование изменения химического состава, в) исследование изменения твердости

Исследовано влияние мультиматериального строения на механические свойства и вязкость разрушения мультиматериальных образцов ВТ6/ВТ1-0 (рисунок 2-а).

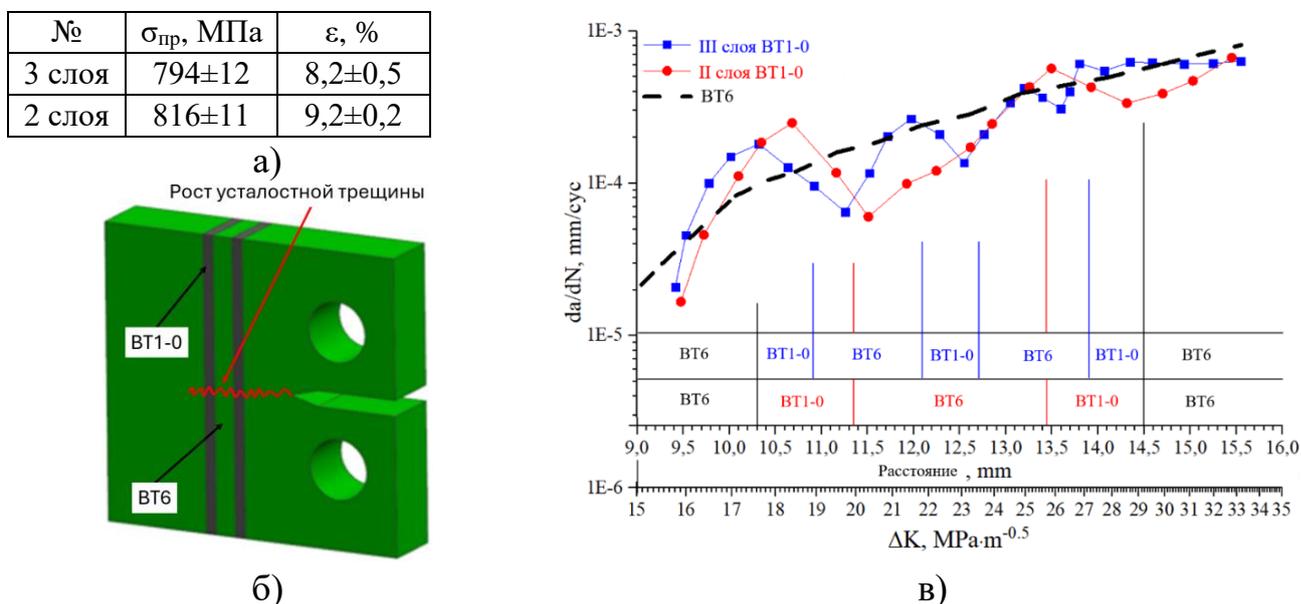


Рисунок 2 – Результаты испытаний мультиматериальных образцов ВТ6/ВТ1-0: а) механические испытания, б) образец для испытаний на рост усталостной трещины, в) результаты испытаний на рост усталостной трещины

Рассматривались варианты с тремя и двумя слоями ВТ1-0 (рисунок 2-б). Сравнивая полученные результаты испытаний на растяжение с литературными данными (относительного чистого сплава ВТ6), можно сделать следующий вывод

– происходит незначительное снижение предела прочности (примерно на 8%) и снижение относительного удлинения (на 25 %). Мультиmaterialные образцы ВТ6/ВТ1-0 обладают повышенной локальной вязкостью разрушения по сравнению с чистым сплавом ВТ6 (рисунок 2-в). На основании проведенных исследований можно предположить, что для локального повышения вязкости разрушения предпочтительным будет более частое наличие вязких слоев (три слоя сплава ВТ1-0).

Был успешно изготовлен мультиmaterialный образец AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu, который не имел большого количества дефектов в переходной зоне (наблюдались единичные мелкие поры, рисунок 3-а).

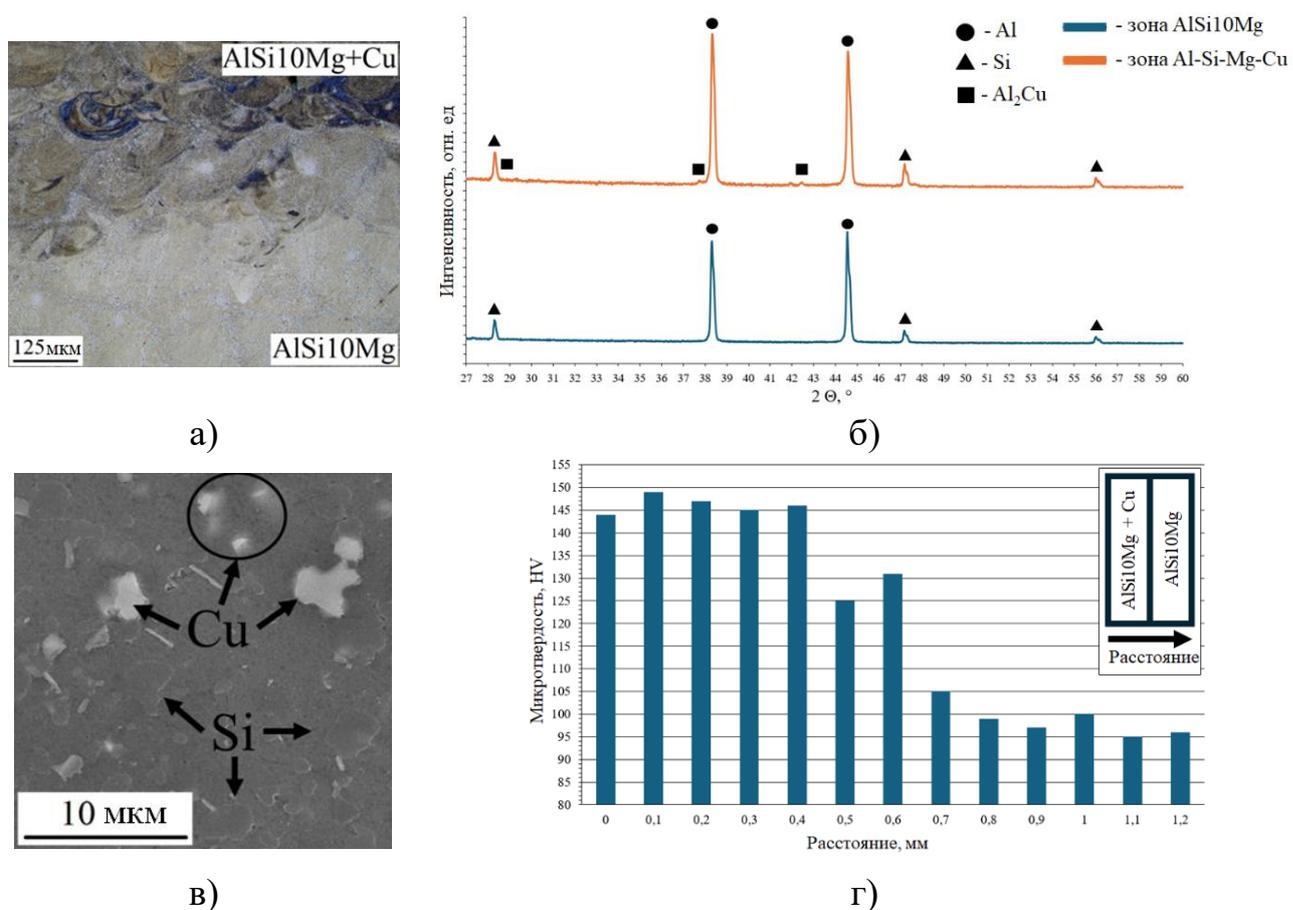


Рисунок 3 – Исследование переходной зоны и свойств мультиmaterialного образца AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu: а) исследование дефектов в переходной зоне, б) исследование фазового состава, в) исследование химического состава, г) исследование изменения твердости в переходной зоне

Получено, что присутствует взаимное перемешивание сплавов. В зоне AlSi10Mg наблюдается только Al и Si и отсутствуют другие фазы (рисунок 3-б). В зоне Al-Si-Mg-Cu к Al и Si добавляется небольшое количество Al<sub>2</sub>Cu, что подтверждается исследованием химического состава (рисунок 3-в). При исследовании микротвердости мультиmaterialного образца AlSi10Mg/Al-Si-Mg-

Cu после проведения термической обработки видно, что зона Al-Si-Mg-Cu имеет повышенную твердость по сравнению с зоной AlSi10Mg (значения твердости выше на 30 %, рисунок 3-г). Значения механических свойств мультиматериальных образцов находятся на уровне чистого AlSi10Mg. Таким образом было достигнуто локальное повышение свойств отдельной области мультиматериального образца.

В переходной зоне мультиматериалов 316L/FeNi36 встречаются области смешения двух сплавов, но отсутствуют дефекты процесса СЛП (рисунок 4-а). Микроструктура представляет собой крупные зерна, возникшие вследствие эпитаксиального роста, которые вытянуты по направлению выращивания от сплава 316L через переходную зону к составу FeNi36 (рисунок 4-б). Мультиматериальный образец имеет три характерные зоны распределения химического состава: зона состава FeNi64, переходная зона и зона 316L (рисунок 4-в и 4-г). Можно оценить размер переходной зоны – он составляет примерно 50 мкм. Твердость в области состава FeNi36 соответствует примерно 163 HV, далее идет переходная зона со значением твердости примерно 200 HV и затем зона 316L с 214 HV. Наиболее эффективная область температур с точки зрения реализации максимальных перемещений – 25-215°C (рисунок 5).

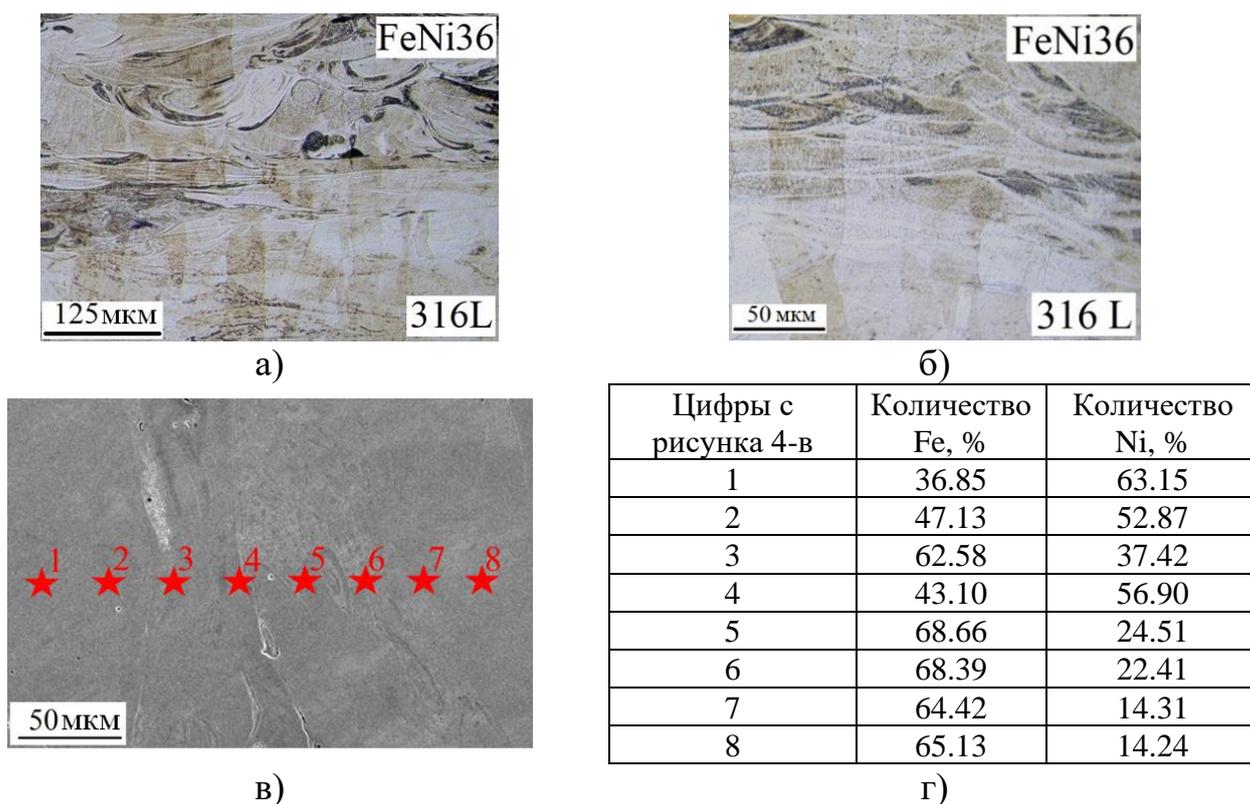


Рисунок 4 – Исследование переходной зоны мультиматериального образца 316L/FeNi36: а) исследование дефектов, б) исследование микроструктуры, в-г) исследование химического состава

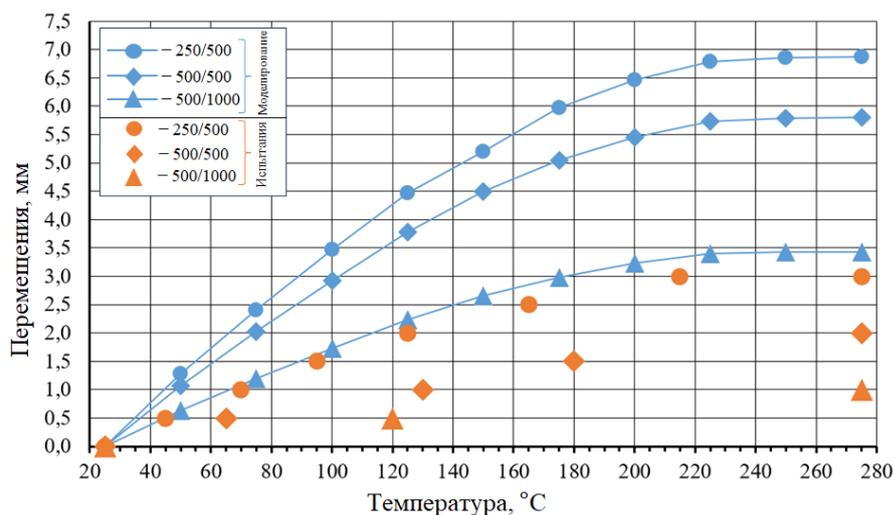


Рисунок 5 – Исследование функциональных свойств мультиматериального образца 316L/FeNi36

**В четвертой главе** представлены результаты исследования структурообразования и формирования свойств мультиматериала ВЖ159/БрХЦрТ В, полученного методом СЛП.

Отработаны технологические режимы изготовления мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В методом СЛП (рисунок 6). Только существенное повышение энергии приводит к снижению пористости в переходных зонах мультиматериальных образцов. Для переходной зоны БрХЦрТ В/ВЖ159: 325-375 Дж/мм<sup>3</sup>, для ВЖ159/БрХЦрТ В: 120-140 Дж/мм<sup>3</sup>.

Микроструктура зоны сплава БрХЦрТ В представляет собой столбчатые зерна с эпитаксиальным ростом по направлению изготовления образца, в ней отсутствуют линии границ ванн расплава (рисунок 7-а). Стоит отметить отсутствие видимых дефектов – пор, трещин и т. д., как в зонах сплавов, так и в переходной зоне. Анализируя распределение элементов в переходной зоне, стоит отметить наличие области со стороны БрХЦрТ В, в которой помимо Си присутствует Ni (рисунок 7-б). Такая же ситуация наблюдается со стороны ВЖ159, где имеется область, в которой имеется как Ni, так и Си (рисунок 7-в).

Происходит постепенное изменение микротвердости от сплава ВЖ159 (420 НV) к БрХЦрТ В (70–80 НV, рисунок 8-а). Протяженность изменения микротвердости составляет примерно 0,3 мм. Для оценки размеров переходной зоны были проведены дополнительные исследования, которые представляли собой рентгеноструктурный анализ образца ступенчатого вида (рисунок 8-б). Для каждого участка образца строилась фазовая дифрактограмма (рисунок 8-в). Видно, что смешение сплавов, то есть существование переходной зоны, когда по рентгенограммам присутствуют оба сплава, продолжается вплоть до нанесения и сплавления шестого слоя сплава БрХЦрТ В. На 7 слое не наблюдается пиков соответствующих сплаву ВЖ159, то есть после данного слоя идет чистый сплав

БрХЦрТ В. С учетом того, что величина одного слоя равна 50 мкм, можно сказать, что ширина переходной зоны составляет 300 мкм.

Выращивание сплава БрХЦрТ В на ВЖ159 (а)	Плотность энергии $J$ , Дж/мм <sup>3</sup>		
	$J = 75$	$J = 125$	$J = 225$
$J = 275$	$J = 325$	$J = 375$	
Выращивание сплава ВЖ159 на БрХЦрТ В (б)	Плотность энергии $J$ , Дж/мм <sup>3</sup>		
	$J = 50$	$J = 60$	$J = 90$
$J = 110$	$J = 120$	$J = 140$	

Рисунок 6 – Влияние параметров печати на пористость в переходных зонах мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В

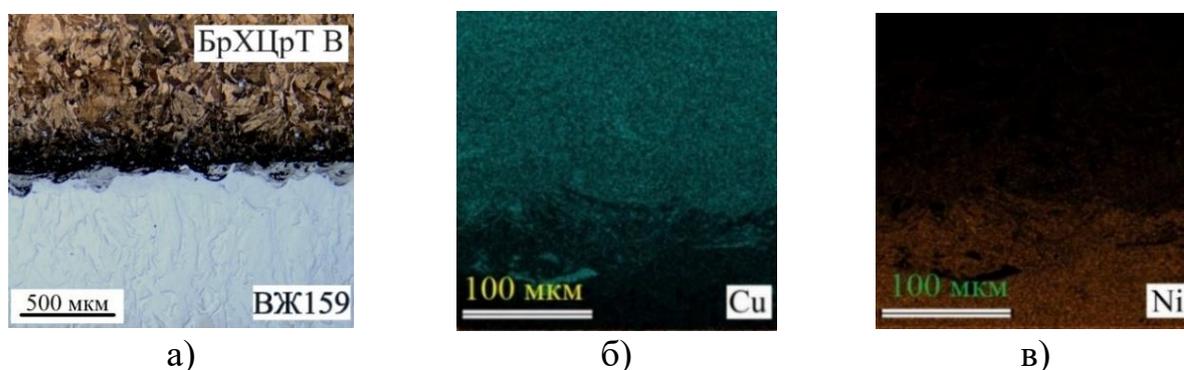


Рисунок 7 – Исследование переходной зоны мультиматериального образца ВЖ159/БрХЦрТ В: а) исследование микроструктуры, б) исследование химического состава

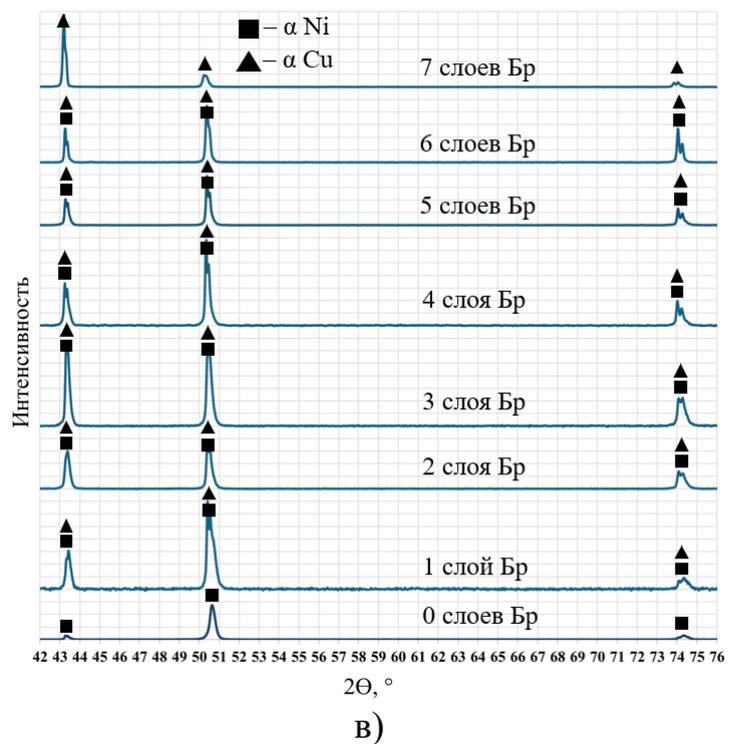
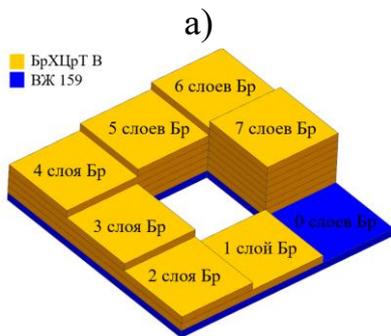
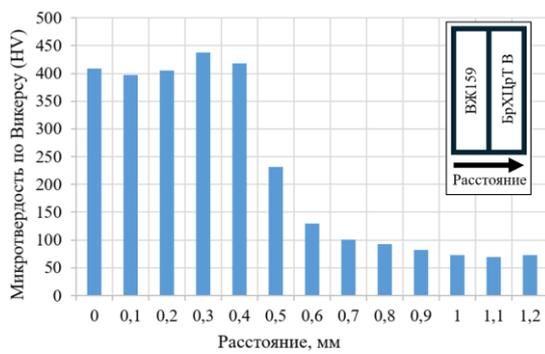


Рисунок 8 – Исследование твердости и размеров переходной зоны мультиматериального образца ВЖ159/BrXCrT В: а) исследование твёрдости, б) исследование размеров переходной зоны

Анализируя фазообразование в системе Cu-Ni можно отметить, что при взаимодействии двух элементов образуется непрерывный ряд твердых растворов (Cu, Ni). При этом система Cr-Cu характеризуется наличием двух твердых растворов на основе Cu и Cr. В системе Cu-Ni критическая температура существования зоны смешивания фаз составляет 354,5°C. При добавлении Cr фазовое разделение в  $\gamma$ -фазе становится термодинамически более благоприятным, в результате чего зона смешивания фаз расширяется, а критическая температура значительно повышается. Из рисунка 9 видно, что в переходной зоне не образуется новых фаз и наблюдаются пики, соответствующие фазам для обоих сплавов.

Мультиматериальный образец ВЖ159/BrXCrT В в испытаниях на растяжение показал увеличение предела прочности относительно BrXCrT В более чем в 2 раза (430 МПа против 203 МПа), но не превзошел значения для ВЖ159 (1202 МПа). Также, в испытаниях на сжатие предел прочности системы ВЖ159/BrXCrT В оказался меньше, чем у Inconel 718. Относительное удлинение при растяжении и сжатии мультиматериального образца было меньше, чем у ВЖ159, BrXCrT В и Inconel 718.

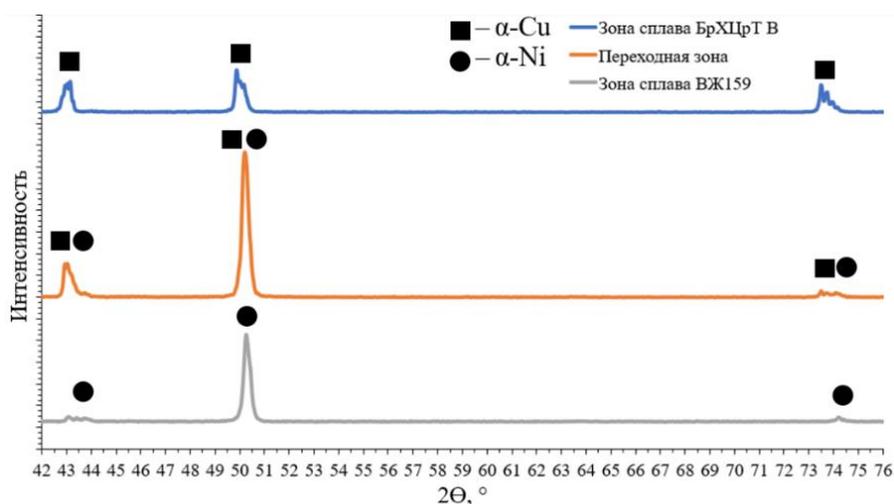


Рисунок 9 – Фазовый состав мультиматериального образца ВЖ159/БрХЦрТ В

На рисунке 10 представлена фрактография мультиматериального образца после проведения испытаний на растяжение. В области сплава БрХЦрТ В присутствуют ямки различных размеров, а также некоторое количество пор. Область сплава ВЖ159 характеризуется гладким рельефом излома с некоторым количеством микротрещин. Установлено, что после проведения испытаний на растяжение в изломе переходная зона характеризуется особенностями сплава БрХЦрТ В (наличие ямок и отсутствие гладкого рельефа) и сплава ВЖ159 (наличие микротрещин).

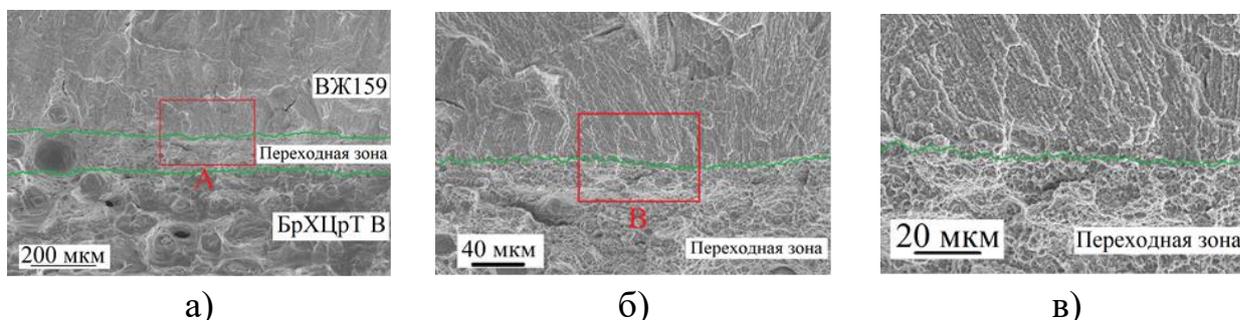


Рисунок 10 – Фрактографические исследования мультиматериального образца из сплавов ВЖ159/БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение

Оценку изменения химического состава в горизонтальной плоскости проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе (рисунок 11). Видно, что при отсутствии перекрещивания сплавов в мультиматериале возникает образование непроплава (сечение 1-1 и сечение 2-2). При наличии зоны перекрещивания сплавов (примерный размер 350-400 мкм) данный дефект уходит (сечение 3-3). Также стоит отметить, что имеется достаточно выраженный переход от одного сплава к другому. При увеличении зоны перекрещивания переход становится менее выраженным, образуется более широкая переходная зона.

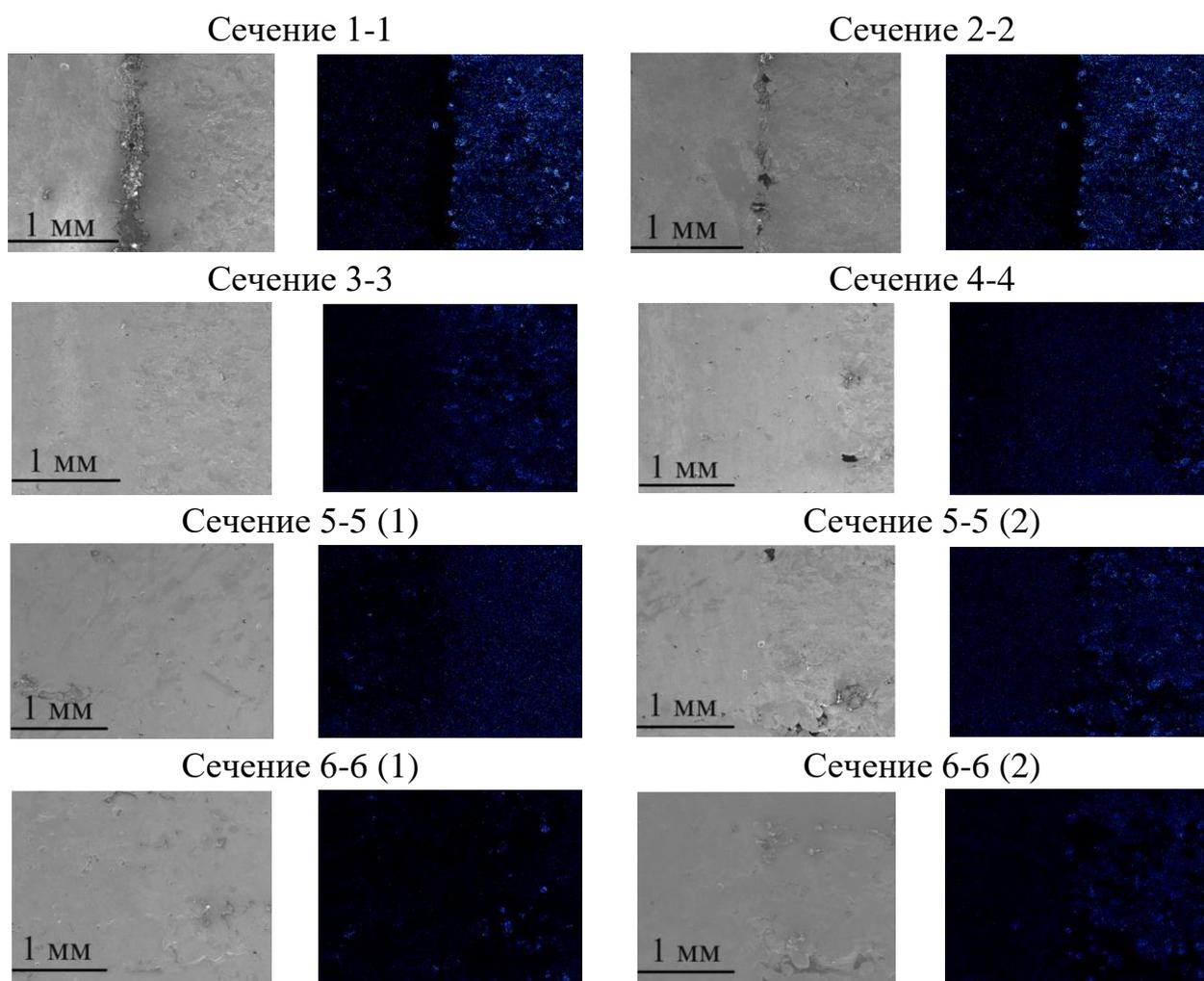


Рисунок 11 – Исследование мультиматериала ВЖ159/БрХЦрТ В с изменением химического состава (изменение содержания Ni) в трех направлениях

**В пятой главе** представлены результаты исследования структурообразования и формирования свойств мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718 и 316L/NiTi, полученных методом СЛП.

В переходных зонах мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718 с переходными слоями из Cu и Cu+Nb отсутствуют существенные дефекты. Однако, в них имеются области перемешивания сплавов (рисунок 12). В результате этого наблюдается развитие островковой макросегрегации, что объясняется эффектом Марангони. Эффект Марангони возникает, когда повышенная температура в центральной области бассейна расплава вызывает снижение поверхностного натяжения, в результате чего расплавленный металл течет в обратном направлении. Постоянный приток энергии усиливает обратный поток, в результате чего он возвращается в центр бассейна расплава, образуя завихрения. Из-за быстрого охлаждения и недостаточного времени для распределения химических элементов возникают неоднородности, приводящие к образованию островковой макросегрегации в вихревых потоках.

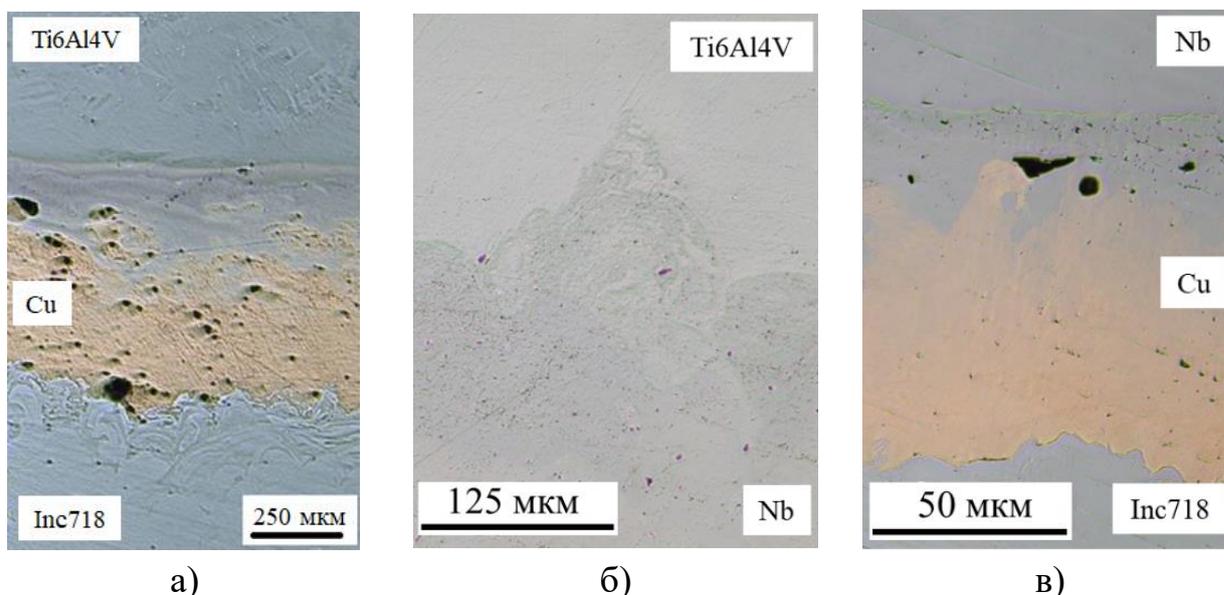
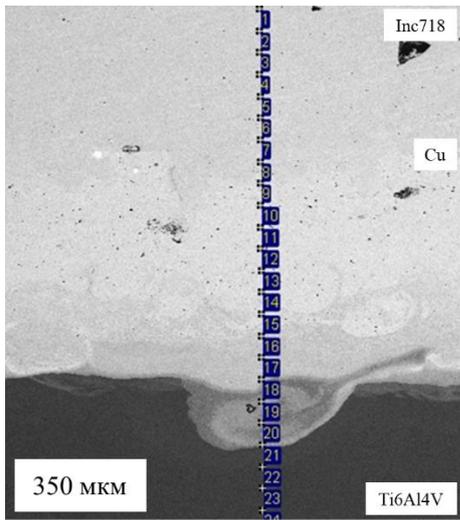


Рисунок 12 – Результаты исследования дефектов в переходных зонах мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu и Cu+Nb: а) переходные зоны Ti6Al4V/Cu/Inconel 718, б) переходная зона Ti6Al4V/Nb, в) переходная зона Nb/Cu/Inconel 718

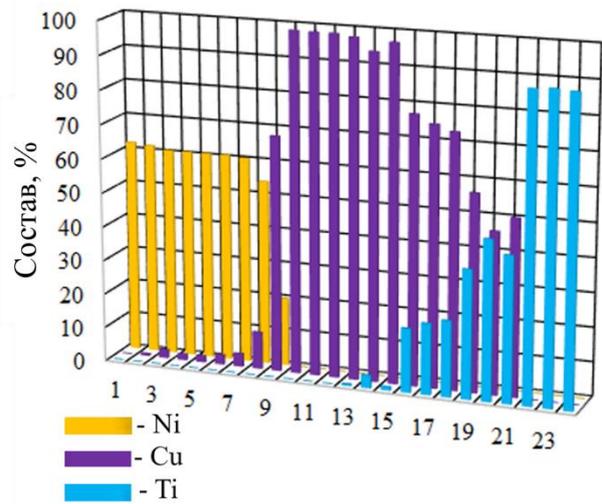
Результаты исследований химического состава мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu показывают, что переходная зона между Cu и Ti6Al4V будет больше, чем между Cu и Inconel 718 (рисунок 13-а и б). При использовании переходного слоя из Cu+Nb переходные зоны Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu имеют небольшую ширину (рисунок 13-в и г). Противоположная картина наблюдается в переходной зоне Nb/Cu, где присутствует постепенный переход от одного элемента к другому.

Результаты анализа фазового состава говорят о том, что в зоне сплавов присутствуют характерные для них фазы так же, как и в переходных зонах (рисунок 14). На полученных дифрактограммах не наблюдаются новых соединений, что может говорить либо об их отсутствии, либо об их минимальном количестве.

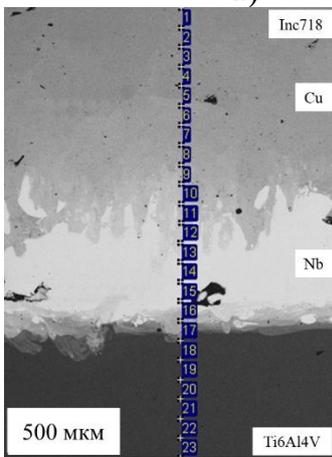
Мультиматериальные образцы с переходными слоями из Cu+Nb имеют значения механических свойств выше, чем мультиматериальные образцы с переходным слоем из Cu (таблица 1). Предел прочности мультиматериального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, а с переходным слоем Cu+Nb достигает 910 МПа, что является достаточно высокими значениями, но ниже свойств сплавов. Такое поведение мультиматериалов можно объяснить тем, что наличие переходных слоев из чистых металлов, снижает свойства образцов.



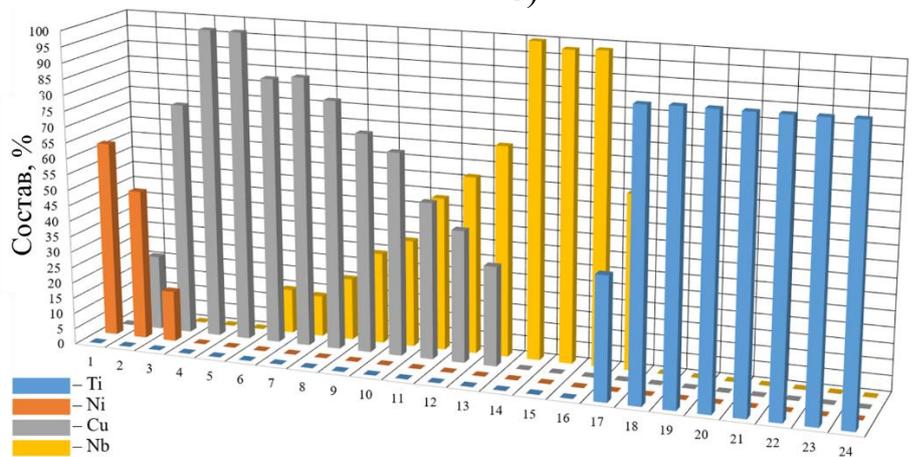
а)



б)

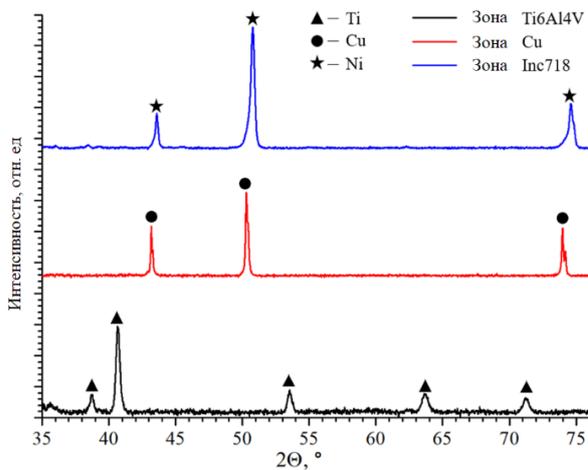


в)

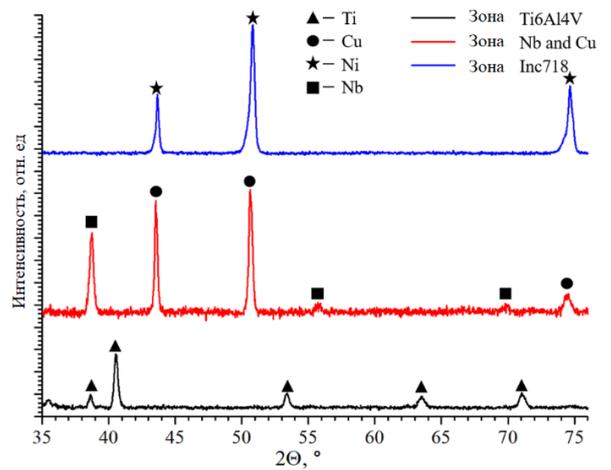


г)

Рисунок 13 – Результаты исследований химического состава мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718: а-б) с переходным слоем из Cu, в-г) с переходными слоями из Cu и Nb



а)



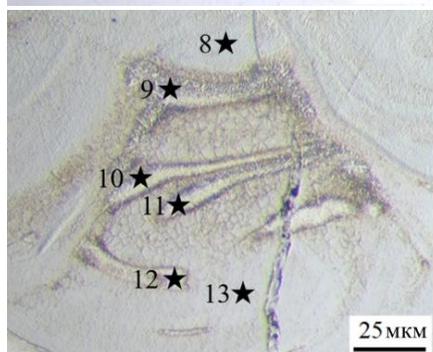
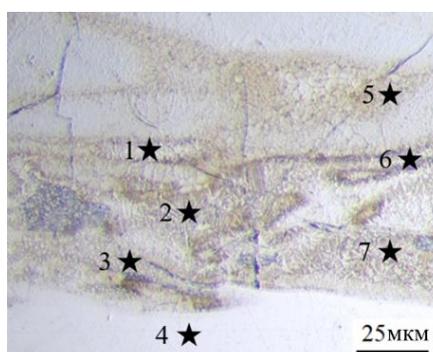
б)

Рисунок 14 – Фазовый состав различных зон мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718: а) с переходным слоем из Cu, б) с переходными слоями из Cu и Nb

Таблица 1 – Исследование механических свойств мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb

Переходный слой	№ образца	Свойства		
		Предел текучести	Предел прочности	Растяжение
		МПа	МПа	%
Cu	1	150,02	784,23	13,74
	2	153,38	786,34	11,14
	3	147,44	792,32	10,36
	Ср. знач.	150,28±2,07	787,6±3,15	11,75±1,33
Cu+Nb	1	145,77	891,72	15,51
	2	114,06	915,93	18,91
	3	151,71	910,7	13,51
	Ср. знач.	137,18±15,41	906,11±9,6	15,98±1,96

Из исследований микроструктуры мультиматериальных образцов 316L/NiTi с переходным слоем из ВЭС (CoCrFeNiMn) видно, что в переходной зоне образуется островковая макросегрегация, которая возникает под действием эффекта Марангони (рисунок 15). Из анализа фазового (рисунок 16) и химического состава (рисунок 15), а также твердости (рисунок 15) видно, что в островковых макросегрегациях возможно образование FeTi. Можно предположить, что наличие в переходной зоне небольшого количества FeTi обуславливает возникновение трещин, так как данный интерметаллид является охрупчивающим.



№ точки	Ni, at.%	Ti, at.%	Fe, at.%	Твердость, HV
1	32,7	27,18	15,44	546,9
2	33,53	25,96	14,72	564,4
3	28,19	18,56	20,3	542,4
4	19,93	1,16	31,40	191,2
5	36,96	33,66	11,48	432,7
6	33,48	29,4	13,89	564,8
7	33,11	24,26	15,51	557,6
8	44,21	44,49	4,65	422,7
9	33,62	28,76	14,71	569,4
10	30,88	25,14	16,84	546,1
11	29,16	25,27	18,26	558,9
12	33,66	26,88	15,5	559,1
13	38,57	34,77	10,31	445,9

Рисунок 15 – Исследование микроструктуры, химического состава и твердости переходной зоны мультиматериального образца 316L/NiTi

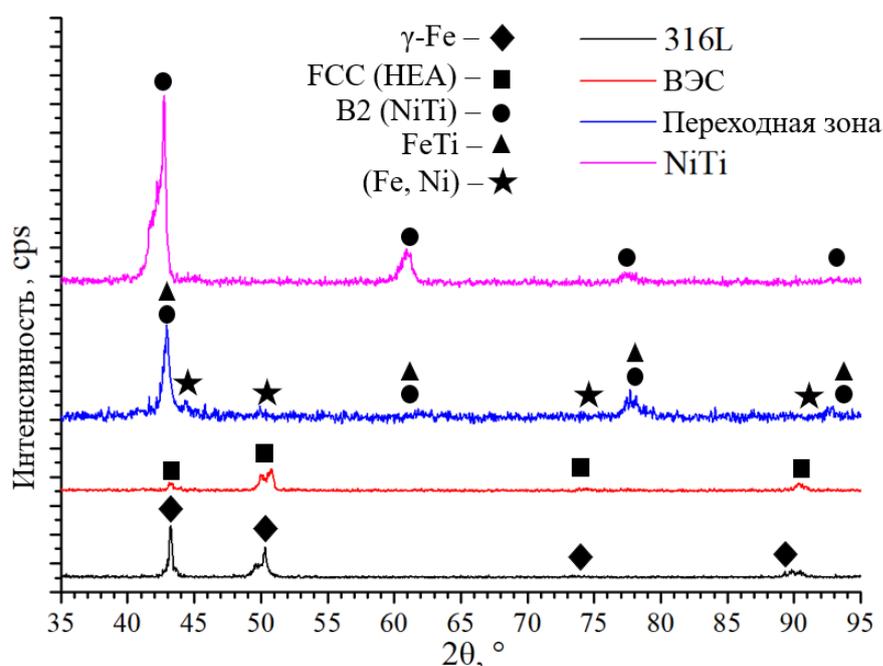


Рисунок 16 – Исследование фазового состава мультиматериального образца 316L/NiTi

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены структурно-фазовые особенности переходной зоны в мультиматериалах различных систем, полученных методом СЛП, а также исследовано её влияние на механические и функциональные свойства. Рассматривались такие группы мультиматериалов, как мультиматериалы на основе однородных сплавов, на основе разнородных свариваемых сплавов и на основе разнородных несвариваемых сплавов. Выявлены основные сходства и различия структурно-фазовых особенностей переходной зоны в рамках групп мультиматериалов.

2. В переходной зоне рассмотренных мультиматериалов на основе однородных сплавов не наблюдается большого количества дефектов. В них могут встречаться единичные поры. Наблюдается присутствие единичного смешения двух сплавов. В данной группе мультиматериалов микроструктура не имеет ярко выраженного изменения при переходе от одного сплава к другому. Исследования ширины переходной зоны на основе анализа химического состава дают неоднозначную картину – в некоторых системах ширина составляет 50 мкм (316L/FeNi64), в других около 250 мкм (ВТ6/ВТ1-0), что также подтверждается исследованиями твердости. Это может быть связано с интенсивностью диффузии элементов между сплавами. В рассмотренных мультиматериалах на основе однородных сплавов в процессе СЛП и после ТО не образуется новых фаз.

Формирование мультиматериального строения в системах на основе однородных сплавов позволяет:

- Повысить усталостные характеристики в системе ВТ6/ВТ1-0 с незначительным снижением предела прочности (примерно на 8%) и снижением относительного удлинения (на 25 %) относительно сплава ВТ6;

- Повысить прочностные свойства в системе AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu – микротвёрдость зоны Al-Si-Mg-Cu после проведения термической обработки имеет повышенные значения по сравнению с зоной AlSi10Mg (значения твердости выше на 30 %). Результаты испытаний на растяжение говорят о том, что значения механических свойств мультиматериальных образцов находятся на уровне чистого AlSi10Mg;

- Реализовать эффект изменения формы при комбинации материалов, которые данным эффектом по отдельности не обладают (система 316L/FeNi64). Наиболее эффективная область температур с точки зрения реализации максимальных перемещений – 25-215°C. При оптимальной толщине и соотношении материалов максимальное перемещение составляет 0,05L (где L – длина образца).

3. В переходной зоне рассмотренных мультиматериалов на основе разнородных свариваемых сплавов наблюдается большое количество дефектов, что связано с существенными отличиями в физических свойствах сплавов. В рассматриваемой системе повышение плотности энергии стабилизирует процесс плавления и снижает количество дефектов. Для переходной зоны БрХЦрТ В/ВЖ159 оптимальная плотность энергии составляет 325-375 Дж/мм<sup>3</sup>, для ВЖ159/БрХЦрТ В – 120-140 Дж/мм<sup>3</sup>. В данной группе мультиматериалов микроструктура не имеет ярко выраженного изменения при переходе от одного сплава к другому. Исследования химического и фазового состава, а также твёрдости говорят о том, что в зависимости от очередности формирования мультиматериала будет изменяться размер переходной зоны (БрХЦрТ В/ВЖ159 размеры – 300 мкм, ВЖ159/БрХЦрТ В размеры – 250 мкм). В переходных зонах возникают области с неоднородным химическим составом и с островковой макросегрегацией. В рассмотренных мультиматериалах на основе разнородных свариваемых сплавов в процессе СЛП и после ТО не образуется новых фаз.

Формирование мультиматериального строения в системах на основе разнородных свариваемых сплавов позволяет повысить прочностные свойства:

- Относительно чистого сплава БрХЦрТ В предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В при испытаниях на растяжение увеличивается примерно на 53%, а при испытаниях на сжатие увеличился примерно на 80%.

4. В переходной зоне рассмотренных мультиматериалов на основе разнородных несвариваемых сплавов формируется большое количество дефектов, что связано с отличием в физических свойствах и с формированием охрупчивающих фаз в процессе СЛП. Для устранения данных дефектов эффективным является

использование переходного слоя. В данной группе мультиматериалов микроструктура имеет ярко выраженное изменение при переходе от одного сплава к другому. Исследования химического и фазового составов, а также твёрдости говорят о том, что в зависимости от выбранного переходного слоя и рассматриваемой переходной зоны, её размеры будут меняться. В переходных зонах возникают области с неоднородным химическим составом и с островковой макросегрегацией. В рассмотренных мультиматериалах на основе разнородных несвариваемых сплавов в процессе СЛП не образуется новых фаз при наличии переходного слоя (за редким исключением – система 316L/NiTi):

- Предел прочности мультиматериального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, с переходными слоями Cu+Nb достигают 910 МПа.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях**

1. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Шамшурин А.И. Создание мульти-материальных образцов системы ВЖ159-BrXЦpT методом селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 175–188.

2. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Голубков Н.А. Исследование механических свойств мульти-материальных образцов системы ВЖ159-BrXЦpT, полученных методом селективного лазерного плавления // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2024. 18 (1), С. 52–61.

3. Repnin, A.; Borisov, E.; Emelianov, A.; Popovich, A. Fracture Toughness of Ti6Al4V/Cp-Ti Multi-Material Produced via Selective Laser Melting // Metals. 2023, 13, 1738.

4. Repnin, A.; Kim, A.; Popovich, A. Interfacial Characterization of Selective Laser Melting of a SS316L/NiTi Multi-Material with a High-Entropy Alloy Interlayer // Crystals. 2023, 13, 1486.

5. Repnin, A.; Borisov, E.; Maksimov, A.; Rozhkova, D.; Popovich, A. Investigation of the 4D Multi-Material 316L/FeNi36 Obtained by Selective Laser Melting // Micromachines. 2024, 15, 1288.

6. Repnin, A.; Borisov, E.; Popovich, A. Formation of the Cu+Nb Interlayer in the Inconel 718/Ti6Al4V Multi-Material Obtained by Selective Laser Melting // Materials. 2024, 17, 5801.

7. Repnin, A.; Borisov; Popovich, A. Investigation of Inconel 718/Ti6Al4V Multi-Material Obtained by Selective Laser Melting with Transition Layer // AIP Conference proceedings of the International Conference "Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology". 2024.

8. Borisov, E.; Maksimov, A.; Repnin, A.; Popovich, A. Investigation of AlSi10Mg Alloy Composition Modification by Cu Addition in Selective Laser Melting // AIP Conference proceedings of the International Conference "Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology". 2024.