

на правах рукописи



Рамазанов Ильнар Альфридович

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ Al И Ti
ДЛЯ СОЗДАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ
СТРУКТУР**

Специальность 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» (ФГБОУ ВО УУНиТ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент

Бобрук Елена Владимировна

Официальные оппоненты:

Жеребцов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов.

Найденкин Евгений Владимирович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник Лаборатории физического материаловедения сталей и сплавов.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2026 г. в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.14 ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://uust.ru/dc/dissertations/> ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

учёный секретарь диссертационного совета

Е.В. Бобрук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из направлений в авиационной промышленности является применение в конструкциях перспективной техники металлматричных композитных материалов, армированных непрерывными высокомодульными высокопрочными волокнами бора или карбида кремния с матрицами из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, полученных по технологии горячего изотермического прессования. Такие композитные структуры сочетают в себе достоинства сплавов (электро- и теплопроводность) и высокую удельную прочность волокон. Общей проблемой данной технологии отмечается деградация прочности волокон из-за химической реакции с матричным материалом при высоких температурах, а также разрушение волокон под высоким давлением при прессовании.

В работах Астанина В.В. с сотрудниками, выполненных в ИПСМ РАН в 1980-х годах, на примере композитного материала бор – алюминиевый сплав АМг6, было предложено применение эффекта сверхпластичности (СП) матричного материала для технологии твердофазного изотермического прессования композитных структур по схеме фольга-волокно-фольга. Благодаря эффекту СП, была показана возможность управления структурой поверхности раздела матрица-волокно, для снижения деградации и предотвращения разрушения волокон за счет некоторого уменьшения температуры и приложенных давлений в сравнении с используемыми на тот период технологическими приемами. В то же время был обнаружен «масштабный фактор», согласно которому эффект СП не реализуется, если в сечении деформируемого тела (в промежутке между волокнами) оказывалось менее десяти зерен. Кроме того, положительное влияние СП на примере бор-алюминия невозможно было распространить на другие материалы. В частности, СП титанового сплава ВТ6 наблюдается при температурах 900-930 °С, что совершенно недопустимо для волокон бора и, даже при использовании волокон из SiC, приводит к образованию вредной реакционной зоны на поверхности раздела матрица-волокно как показано в работах А. А. Шавнева с коллегами, выполненных в ВИАМ.

Новый виток развития обсуждаемой технологии получения композитных структур возможен с применением эффекта низкотемпературной СП ультрамелкозернистых (УМЗ) или наноструктурированных (НС) материалов, широко исследуемых в настоящее время.

В рамках диссертационной работы предлагается решение научной задачи по расширению диапазона температурно-скоростных условий технологии изготовления композитных структур, что имеет важное хозяйственное значение и способствует научно-техническим решениям на предприятиях авиационной промышленности России для получения изделий из композитных материалов.

Степень разработанности темы исследования. В последние десятилетия среди исследователей-материаловедов возрастает интерес к новому классу металлических материалов. Один из ведущих государственных научных центров ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

в области материаловедения разрабатывает технологии изготовления композитных материалов для силовой электроники и преобразовательной техники; институт физики прочности и материаловедения СО РАН проводит фундаментальные исследования в области создания композитных структур на основе титановых сплавов с использованием аддитивных технологий. NASA применяет волокна из карбида кремния в оболочке Ti-6Al-4V, поставляемые компанией FMW Composite Systems, Inc. (Кларксбург, Западная Виргиния). Сотрудники Института физики твердого тела РАН разрабатывают новые композитные материалы, армированные углеродным волокном, включая высокопрочные с Al матрицей, высокотемпературные с Ni матрицей, с высокой теплопроводностью с медной матрицей. Также в своих исследованиях показали возможность создания композитных материалов с оксидными волокнами и матрицами молибденовых сплавов, отличающихся достаточно высокой жаростойкостью. Армирование такого типа матриц оксидными волокнами с использованием кристаллизации позволяет получить композитные материалы с достаточно высокими характеристиками прочности, трещиностойкости, сопротивления ползучести при температурах до 1300 °С. Институт машиноведения УрО РАН разрабатывает новые композиции и структурно-иерархические и нейросетевые модели, которые позволяют описывать не только реологическое поведение, но и то, как в материале формируется микроструктура, и развиваются микродефекты, в условиях эксплуатации, например, при высоких температурах. НИТУ «МИСИС» ведет проекты по получению композитных структур с использованием аддитивных технологий. Белгородский государственный университет проводит исследования по созданию композитных материалов биомедицинского назначения на основе жаропрочных Ti и высокоэнтропийных сплавов, армированных частицами бора. В Сибирском федеральном университете разрабатываются композитные структуры, армированные наночастицами, в частности, для создания электродов контактной сварки.

Анализ литературы показывает перспективность применения композитных материалов, особенно в авиационной технике, однако для дальнейшего продвижения в этом направлении необходимо совершенствование технологических температурно-скоростных условий процесса изготовления композитных структур, обеспечивающих сохранение целостности армирующих волокон и образования прочной связи матрица-волокно. В связи с вышеизложенным сформулированы цель и задачи работы.

Цель работы: сформировать наноструктурированные состояния в фольговых полуфабрикатах сплавов на основе Al и Ti для создания матричного материала композитных структур, армированных непрерывными волокнами, путем прессования в режиме низкотемпературной сверхпластичности для применения в авиационной технике.

Для достижения цели работы решались следующие **задачи:**

1. Разработать метод получения с помощью термомеханической обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию и последующую изотермическую

прокатку, фольгового полуфабриката из наноструктурированного сплава 1565ч системы Al-Mg-Mn для изготовления армированной композитной структуры; получить фольговый полуфабрикат из Ti ультрамелкозернистого сплава ВТ6 с помощью термомеханической обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию и последующую изотермическую прокатку;

2. Изучить структуру и механические свойства наноструктурированных сплавов на основе Al и Ti для определения температурно-скоростных режимов изготовления армированной композитной структуры в условиях низкотемпературной сверхпластичности;

3. Провести компьютерное моделирование по установленным реологическим характеристикам процесса прессования матричного материала в присутствии волокон бора с обеспечением режима низкотемпературной сверхпластичности на всех этапах деформации образцов с композитной структурой;

4. Разработать научно-обоснованный технологический подход получения композитных структур прессованием в режиме низкотемпературной сверхпластичности, установленного для каждого сплава на основе Al и Ti с распространением полученных результатов на другие сплавы Al по их технологическому применению; исследовать их механические свойства в условиях статических, циклических и ударных нагрузок.

Научная новизна

1. Установлено, что в результате термомеханической обработки, включающей равноканальное угловое прессование по схеме Конформ и последующую прокатку в условиях низкотемпературной сверхпластичности, в фольговом полуфабрикате толщиной 0,2 мм из сплава 1565ч формируется ультрамелкозернистая структура с размером зерен 230 нм и наночастицами размером до 30 нм, которые повышают устойчивость зерен к укрупнению в процессе низкотемпературной деформации. При этом существующие аналоги с мелкозернистой структурой (размер зерен 6-15 мкм) производят в виде листового полуфабриката толщиной от 3 до 10 мм.

2. Впервые на основе анализа структуры, температурно-скоростных условий реализации низкотемпературной сверхпластичности, а также компьютерного моделирования установлены реологические параметры (напряжение, скорость, температура) процесса прессования (температура не более $0.6T_{пл}$ и скорости деформации 10^{-2} и 10^{-3} с^{-1}) композитных структур на основе наноструктурированного сплава 1565ч или ультрамелкозернистого ВТ6, армированных непрерывными волокнами бора диаметром 140 мкм.

3. Продемонстрирован научно-обоснованный технологический подход получения армированных композитных структур прессованием в режиме низкотемпературной сверхпластичности матричного материала на основе наноструктурированного Al или ультрамелкозернистого Ti сплавов в виде фольги толщиной 0,2 мм, что: обеспечило заполнении зазоров между непрерывными волокнами и снижение температуры

прессования с 550 °С до 300 °С Al матрицы и с 930 °С до 650 °С Ti матрицы, по сравнению с существующими режимами прессования мелкозернистых аналогов (6-15 мкм); привело к формированию на поверхности раздела матрица-волокно наноразмерных боридов размером до 100 нм, в отличие от грубых выделений и сплошных реакционных зон.

4. Показано увеличение механических свойств образцов армированных композитных структур в условиях статических, циклических и ударных нагрузок, которые превышают не менее, чем на 20 % значения существующих аналогов. Образцы с композитной структурой Al-B демонстрируют прочность при изгибе 1345 МПа, значение ударной вязкости 160 кДж/м², предел ограниченной выносливости 500 МПа; образцы с композитной структурой Ti-B демонстрируют прочность при изгибе 2420 МПа, значение ударной вязкости 510 кДж/м², предел ограниченной выносливости 1300 МПа.

Теоретическая значимость заключается в:

1. Получении новых результатов в области исследования формирования в фольговом материале специальных микроструктур сплава 1565ч, содержащих наноразмерные частицы вторых фаз размером до 30 нм, имеющие важное значение для реализации низкотемпературной сверхпластичности, носит универсальный характер и применим к сплавам других систем легирования, в частности 2024 и 7475, для использования в качестве матрицы при создании композитных структур.

2. Определении с помощью компьютерного моделирования и физического эксперимента рациональных условий для заполнения матричным материалом из наноструктурированного сплава межволоконного пространства шириной ≥ 16 мкм в образцах с армированной композитной структурой, что позволяет увеличить плотность укладки волокон и повысить их механические свойства.

3. Исследовании наноразмерных боридов (до 100 нм), которые образуются в процессе формирования композитной структуры, исключают деградацию волокон бора и обеспечивают прочную связь по границе раздела волокна с матрицей.

Практическая значимость:

1. Предложен метод получения наноструктурированного фольгового полуфабриката толщиной 0,2 мм из сплава 1565ч системы Al-Mg-Mn для создания армированных композитных структур с применением низкотемпературной сверхпластичности. А именно, равноканальное угловое прессование по схеме Конформ при температуре 200 °С, 6 проходов и последующая изотермическая прокатка со скоростью деформации 0,4 с⁻¹, с суммарной степенью обжатия 98 %: 30 проходов со степенью деформации при каждом проходе не более 10 %.

2. Предложен технологически пригодный подход получения композитных структур с металлической матрицей из сплавов на основе Al и Ti, армированных волокнами бора, включающий в себя прессование в изотермических условиях в режиме

низкотемпературной сверхпластичности с приложением давления для его уплотнения; для достижения полной металлической связи слоев фольги и связи по границе матрица-волокно, на финальной стадии прессования необходимо повышение температуры на 50 °С и выдержка под давлением при этой температуре.

3. Показан пример экспериментальной оптимизации температурно-скоростных режимов прессования в изотермических условиях образцов с армированной композитной структурой, состоящих из фольги наноструктурированного сплава 1565ч или ультрамелкозернистого сплава ВТ6 и непрерывного волокна бора диаметром 140 мкм. Использование наноструктурированных матриц из сплавов 7475 и 2024 подтвердило работоспособность подхода для получения образцов композитных структур прессованием в установленных условиях низкотемпературной сверхпластичности.

Методология исследования. В качестве объектов исследования выбраны промышленные термически неупрочняемый сплав 1565ч системы Al-Mg-Mn, термически упрочняемые сплавы 7475 системы Al-Zn-Mg-Cu и 2024 системы Al-Cu-Mg, титановый сплав ВТ6 системы Ti-Al-V, высокопрочные волокна бора. В качестве **методов обработки** объектов исследования использовали ИПД методами кручения под высоким давлением (КВД) или равноканальным угловым прессованием по схеме Конформ (РКУП-Конформ), всестороннюю ковку. Изотермической прокаткой в режиме близком к низкотемпературной СП, получены фольги с УМЗ структурой. Образцы композитных структур получали прессованием в изотермических условиях в вакуумном контейнере по схеме «фольга–волокно–фольга». В работе использована терминология: УМЗ структура, НС состояние/сплав/ материал.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод формирования наноструктурированного состояния, а именно, структура с размером зерен 230 нм, содержащая частицы размером до 30 нм, в фольговом полуфабрикате из алюминиевого сплава 1565ч для армированных композитных структур с помощью термомеханической обработки, включающей равноканальное угловое прессование по схеме Конформ и последующую изотермическую прокатку.

2. Реализация низкотемпературной сверхпластичности ($\leq 0,6T_{пл}$) осуществляется за счет формирования ультрамелкозернистой структуры в фольге из сплава 1565ч с размером зерен 100-230 нм и частицами размером до 30 нм в теле и по границам зерен.

3. Численные модели технологических режимов (температура, скорость, размер межволоконного пространства) получения бездефектных образцов композитных структур из фольг наноструктурированного сплава 1565ч или ультрамелкозернистого сплава ВТ6 и непрерывного волокна бора в условиях сверхпластической деформации ($\leq 0,6 T_{пл}$).

4. Технологический подход для получения образцов с армированной композитной структурой прессованием по схеме «фольга – волокно – фольга» в вакуумном контейнере из наноструктурированных Al сплавов 1565ч, 7475, 2024 или ультрамелкозернистого Ti

сплава ВТ6 и непрерывного волокна бора диаметром 140 мкм в режиме низкотемпературной сверхпластичности матричного сплава.

Степень достоверности результатов исследований в рамках диссертационной работы, обеспечивалась применением современных методик исследования на поверенном оборудовании, в том числе на уникальных научных установках, моделированием методом конечного элемента. Достоверность результатов исследования подтверждена сходимостью полученных данных с результатами мировых исследований, представленных в литературе. Результаты проведённых исследований проходили рецензирование в высокорейтинговых научных журналах и апробированы на отечественных и международных конференциях. Достоверность подтверждена актами использования результатов АО «Институт технологии и организации производства», ООО «СКАУТ», ООО «Смарт Комплишен Технолоджи». Исследования выполнены в рамках работ по: гранту ФЦП №13.2251.21.0196; гранту РНФ №22-29-00866 «Создание высокопрочных металломатричных композитов на основе наноструктурных алюминиевых сплавов, армированных непрерывными волокнами»; гранту РНФ №24-19-00819 «Исследование и разработка сверхпластичной ультрамелкозернистой металлической матрицы из легких сплавов для создания высокопрочных композитов, армированных непрерывными волокнами»; а также государственного задания № FRRR-2026-0005 «Исследование новых материалов покрытий полученных методом ассистированного вакуумно-дугового осаждения, для упрочнения металлорежущих инструментов из твердого сплава применяемых для обработки материалов авиадвигателестроительной отрасли».

Апробация результатов. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на отечественных конференциях: международная конференция «Физика и технология перспективных материалов», г.Уфа, 2023г.; международная конференция «Кайбышевские чтения», г.Уфа, 2023г.; всероссийская конференция по наноматериалам, г.Москва, 2023 г.; открытая школа – конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы», г.Уфа, 2024г.; международной конференция «Авиация и космонавтика», г.Москва, 2024г.; всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения», г.Уфа, 2024г.; Международная конференция «Nanomaterials Days», г.Уфа, 2024г.; Байкальский материаловедческий форум, г.Улан-Удэ, 2025г.; Петербургские чтения по проблемам прочности, г.Санкт-Петербург, 2026г.

Вклад автора заключается в поиске и анализе научной литературы по теме работы. Автор совместно с научным руководителем определил цели и задачи исследования, непосредственно выполнял экспериментальные исследования, участвовал в перепроверке достоверности полученных результатов. В рамках проектов РНФ, в составе научной группы, автором проведена аттестация микроструктуры и свойств экспериментальных образцов из НС сплавов на основе Al и Ti; на основе моделирования

методом конечных элементов (МКЭ) изготовлены образцы с композитной структурой с НС матрицей, проведена аттестация их механических свойств. Самостоятельно спроектировал и изготовил оснастку, необходимую для вакуумного изотермического прессования образцов с композитной структурой и устройства для их испытания. Совместно с соавторами, принимал участие в интерпретации и обсуждении результатов экспериментов, подготовке, написании и публикаций статей.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы представлены соискателем в 11 научных публикациях в журналах, входящих в список журналов, рекомендованных ВАК РФ и/или международных наукометрических базах Web of Science и/или Scopus, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объём. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 106 наименований, изложена на 129 страницах, содержит 57 рисунков и 17 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность профессору В.В. Астанину за ценные консультации в проведении научных исследований по созданию композитных структур, а также своим коллегам из ЦКП «Нанотех» УУНиТ, соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми создан задел для последующей постановки и реализации основных идей диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы, выдвинуты положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертационной работы, посвященный анализу современного состояния научных исследований в области металломатричных композитных материалов. Особое внимание уделено разработкам в области получения композитных структур, армированных непрерывными волокнами; а также анализу получения листовых полуфабрикатов.

Во второй главе приведены материалы исследования и описаны методы проведения исследований. Материалами исследования в качестве матриц композитных структур выбраны алюминиевые сплавы: 1565ч системы Al-Mg-Mn (Al – 5.66 Mg – 0.86 Mn – 0.73 Mn – 0.04 Si), 7475 системы Al-Zn-Mg-Cu (Al – 5.70Zn – 2.20Mg – 1.60Cu) и двухфазный титановый сплав ВТ6 системы Ti-Al-V (Ti – 6.14Al – 4.16V – 0.03Zr – 0.03Si – 0.11Fe). В качестве армирующего элемента использовались непрерывные высокопрочные волокна бора диаметром 140 мкм и временным сопротивлением 3100 МПа. Для расширения набора структурно-фазовых состояний исследуемых сплавов в работе использовались известные методы обработки ИПД, такие как КВД при комнатной температуре (КТ) 10 оборотов, РКУП-Конформ, 6 проходов при 200 °С и

всесторонняя ковка с понижением температуры от 800 до 650 °С с изменением осей деформации заготовок. Для получения фольгового полуфабриката под композитный материал и сохранения УМЗ однородной структуры с преимущественно большеугловыми границами зерен (БУГз) полученные образцы прокатывали на шестивалковом прокатном стане производства HANKOOK M-TECH Industries, оснащенном системой нагрева рабочих валков собственной конструкции до толщины 0,2 мм в изотермических условиях, определенных в результате оценки термической стабильности материала (для Al сплава при 200 °С, для Ti – 550 °С), скорость деформирования составила 0,4 с⁻¹. Суммарная степень обжатия 98 %: 30 проходов вдоль образца со степенью деформации при каждом проходе не более 10 %. Выбор способа и режима прокатки продиктован требованием сохранения НС состояния. Проведены механические испытания на растяжение для сплава 1565ч при температурах 250, 300, 350 и 400 °С; для сплава 7475 при 170 и 200 °С; для сплава 2024 при 240 и 270 °С; для сплава ВТ6 при 600 и 650 °С. Моделирование процесса прессования пакета из чередующихся слоев фольга-волокно проводили с использованием программного комплекса «Деформ», лицензия ПК СФТС, ключ №9190/Уфа, Россия. Ввиду симметрии образца модель размером 5×5 мм разбита на ячейки 0,02 мм с выдвиганием переднего фронта для математического описания течения материала матрицы в межволоконное пространство. Образец с армированной композитной структурой, изготовлен прессованием в изотермических условиях по схеме «фольга–волокно–фольга». Формировался многослойный пакет, содержащий пять слоев Al или Ti фольги толщиной 0,2 мм и четыре слоя волокон.

Во третьей главе рассмотрено формирование НС состояния сплава 1565ч в процессе ТМО и его влияние на СП поведение при температурах в интервале 200-400 °С и скоростей деформации 10⁻² – 10⁻⁴ с⁻¹ в фольговом полуфабрикате для получения армированных композитных структур.

В результате ТМО, включающей отжиг при температуре 380 °С с последующим охлаждением в воде, РКУП-Конформ при 200 °С и изотермическую прокатку при 200 °С, сформирована УМЗ структура с размером зерен 230±5 нм и частицами вторых фаз размером 10-30 нм как в теле, так и по границам зерен в сплаве 1565ч (Рисунок 1). Рентгенофазовый анализ установил наличие пиков от частиц фаз Al₆Mn и Mg₂Si, а также от частиц β-фазы Al₃Mg₂.

В полученном фольговом полуфабрикате толщиной 0,2 мм сплава 1565ч установлен эффект высокоскоростной низкотемпературной СП при температуре 300 °С, скорости деформации 10⁻² с⁻¹. При максимальном значении напряжения течения 85 МПа, удлинения достигли 660 %, параметр $m \approx 0,42$ при степени деформации 150-400 % (Рисунок 2). Установлено, что положительное влияние на высокие значения пластичности в НС сплаве 1565ч оказывает не только УМЗ структура с размером зерен 230 нм, но и наноразмерные частицы фазы Al₃Mg₂ по границам зерен, которые в процессе

деформации сдерживают укрупнение зерен за счет уменьшения их подвижности.

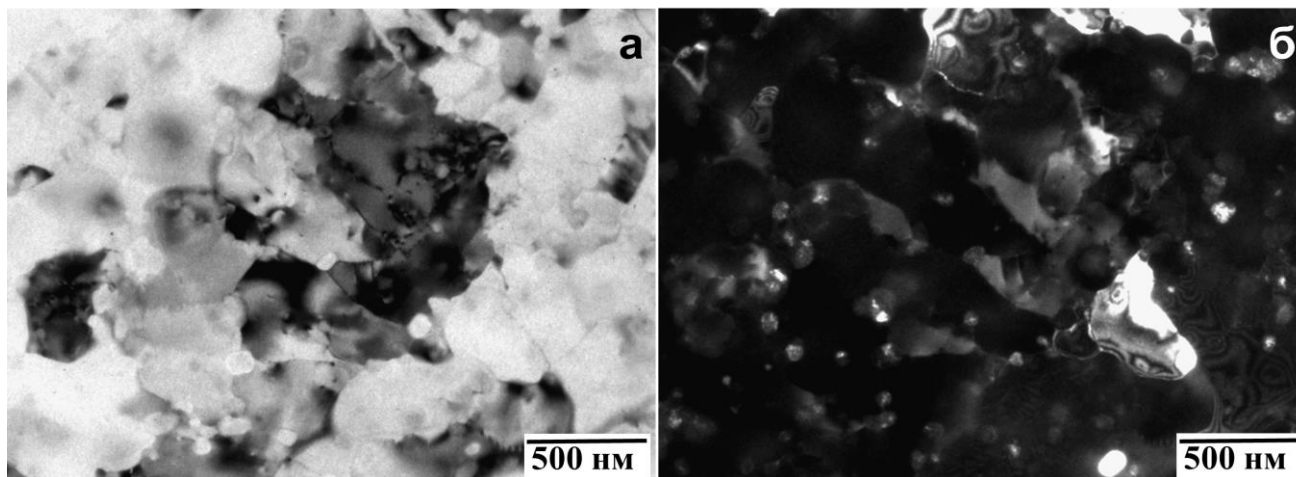


Рисунок 1 – Микроструктура НС сплава 1565ч в состоянии после обработки РКУП-Конформ + прокатка (в плоскости фольги), светлое поле (а) и темное поле (б), ПЭМ

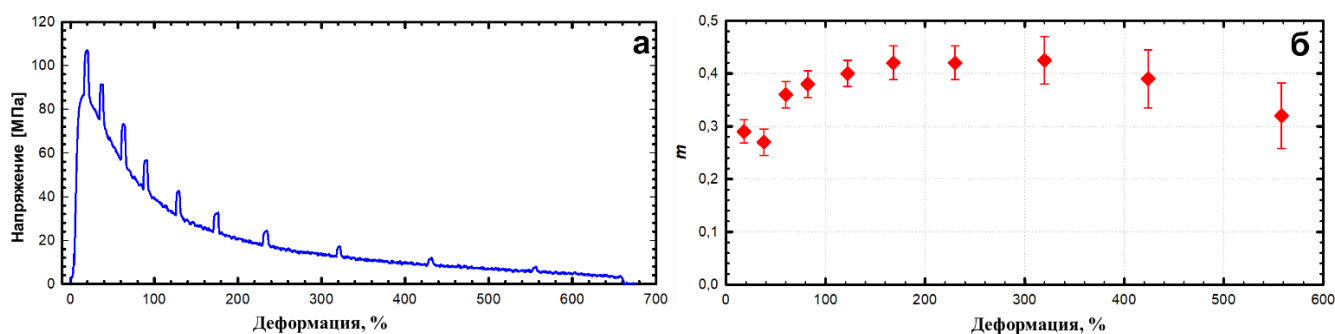


Рисунок 2 – Напряжение течения - удлинение (а) и изменение коэффициента скоростной чувствительности в процессе испытания на растяжение при температуре 300 °С, $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \leftrightarrow 5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ НС сплава 1565ч (испытание с переключением скоростей)

Сплав 1565ч в НС состоянии характеризуется условным пределом текучести 400 ± 5 МПа, пределом прочности 450 ± 5 МПа при относительном удлинении до разрушения $18 \pm 0.5\%$, микротвердостью 158 ± 4 HV при КТ. Указанные прочностные характеристики превосходят соответствующие значения механической прочности сплава в состоянии после традиционной холодной прокатки: условный предел текучести 330 ± 3 МПа, предел прочности 380 ± 6 МПа при относительном удлинении до разрушения $16 \pm 0.2\%$, 110 ± 2 HV. Однородность структуры, сформированной в результате интенсивной пластической деформации (ИПД) методом РКУП-Конформ, а также преобладание БУГз над малоугловыми, позволили сохранить высокую стабильность структуры и свойств после реализации СП при температуре 300 °С, скорости деформации 10^{-2} с^{-1} (предел прочности 400 МПа, пластичность 30 %).

Получив реологические характеристики для режима СП в исследуемых заготовках НС сплава 1565ч, осуществили компьютерное моделирование прессования композитного материала при температурах 300, 350 и 400 °С, что позволило оценить напряженно-деформированное состояние и поведение матрицы на разных стадиях процесса.

Принимая во внимание типичные деформации (гипотезу единой кривой), возникающие при изотермическом прессовании, использованы кривые растяжения с удлинением до 150 %, когда показатель m выходит на максимальное значение. Моделирование показало, что наиболее интенсивная деформация происходит в тонком слое у границы с волокном, где можно ожидать активной реакции. Оценены эквивалентные напряжения, накопленная пластическая деформация и контактное давление. Эквивалентные напряжения в волокне приобретают максимальное значение 240 МПа на стадии 50 % прессования, но в этом случае преобладает схема всестороннего сжатия, не угрожающая разрушением волокнам (Рисунок 3).

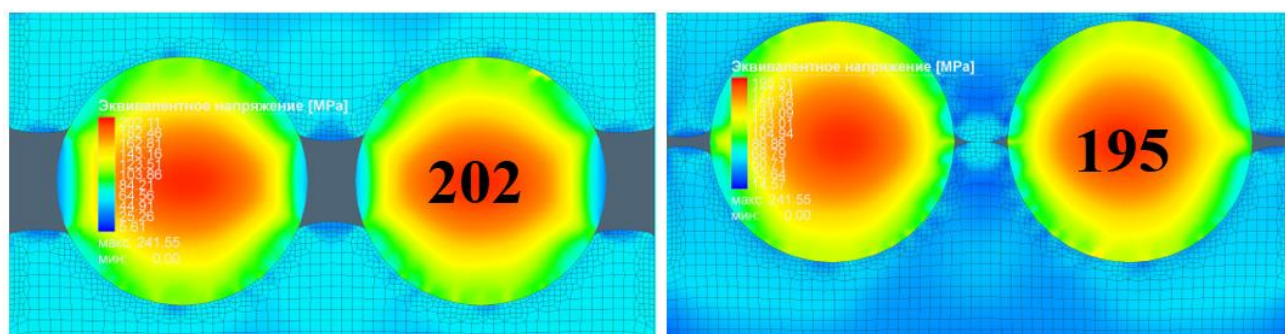


Рисунок 3 – Эквивалентные напряжения в волокне на этапах прессования 50 и 90 % при температуре 300 °С

По результатам моделирования изготовлен образец с композитной структурой с НС (Рисунок 4) и мелкозернистой (с размером зерен 15 мкм) матрицами. Прессование образцов Al матрица – борное волокно проводилось на универсальной испытательной машине INSTRON 5982 с программным обеспечением Bluehill 3 в вакуумном контейнере со скоростью деформации 10^{-2} с^{-1} при температуре 300 °С для НС матрицы и при температуре 520 °С для мелкозернистой матрицы;

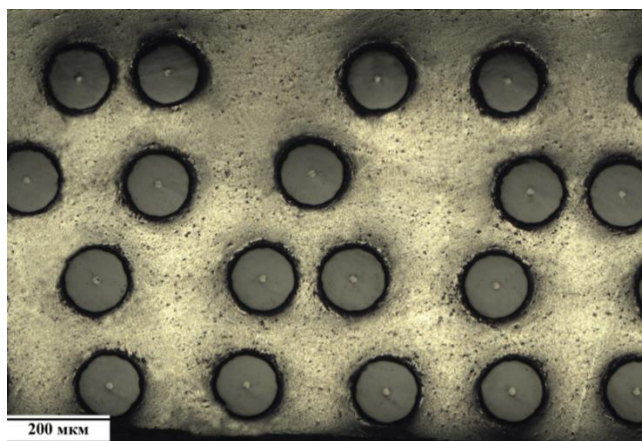


Рисунок 4 – Композитная структура с НС Al матрицей (поперечное сечение)

Таким образом, показана возможность реализации низкотемпературной СП в фольговом Al полуфабрикате для технологии изготовления композитных структур с армированием борным волокном. Однако разработка перспективных авиационных двигателей требует применение матриц из титановых сплавов.

В четвертой главе, в том числе с применением компьютерного моделирования, на примере сплава ВТ6 показана возможность создания композитной структуры с Ti матрицей с УМЗ структурой в условиях низкотемпературной СП. УМЗ структура в сплаве ВТ6 получено по ранее

установленным режимам ТМО, включающей всестороннюю ковку со сменой осей деформации заготовок в условиях постепенного охлаждения от 800 до 650 °С и изотермическую прокатку при температуре 560 °С В.В. Астаниным и О.А. Кайбышевым (Патент № 2320771, 2008 г).

В фольговом полуфабрикате сплава ВТ6 после ТМО сформирована УМЗ структура, представляющая собой смесь субзерен и зерен с БУГз, размер структурных фрагментов (зерна/субзерна) составил 160 ± 7 нм. Высокая плотность дислокаций ($2.5 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$) вызывает высокий уровень остаточных напряжений и значительное коробление фольги. Выравнивание фольги, необходимое для сборки пакетов, и окончательное формирование структуры достигнуты в результате отжига для снятия напряжений в установленных условиях: 650 °С, 15 минут.

Для определения температурно-скоростных условий реализации низкотемпературной СП в фольге толщиной 0,2 мм сплава ВТ6 с УМЗ структурой проведены испытания на растяжение с переключением скоростей при температурах 600 и 650 °С (Рисунок 5).

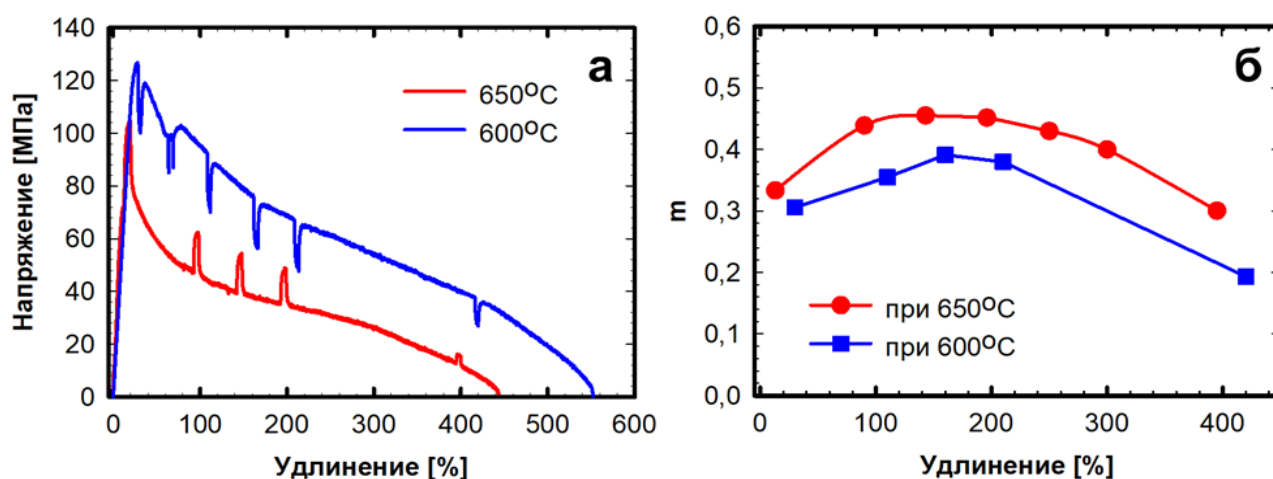


Рисунок 5 – Кривые растяжения, полученные процессе испытания на растяжение при температуре 600, $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \leftrightarrow 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и 650 °С, $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \leftrightarrow 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ сплава ВТ6 (испытание с переключением скоростей)

Рентгеновские профили прокатанного, отожженного состояний и состояния по низкотемпературной СП показали, что прокатанное состояние материала характеризуется расширенными пиками (Рисунок 6). Это говорит о высокой плотности дислокаций. Отжиг для снятия напряжений привел к заметному уменьшению ширины пиков и разделению компонентов $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$. СП деформация дополнила сужение пиков в сочетании с некоторым снижением их интенсивности, что можно связать с ослаблением кристаллографической текстуры в результате усиления роли зернограничного проскальзывания. Количественный рентгеноструктурный анализ показал, что после прокатки плотность дислокаций достигает $2.5 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$, отжиг снижает ее до значений $4.9 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, СП деформация приводит к снижению плотности дислокаций до $0.6 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

В результате деформации в условиях низкотемпературной СП наблюдается некоторый рост зерен: после деформации при 650 °С и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ размер зерен достигает 400 нм, а при $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ – 500 нм, при этом формируется более однородная структура, чем после отжига, с преобладающей долей БУГЗ.

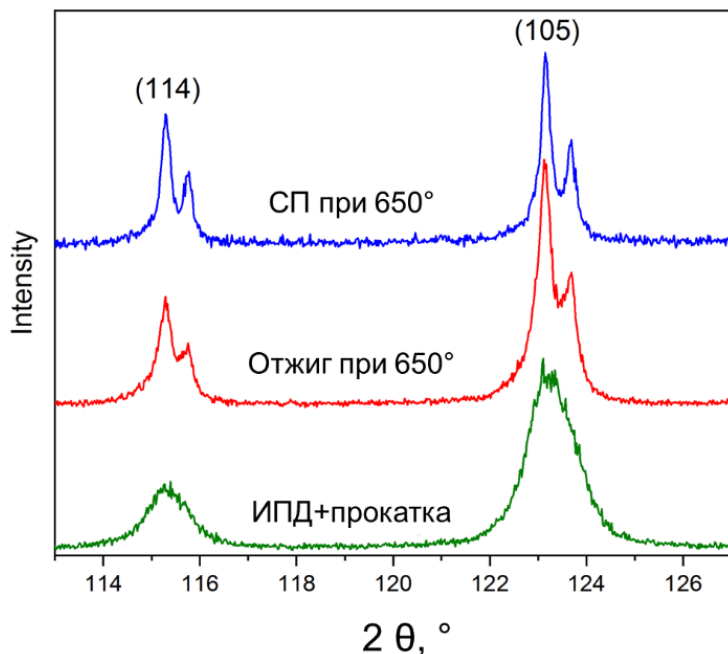


Рисунок 6 – Рентгеновские профили при больших углах дифракции, показывающие различное уширение пиков, соответствующих состояниям после прокатки, отжига и СП

поверхности Ti фольги, которая не растворяется в сплаве при температуре 650 °С.

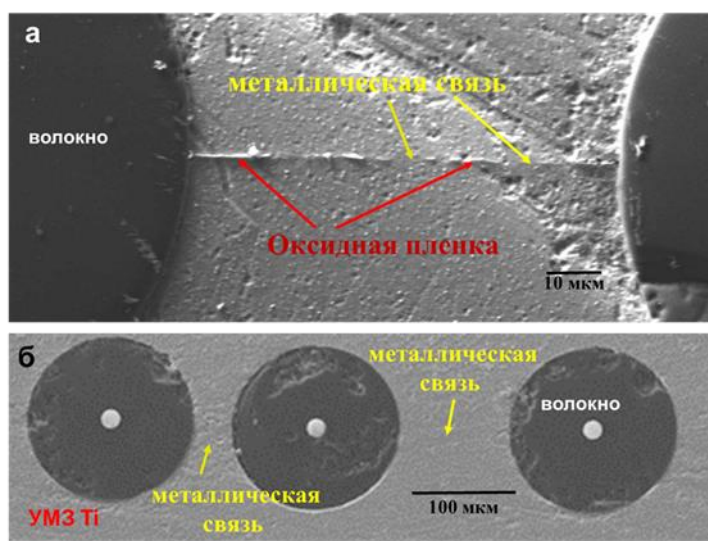


Рисунок 7 – Композитная структура Ti-B: присутствие оксидной пленки (а) без оксидной пленки (б) (поперечное сечение)

Результаты физического эксперимента и компьютерного моделирования процесса прессования образцов с композитной структурой из Ti матрицы с УМЗ структурой и борного волокна позволили проанализировать полноту формирования металлической связи между слоями фольги и продуктов реакции матрица-волокно, что связано с интенсивностью деформации в процессе прессования. При затекания матричного материала в пространство между волокнами интенсивности деформации порядка 1 недостаточно для разрывов оксидной пленки на

При увеличении интенсивности деформации до 1,5 пленка разрушается быстрее и в результате образуется островковый характер соединения (Рисунок 7а).

Для получения полной металлической связи необходимо применение дополнительного отжига под давлением при 700 °С на финальной стадии прессования (Рисунок 7б). Второй задачей моделирования является оценка реакций на контактируемых поверхностях с помощью оценки

локальной скорости деформации в зоне контакта одной поверхности с другой. На финальном этапе прессования скорость деформации достигает значений порядка 2,5, что как раз и обеспечит прочные металлические связи матрица-матрица и матрица-волокно. Продукты взаимодействия (бориды) матрицы-волокно отвечают за прочность межкомпонентной связи и деградацию волокон (Рисунок 8а). Соединение матриц в зазоре между волокнами имеет островной характер с достаточной долей металлической связи. Отсутствует непрерывная зона реакции, обычно возникающая при высокотемпературной компрессии на границе раздела матрица-волокно. Вместо этого присутствуют дисперсно-распределённые продукты взаимодействия – бориды титана размером менее 100 нм согласно анализу локального распределения элементов.

В процессе моделирования и эксперимента установлено, что при зазоре между волокнами 20 мкм обнаружено полное соединение слоев. Заполнение остается идеальным свыше 16 мкм, дальнейшее уменьшение зазора не позволяет заполнить межволоконное пространство и соединить слои в этом режиме прессования (Рисунок 8).

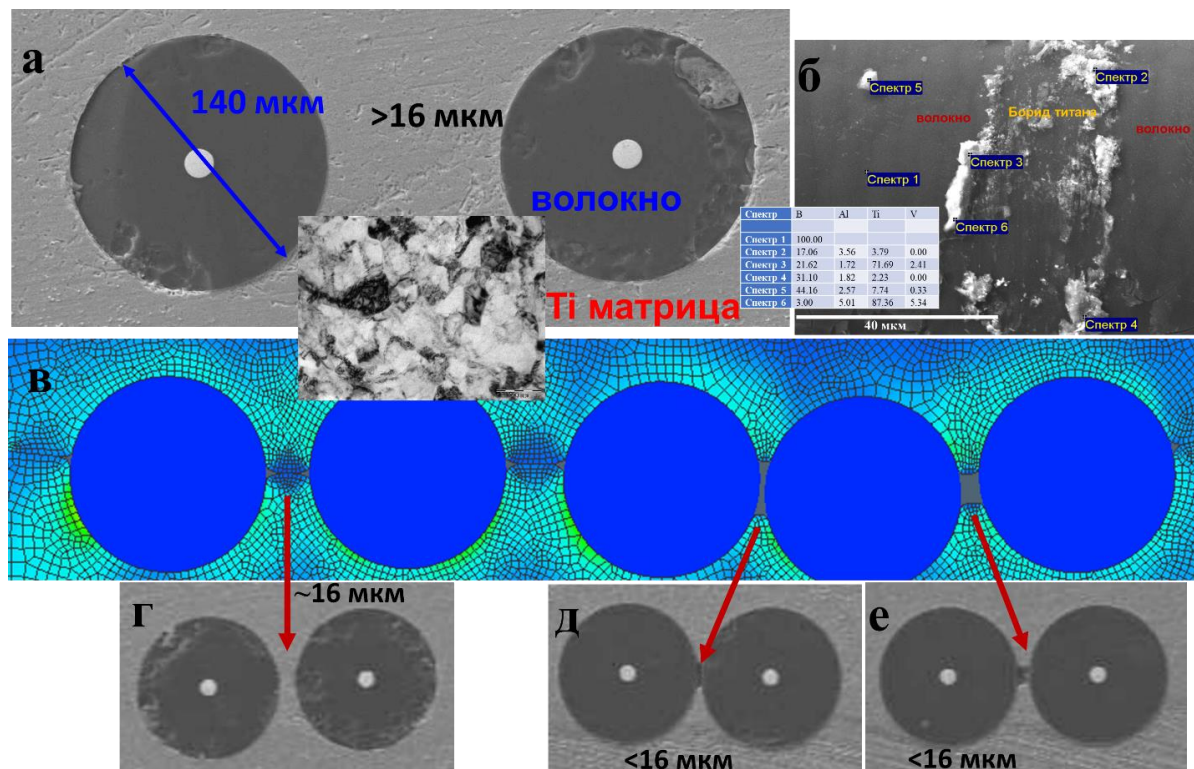


Рисунок 8 – Композитная структура Ti-B (а,б, г-е); поверхность волокна с боридами (а); моделирование процесса прессования (в)

В пятой главе представлена оценка механических свойств образцов с композитной структурой. С целью комплексного исследования механических свойств образцов все испытания проводили на трехточечный изгиб при КТ в условиях статических, циклических и ударных нагрузок. В результате испытаний на ударный изгиб образцов с НС Al матрицей (сплав 1565ч) и борного волокна, используя маятниковый копер со скоростью удара 3,8 м/с, значение ударной вязкости матричного материала составило 40 кДж/м², значение ударной

вязкости композитной структуры составило 160 кДж/м^2 . Образец с Ti матрицей с УМЗ структурой (сплав ВТ6) и борного волокна в тех же условиях испытания продемонстрировал значение ударной вязкости 510 кДж/м^2 , значение ударной вязкости матричного материала 380 кДж/м^2 .

Статические испытания на изгиб образцов с композитной структурой Al-B показали уровень прочности $1380 \pm 5 \text{ МПа}$, при этом матричный материал показал уровень прочности $780 \pm 5 \text{ МПа}$. Угол изгиба до появления трещины составил 6° . Статические испытания образцов с композитной структурой Ti-B показали уровень прочности $2430 \pm 5 \text{ МПа}$, при этом матричный материал демонстрирует уровень прочности $1920 \pm 5 \text{ МПа}$.

Уровень напряжений для усталостных испытаний по ГОСТ 25.502-79 установлен в диапазоне от 300 до 650 МПа с шагом 50 МПа для Al-B и от 1100 до 1500 МПа с шагом 100 МПа для Ti-B. Частота нагружения составляла 10 Гц, число циклов нагружения 10^6 . Диаметр нагружающего пуансона 3 мм, расстояние между опорами 8 мм. Испытания проводились до появления трещин. Предел ограниченной выносливости образцов композитного материала Al-B увеличился с 320 МПа до 500 МПа, композитного материала Ti-B – с 800 МПа до 1300 МПа относительно матрицы.

Достигнутое повышение усталостных свойств образцов с композитной структурой связано с формированием однородного высокопрочного НС или УМЗ состояния в матричном материале, высокой прочностью волокна и связи на поверхности раздела матрица-волокно (бориды размером менее 100 нм). Трещин, уходящих вглубь материала перпендикулярно основной плоскости излома и характерных для традиционных слоистых или волокнистых композитных материалов, не обнаружено (Рисунок 9).

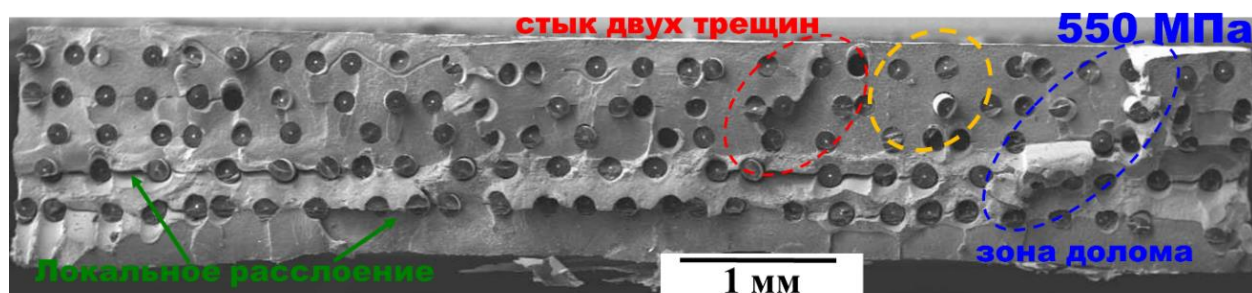


Рисунок 9 – Поверхность разрушения композитной структуры после нагружения 550 МПа

Для расширения набора структур матричного материала и расширения температурно-скоростных условий изготовления композитных материалов по результатам исследований микроструктуры и деформационного поведения также установлены температурно-скоростные условия реализации низкотемпературной СП сплавов 7475 и 2024 с размером зерен 100 нм и частицами вторых фаз (Рисунок 10, Таблица 1).

Наноразмерные частицы вторых фаз MgZn_2 (сплав 7475) и CuAl_2 (сплав 2024) по границам зерен размером 10-20 нм в процессе СП деформации сдерживают укрупнение зерен за счет уменьшения их подвижности в процессе низкотемпературной СП.

Таблица 1. Итоговые результаты изготовления образцов с композитной структурой и их свойства

Свойства	Композитная структура		Аналог, по литературным данным	
Ударная вязкость, кДж/м ²	НС 2024 + борное волокно (V=25%), d=100 нм, T= 270 °C ε̇ = 10 ⁻³ с ⁻¹	170	2124 - SiC _w + SiC _p [3]	-
Предел прочности при трехточечном изгибе, МПа		1200		-
Прочность при растяжении, МПа		-		526-585
Ударная вязкость, кДж/м ²	НС 1565ч + борное волокно (V=24%), d=230 нм, T= 300 °C ε̇ = 10 ⁻² с ⁻¹	160	Боралюминиевый МКМ марки ВКА-2 [4]	0,030
Предел прочности при трехточечном изгибе, МПа		1345		1700
Прочность при растяжении, МПа		-		1250
Предел выносливости при трехточечном изгибе, 10 ⁶ , МПа		500		-
Предел выносливости при растяжении, 10 ⁶ , МПа		-		650
Ударная вязкость, кДж/м ²	НС 7475 + борное волокно (V=25%), d=180 нм, T= 170 °C ε̇ = 10 ⁻³ с ⁻¹	165	7075 - SiC+Ti [1] / 7075 - SiC _p +Cr _p [2]	-
Предел прочности при трехточечном изгибе, МПа		1200		-
Прочность при растяжении, МПа		-		527 / 549
Ударная вязкость, кДж/м ²	НС ВТ6 + борное волокно (V=25%), d=200 нм, T= 650 °C ε̇ = 10 ⁻³ с ⁻¹	510	Ламинированный композит Ti– Al3Ti–Al–Al3Ti	-
Предел прочности при трехточечном изгибе, МПа		2500		380
Предел выносливости при трехточечном изгибе, 10 ⁶ , МПа		1200		-
Прочность при растяжении, МПа		-		-
		-	Ti-6Al-4V+ SiC марки SCS-6 (35%)	1690
		-	Ti-6Al-4V+ SiC марки SCS-6 (28- 38%)	1700-2400

По установленным режимам низкотемпературной СП изготовлены качественные образцы с композитной структурой из борного волокна и матриц НС сплавов 7475 или 2024, что подтверждает состоятельность предложенной технологии благодаря уникальному сочетанию НС матричного материала, высокопрочного волокна и реализации низкотемпературной СП. НС материал обеспечивает высокую удельную поверхность и реакционную способность, низкотемпературная СП позволяет сохранить НС состояние и

избежать деградации борных волокон.

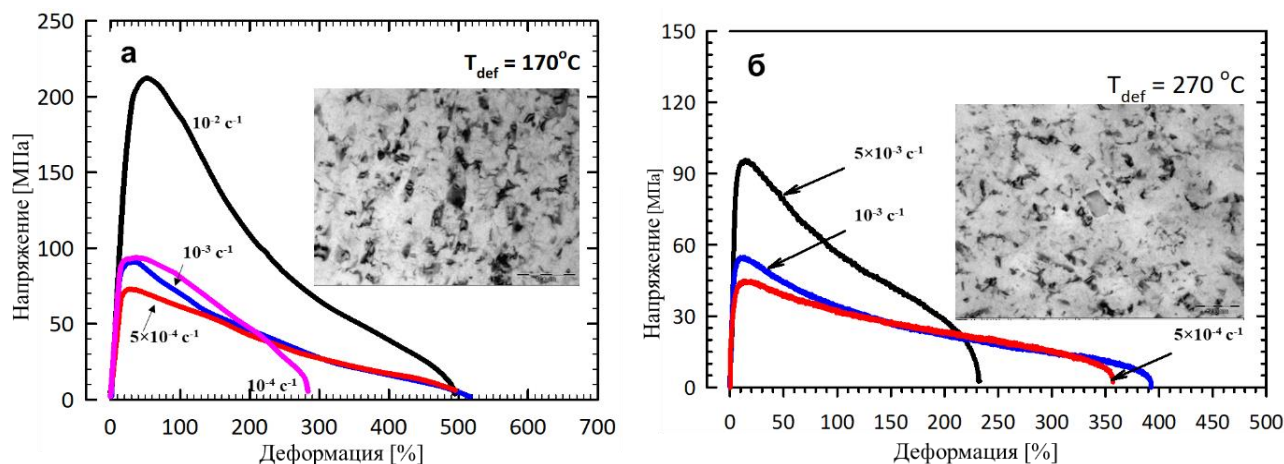


Рисунок 10 – Кривые растяжения и структура НС сплава 7475 (а); НС сплава 2024 (б), используемых в качестве матрицы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод получения наноструктурированного фольгового полуфабриката толщиной 0,2 мм сплава 1565ч, включающий отжиг при температуре $380^\circ C$, РКУП-Конформ при $200^\circ C$ и последующую изотермическую прокатку при $200^\circ C$. Данное состояние характеризуется УМЗ структурой с размером зерен 230 нм и частицами вторых фаз размером 10-30 нм как в теле, так и по границам зерен, которая позволила реализовать низкотемпературную СП при скорости деформации $10^{-2} c^{-1}$ и температуре $300^\circ C$; при значении напряжения течения 85 МПа максимальные удлинения достигли 660 %, параметр $m=0,42$. Положительное влияние на высокие значения пластичности в НС сплаве 1565ч оказывает УМЗ структура и частицы β -фазы Al_3Mg_2 и фазы Al_6Mn размером 10-30 нм по границам зерен, которые в процессе деформации контролируют укрупнение зерен.

2. Установлены параметры получения в фольговом полуфабрикате для создания армированных композитных структур на основе сплавов 7475, 2024 и ВТ6 с УМЗ (размер зерен 100...220 нм) и частицами наноразмерных фаз в результате термомеханической обработки. Формирование такого состояния во всех сплавах обеспечило реализацию низкотемпературной СП.

3. На основе анализа структуры, температурно-скоростных условий реализации низкотемпературной СП сплавов 1565ч и ВТ6 и компьютерного моделирования установлены параметры процесса прессования образцов с композитной структурой из НС матрицы и непрерывного волокна бора диаметром 140 мкм и объемной долей 24-25 %. Режим СП обеспечил однородное заполнение матричным материалом межволоконного пространства и соединение слоев фольги; позволил снизить температуру прессования с $550-600^\circ C$ до $300^\circ C$ с НС Al матрицей и с $900^\circ C$ до $650^\circ C$ - с УМЗ Ti матрицей по сравнению с существующей технологией.

4. Получены образцы с композитной структурой с объемной долей волокон 24-25 % прессованием в режиме низкотемпературной СП, установленном для каждого сплава на основе Al (1565ч, 7475, 2024) и Ti (BT6). В результате исследования их механических свойств в условиях статических, циклических и ударных нагрузок установлены для Al-B: прочность при изгибе 1345 МПа, значение ударной вязкости 160 кДж/м², предел ограниченной выносливости 500 МПа; для Ti-B: прочность при изгибе 2420 МПа, значение ударной вязкости 510 кДж/м², предел ограниченной выносливости 1300 МПа.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в отечественных журналах из перечня изданий ВАК:

1. Проявление сверхпластичности при пониженных температурах сплава 1565ч системы Al–Mg в ультрамелкозернистом и наноструктурном состояниях / Е.В. Бобрук, **И.А. Рамазанов**, В.В. Астанин, Н.Г. Зарипов, В.У. Казыханов, А.М. Дриц, М.Ю. Мурашкин, Н.А. Еникеев // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124, № 8. – С. 771-782. **K1**

2. High strain-rate superplasticity of ultrafine-grained Al-Mg-Mn-Zn-Zr alloy / V.V. Astanin, E.V. Bobruk, **I.A. Ramazanov**, M.M. Abramova, N.G. Zaripov, N.A. Enikeev // Letters on Materials. – 2023. – Т. 13. № 4 (52). – С. 408-413. **K1, 2.6.6.**

3. Эволюция микроструктуры и механические свойства металломатричного композита Al-B с ультрамелкозернистой алюминиевой матрицей / Е.В. Бобрук, **И.А. Рамазанов**, В.В. Астанин // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т.27.№ 4. – С.22-33. **K1**

4. Свойства композита из ультрамелкозернистой титановой матрицы и непрерывного борного волокна / **И. А. Рамазанов** // Materials. Technologies. Design. – 2026. – Т. 8, No 3(26). – 14–21. **K2, 2.6.6.**

5. Свойства композита, изготовленного из наноструктурированной алюминиевой матрицы и непрерывных волокон / **И. А. Рамазанов**, В. В. Астанин, Е. В. Бобрук // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2026. – № 12.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of science:

6. Al-Mg-Mn-Zn-Zr alloy with refined grain structure to develop Al-B fiber-reinforced metal matrix composites compacted in superplastic conditions / E.V. Bobruk, V.V. Astanin, **I.A. Ramazanov**, N.G. Zaripov, V.U. Kazykhanov, N.A. Enikeev // Materials Today Communications. – 2023. – V. 37. – # 107527 **SJR (2023) Q2**

7. Low-temperature superplasticity and high strength in the Al 2024 alloy with ultrafine grains / E.V. Bobruk, M.Yu. Murashkin, **I.A. Ramazanov**, V.U. Kazykhanov, R.Z. Valiev // Materials. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 727. **WoS (2023) Q1**

8. Low-temperature superplasticity of ultrafine-grained aluminum alloys: recent discoveries and innovative potential / E.V. Bobruk, N.G. Zaripov, **I.A. Ramazanov**, N.Q. Chinh, R.Z. Valiev // Materials. – 2024. – Т. 17, № 13. – С. 3311. **WoS (2024) Q1**

9. Low-temperature superplastic behavior of nanostructured Al-Zn-Mg-Cu alloy / E.V.

Materials Letters. – 2024. – V. 377. – # 137497. *SJR (2024) Q2*

10. Low temperature superplasticity of ultrafine-grained VT6 alloy / V.V. Astanin, **I.A. Ramazanov**, N. Enikeev, E.V. Bobruk // Transactions of the Indian institute of metals. – 2025. V. 78, 2. – P. 37-47. *SJR (2024) Q2*

11. Modeling and obtaining of metal-matrix composite with ultrafine-grained Ti matrix / **I.A. Ramazanov**, M.E. Klimov, A.I. Gomzin, V.V. Astanin, E.V. Bobruk // Materials letters. – 2025. – V.385(6). – # 138145. *SJR (2024) Q2*

Патенты на изобретение:

12. Патент RU 2819775 С1. РФ. Способ получения композитов с металлической матрицей, использующий эффект низкотемпературной сверхпластичности: № 2023131317 от 30.11.2023: опубл. 24.05.2024 / В.В. Астанин, Е.В. Бобрук, **И.А. Рамазанов**. – 10 с.

Диссертант

И.А. Рамазанов

Рамазанов Ильнар Альфридович

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ Al И Ti ДЛЯ СОЗДАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР

Специальность 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук