

На правах рукописи



Галиева Эльвина Венеровна

**ТВЕРДОФАЗНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА
ОСНОВЕ Ni_3Al И ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте проблем сверхпластичности металлов
Российской академии наук (ИПСМ РАН)

Научный руководитель: **Лутфуллин Рамиль Яватович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ИПСМ РАН, г. Уфа

Официальные оппоненты: **Люшинский Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, заместитель главного технолога, начальник научно-исследовательской лаборатории сварочных технологий, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», Московская область, г. Раменское

Медведев Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Сварочных, литейных и аддитивных технологий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится «27» мая 2021 г. в 14:00 час. на заседании диссертационного совета Д 002.080.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, расположенном по адресу: 450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по адресу: 450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина 39, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИПСМ РАН по адресу: <http://www.imsp.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.080.03

кандидат технических наук



Саркеева Айгуль Анваровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Известно, что в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) широкое применение получили жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), весовая доля которых достигает $\sim 50\%$ [1-3]. Из ЖНС изготавливают детали камеры сгорания, рабочие и сопловые лопатки, диски турбины и другие важные узлы. ЖНС являются труднодеформируемыми и имеют низкую технологичную пластичность. Поэтому для изготовления деталей, например, дисков ГТД, из таких сплавов целесообразно применение перспективной технологии сверхпластической деформации. Диски ГТД относятся к числу наиболее ответственных деталей. Конструирование рабочих колес высокотемпературных газовых турбин, основанное на применении разъемных замковых соединений лопаток с диском, ограничивает возможности совершенствования конструкций в направлении повышения ресурса, уменьшения массы и эффективности двигателя в целом. Следует также отметить, что рабочие колеса турбин работают в условиях неравномерного нагрева и нагружения. Требования к температурным условиям эксплуатации диска и рабочих лопаток различны. Лопатки подвержены воздействию более высоких температур и должны иметь более жаропрочные свойства [1-3].

На сегодняшний день одной из актуальных проблем, решение которых обеспечивает прогресс в авиадвигателестроении, является разработка научно-обоснованных термомеханических режимов получения качественных твердофазных соединений (ТФС) из разноименных жаропрочных сплавов, в частности, на основе никеля, что необходимо для изготовления биметаллических деталей, например, типа «БЛИСК», представляющих собой цельный диск с лопатками [4]. Использование таких сварных конструкций в перспективных ГТД необходимо для снижения массы, экономии металла и обеспечения возможности изготовления изделий, оптимизированных по механическим свойствам для реальных условий их эксплуатации. В качестве материала для лопаток детали типа «БЛИСК» перспективными являются интерметаллидные сплавы, в том числе, типа ВКНА с монокристаллической структурой на основе интерметаллида Ni_3Al , имеющие высокую температуру плавления ($1365...1395$ °С), характеризующиеся высокой жаропрочностью, жаростойкостью и более низкой плотностью ($8\pm 0,1$ г/см³), чем поликристаллические никелевые сплавы.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы получения качественного ТФС является сварка давлением (СД) в температурно-скоростном режиме сверхпластической деформации никелевых сплавов с мелкозернистой (МЗ) или ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Эффективность применения метода СД в условиях проявления структурной сверхпластичности (СП), как следует из научно-технической литературы, продемонстрирована на примере титановых сплавов, из которых изготавливают определенную номенклатуру деталей ГТД с высокими эксплуатационными характеристиками.

Степень разработанности темы исследования. Анализ современных тенденций развития материалов и технологий, приведенный в обзоре литературы, свидетельствует, что изучению природы получения ТФС из одноименных и разноименных металлов и сплавов, в том числе на основе никеля, посвящено много работ, выполненных отечественными и зарубежными специалистами (Казаков Н.Ф.,

Каракозов Э.С., Лариков Л.Н., Лукин В.И., Лутфуллин Р.Я., Люшинский А.В., Мусин Р.А., Сорокин Л.И., Murray W. Mahoney и др.).

Для получения неразъемных соединений применяются различные методы: диффузионная сварка, сварка трением, ротационная сварка, диффузионная пайка, сварка плавлением и др. Многие методы (сварка плавлением, холодная сварка, линейная сварка трением) неприменимы или имеют ограниченное применение для соединения никелевых сплавов с высоким содержанием Al и Ti. Методы диффузионной сварки и пайки предполагают проведение обработки соединяемых сплавов при температурах близких к температуре плавления. Одним из перспективных методов получения ТФС из высоколегированных, в том числе интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al , является метод СД в условиях СП, который осуществляется при более низких гомологических температурах. Применение этого метода позволяет исключить возникновение в зоне ТФС термических и фазовых напряжений и обеспечивает сохранение исходной структуры соединяемых материалов. Однако на момент постановки диссертационной работы, совершенно малоизученным оставался фундаментальный для технологии обработки материалов вопрос, связанный с возможностью использования сверхпластической деформации для получения надежных ТФС из одноименных и разноименных сплавов на основе никеля. В связи с вышеизложенным сформулирована цель настоящей диссертационной работы:

Цель работы:

Разработать научно-обоснованные режимы СД с использованием эффекта структурной СП для изготовления модельных образцов с ТФС между литыми монокристаллическими интерметаллидными сплавами типа ВКНА на основе Ni_3Al и деформируемыми поликристаллическими никелевыми сплавами ЭК61 и ЭП975.

Для достижения цели решались следующие частные задачи:

1. Установить режимы получения УМЗ структуры и ее влияние на проявление эффекта низкотемпературной СП в деформируемых никелевых сплавах ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы: $\gamma''-Ni_3Nb$ и $\gamma'-Ni_3(Al, Ti)$, соответственно.
2. Провести физическое и компьютерное моделирование СД литых монокристаллических сплавов типа ВКНА с деформируемыми сплавами ЭК61 и ЭП975.
3. Изучить влияние исходной структуры сплава ЭП975 на формирование ТФС при СД со сплавом ВКНА-25.
4. Исследовать влияние температуры и степени деформации на микроструктуру, изменение фазового состава в зоне ТФС и свойства сварных соединений литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с деформируемым сплавом ЭП975.
5. Оценить влияние термической обработки (ТО) на микроструктуру и свойства ТФС из литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с деформируемым сплавом ЭП975.

Научная новизна:

1. На примере деформируемых никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы $\gamma''- Ni_3Nb$ и $\gamma'- Ni_3(Al, Ti)$, соответственно, показано, что низкотемпературной деформационно-термической обработкой (ДТО) возможно

формирование УМЗ структуры смешанного типа, которая включает УМЗ составляющую с размером зерен матрицы (γ -фазы) и второй фазы менее 1 мкм, а также крупные некогерентные частицы второй фазы размером до $2\pm 0,5$ мкм в сплаве ЭК61 и $4,5\pm 1,2$ мкм в сплаве ЭП975, унаследованные от МЗ структуры дуплексного типа. Показано, что сплавы со смешанной УМЗ структурой проявляют эффект низкотемпературной СП. Максимальные характеристики СП ($m\geq 0,4$, $\delta > 1000\%$) выявлены в сплаве ЭК61 при $T=800\dots 850$ °С, а в сплаве ЭП975 при $T=950$ °С.

2. Впервые проведены системные исследования влияния сверхпластической деформации на твердофазную свариваемость одноименных и разноименных сплавов на основе никеля. Получены качественные ТФС литых интерметаллидных сплавов типа ВКНА на основе Ni_3Al с деформируемыми никелевыми сплавами ЭК61 и ЭП975 в условиях проявления в них высокотемпературной и низкотемпературной структурной СП.

3. Впервые изучено влияние исходной микроструктуры, температуры и степени деформации на формирование качественного ТФС при СД разноименных сплавов в сочетании ЭП975//ВКНА-25. Создание УМЗ структуры в сплаве ЭП975 позволяет снизить температуру СД до 950 °С. Показано, что в случае применения сплава ЭП975 с МЗ структурой повышение температуры СД с 1075 до 1175 °С приводит к формированию практически беспористого ТФС. Увеличение степени деформации от 24 до 40% приводит к формированию извилистой границы соединения в результате локализации деформации в зоне ТФС и повышению прочностных характеристик сварных соединений.

4. Установлены закономерности формирования градиентных структур в зоне ТФС разноименных жаропрочных сплавов на основе никеля при СД в условиях СП и последующей ТО. Термическая обработка приводит к расширению диффузионной зоны в 2...4 раза и повышению прочности ТФС разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25 на 6...30%.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость заключается в том, что результаты проведенных в работе исследований расширяют представления о влиянии сверхпластической деформации при пониженных температурах на формирование соединений в твердом состоянии из жаропрочных сплавов на основе никеля. Полученные в работе экспериментальные данные доказывают эффективность метода сварки давлением с использованием сверхпластической деформации и последующей термической обработки для получения качественных ТФС между интерметаллидными монокристаллическими сплавами на основе Ni_3Al и жаропрочными никелевыми сплавами. В зависимости от режимов СД достигается прочность сварных образцов на уровне $\sim (0,6\dots 1)$ σ_B относительно прочности интерметаллидного сплава.

Практическая значимость заключается в том, что результаты проведенного в рамках диссертационной работы физического и компьютерного моделирования СД разноименных никелевых сплавов в условиях СП явились основой для разработки способа получения ТФС из литого монокристаллического интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al и деформируемого дисперсионно-твердеющего жаропрочного никелевого сплава, на который выдан патент РФ №2608118 «Способ изготовления биметаллического изделия». Это изобретение может найти применение в авиадвигателестроении при изготовлении изделий, в которых предусмотрено

использование неразъёмных соединений из упомянутых материалов, в частности, при изготовлении деталей типа «БЛИСК» для авиационных и вертолетных ГТД нового поколения, а также наземных энергетических установок.

Усовершенствована методика СД, позволяющая уменьшить окисление соединяемых поверхностей и повысить вакуум до $P=5 \cdot 10^{-2}$ Па, что обеспечивает получение качественного ТФС из разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25.

Разработаны технологические рекомендации Инв. № ТР. 49 ИНЕБ-21 ИПСМ РАН по подготовке УМЗ структуры в сплавах ЭК61 и ЭП975.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты механических испытаний и выявленный эффект низкотемпературной СП в сплавах ЭК61 и ЭП975 со смешанной УМЗ структурой.
2. Результаты компьютерного и физического моделирования СД в условиях СП одноименных и разноименных никелевых сплавов.
3. Результаты экспериментов, доказывающие принципиальную технологическую возможность получения качественных ТФС между литыми сплавами типа ВКНА и деформируемыми сплавами ЭП975 и ЭК61.
4. Экспериментальные данные по влиянию исходной микроструктуры сплава ЭП975, температуры и степени деформации на формирование и качество ТФС между литым интерметаллидным сплавом ВКНА-25 и деформируемым сплавом ЭП975.
5. Экспериментальные данные по влиянию термической обработки на механические свойства сварных образцов из разноименных сплавов на основе никеля в сочетании ЭП975//ВКНА-25.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы представлены, доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и рассмотрены на конкурсах:

1. ЛII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Россия, г. Уфа, 2012 г.
2. Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы», Россия, г. Уфа, 2012, 2014, 2016, 2018 и 2020 гг. В 2016 году устный доклад диссертанта был признан лучшим среди молодых ученых и отмечен оргкомитетом конференции соответствующим дипломом.
3. Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» Россия, г. Тамбов, ТГТУ, 2013, 2015, 2016 гг. В 2016 году устный доклад диссертанта был признан лучшим среди молодых ученых и отмечен оргкомитетом конференции соответствующим дипломом.
4. Международная конференция - XII International Conference on Nanostructured Materials (NANO 2014); Россия, Москва, МГУ им. Ломоносова, 13-18 июля 2014 г.
5. XIII Международная конференция «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов», Россия, г. Екатеринбург, 2014 г., ИФМ УРО РАН.
6. Международная конференция The 12th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM 2015), Япония, г. Токио, 2015 г. За победу в конкурсе на лучшую научную работу среди молодых ученых, организованной «The Light Metal Educational Foundation Award», диссертант награждена дипломом.

7. VI Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», 2015 г, Россия, Москва.
8. Всероссийская научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА», Россия, г. Москва, 24-27 ноября 2015 г., ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».
9. Научно-техническая конференция молодых специалистов ПАО «УМПО» 2016 и 2017 гг. В 2017 г. за устный доклад в секции «Металлургия и сварочное производство» диссертант награждена дипломом за второе место в конкурсе лучших докладов молодых ученых.
10. Диссертант награждена в 2017 г. году дипломом за 1 место в Конкурсе регионального отделения Общероссийской общественной организации «Российский союз молодых ученых» за лучшую научную работу молодых ученых вузов и научных учреждений Республики Башкортостан.
11. The 13th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM 2018), Россия, г. Санкт-Петербург, 2018 г.
12. Международная конференция YUCOMAT and WRTCS 2019, г. Херцег-Нови, Черногория, 2-6 сентября 2019 г.
13. Диссертант является лауреатом в молодежной номинации «Премия ВОИР – 2019» за создание изобретения, на который выдан патент РФ №2608118.

Личный вклад автора. Диссертант выполнила самостоятельно основную экспериментальную работу, а также принимала непосредственное участие в экспериментах по сварке делением, обсуждении и постановке цели и задач работы, анализе, обработке и интерпретации полученных данных, в подготовке публикаций и представлении наиболее значимых результатов на российских и международных конференциях, а также лично участвовала в патентовании метода СД в условиях СП разноименных никелевых сплавов (патент РФ №2608118).

Методология и методы исследования. В соответствии с поставленными целью и задачами при выполнении диссертационной работы был использован методологический подход, заключающийся в использовании сверхпластической деформации для получения ТФС из одноименных и разноименных сплавов. При выполнении работы применялись апробированные методы исследования: просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), оптическая металлография (ОМ), механические испытания на сжатие и растяжение, а также измерение микротвердости. ДТО деформируемых сплавов проводилась с использованием схемы всесторонней изотермическойковки (ВИК). СД образцов из исследуемых сплавов осуществлялась в вакууме на установке «АЛА-ТОО (тип ИМАШ 20-78)». Основные эксперименты по СД образцов в герметичном контейнере, в котором обеспечивалось вакуумирование ($P=10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ Па), были проведены на разработанной при участии диссертанта оригинальной установке УВСД-1 для высокотемпературной (до 1250 °С) СД, включающей высокотемпературную печь, бойки из интерметаллидного сплава типа ВКНА, систему охлаждения датчика нагрузки испытательной машины Schenck Trebel типа RMS100.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на использовании ряда независимых современных методов исследования микроструктуры и свойств сплавов. Экспериментальная работа выполнена на научно-исследовательском оборудовании Центра коллективного пользования ИПСМ РАН

«Структурные и физико-механические исследования материалов». Механические испытания проводились с применением аттестованного экспериментального оборудования на образцах одинакового типа и размера. Оценка параметров микроструктуры и механических свойств проводилась с использованием методов статистической оценки погрешности измерений, а также соответствием полученных экспериментальных результатов данным российских и зарубежных специалистов.

Диссертационная работа выполнялась в рамках Госзадания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310221-5 «Разработка научных основ перспективных технологий изготовления полых и жестких металлических конструкций с использованием СД и сверхпластического формообразования и их диагностики», а также в рамках выполнения грантов: 1) РФФИ № 13-08-12200 офи_м «Исследование природы формирования твердофазного соединения интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al с жаропрочным сплавом ЭП975 при термомеханическом воздействии и его влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики» (2013-2015 гг.); 2) РФФИ № 14-08-97061 р_поволжье_a «Физическое и экспериментальное моделирование влияния профиля поверхности на качество твердофазного соединения жаропрочных сплавов на основе никеля и титана с монокристалльным сплавом на основе интерметаллида Ni_3Al » (2014-2016 гг.); 3) РФФИ № 17-38-50060 мол_нр «Установление закономерностей формирования твердофазного соединения монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-25 на основе Ni_3Al с деформируемым никелевым сплавом ЭП975 в зависимости от условий сварки давлением» - основной исполнитель; 4) РФФИ № 18-19-00685 (2018-2020 гг.) «Сверхпластичность гетерофазных никелевых сплавов с ультрамелкозернистой и нанокристаллической структурой и ее использование в технологических процессах изготовления биметаллических деталей ГТД» - основной исполнитель.

Публикации. Все основные материалы диссертации в полной мере изложены в 27 печатных работах: 20 статей опубликовано в рецензируемых журналах, из них 14 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 12 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, 8 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science, одна из которых опубликована в зарубежном научном журнале с квартилем Q1; 5 работ в сборниках материалов конференций, входящих в базы данных РИНЦ; технологические рекомендации Инв. № ТР. 49 ИНЕБ-21 ИПСМ РАН; патент РФ №2608118 на изобретение.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. с.н.с. Лутфуллину Р.Я. и коллегам ИПСМ РАН за ценные рекомендации при обсуждении результатов проведенных экспериментов, а также сотрудникам ИМЕТ РАН д.т.н., профессору Поваровой К.Б., к.т.н. Дроздову А.А. и ВИАМ к.т.н., с.н.с. Базылевой О.А., к.т.н. Аргинбаевой Э.Г. за плодотворное сотрудничество и обсуждение результатов, связанных со сваркой давлением деформируемых сплавов с интерметаллидными сплавами на основе Ni_3Al .

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 194 наименований. Общий объем диссертации составляет 195 страниц, в том числе 82 рисунка, 9 таблиц, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен анализ известных в научной литературе результатов по сварке в твердом состоянии никелевых сплавов различного химического состава. Дана общая характеристика никелевых сплавов. Представлены известные методы получения УМЗ структуры и данные по проявлению СП в никелевых сплавах. Рассмотрены известные способы получения неразъемных соединений, в том числе СД различных металлов и сплавов. Показано преимущество метода СД в условиях СП по сравнению с другими методами получения ТФС. Проанализированы данные научной литературы по влиянию ТО на структуру, свойства жаропрочных никелевых сплавов и ТФС после сварки. На основе анализа данных научно-технической литературы, сформулированы цель и частные задачи диссертационной работы.

Вторая глава содержит описание материалов и методов исследования. В качестве объектов исследований были выбраны деформируемые поликристаллические никелевые сплавы с различным типом упрочняющей фазы: свариваемый – ЭК61 (γ'' -фаза – Ni_3Nb) и несвариваемый – ЭП975 (γ' -фаза – $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) с УМЗ структурой, а также монокристаллические литые интерметаллидные сплавы типа ВКНА на основе Ni_3Al . Химический состав исследуемых материалов представлен в таблице 1. Монокристаллические заготовки из интерметаллидных сплавов типа ВКНА были изготовлены во ФГУП ГНЦ «ВИАМ» в рамках выполнения совместных проектов РФФИ 13–08–12200 и РФФИ № 18–19–00685. Микроструктура в сплавах типа ВКНА представляет собой естественный эвтектический композит, с типичной для этих сплавов дендритно-ячеистой структурой. Дендриты имеют двухфазное строение: $\gamma+\gamma'$ -фазы, между которыми располагаются крупные междендритные частицы γ' -фазы.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сплавов на основе никеля (масс.%).

Сплав	Al	Cr	Co	Fe	W	V	Mo	Ti	Nb	Cu	Re	C	Ni
Деформируемые													Основа
ЭП975	4,8	8,2	15,1	–	10,2	–	1,2	2,4	1,5	–	–	0,06	
ЭК61	1,0	16,6	–	15,0	–	0,5	3,9	0,8	5,0	0,5	–	≤0,05	
Интерметаллидные													
ВКНА-25	8,4	5,8	4,5	–	3	–	5	0,5	–	–	1,4	–	
ВКНА-моно	8,5	5,0	–	–	2,3	–	5,0	1,5	–	–	–	–	

Для получения МЗ и УМЗ структуры дуплексного типа в сплавах ЭП975 и ЭК61 проводили ДТО, используя разработанный в ИПСМ РАН методический подход, изложенный в патенте РФ №2041284. Использовали схему ВИК, представленной в работе [5].

СД как одноименных, так и разноименных сплавов осуществляли в условиях СП деформируемых сплавов ЭК61 и ЭП975 по схеме одноосного сжатия. Перед СД контактную поверхность образцов механически полировали.

Исследования проводили комплексно с использованием математического метода конечно-элементного моделирования и физического (экспериментального) моделирования. Конечно-элементное моделирование проводили в двумерной постановке (плоское деформированное состояние) с геометрическими размерами сечения $5 \times 5 \text{ мм}^2$ по осям X и Y с помощью пакета прикладных программ DEFORM-2D (работа проведена совместно с д.ф.-м.н. Дмитриевым С.В. и к.т.н. Ахуновой А.Х.).

На установке типа ИМАШ 20 - 78 проводили СД модельных образцов сплава ЭК61 в одноименном сочетании, а также в разноименном сочетании с экспериментальным интерметаллидным сплавом ВКНА-моно с начальной скоростью деформации 10^{-4} с^{-1} в вакууме ($2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$). СД сплава ЭК61 с различной исходной микроструктурой в сочетаниях: КЗ//УМЗ, КЗ//УМЗ//КЗ, УМЗ//УМЗ выполнялась при $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$, удельном давлении $\sim 100 \text{ МПа}$, с габаритными размерами образцов: кубики $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$, УМЗ прослойка: $5 \times 5 \times 0,27 \text{ мм}^3$. СД в разноименном сочетании проводили при температурах 800 и 850 $^\circ\text{C}$ при удельном давлении $\sim 100 \text{ МПа}$.

СД относительно крупных цилиндрических образцов из литого монокристаллического интерметаллидного сплава типа ВКНА и деформируемого поликристаллического сплава ЭП975 с габаритными размерами: диаметр 15,6 мм и высота 16 мм (сплавы типа ВКНА) и 20 мм (сплав ЭП975), осуществляли в условиях СП сплава ЭП975 при температурах 1175, 1125, 1075 и 950 $^\circ\text{C}$, удельном давлении $\sim 25 \dots 100 \text{ МПа}$ соответственно, со скоростью деформации 10^{-4} с^{-1} в вакууме ($5 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$). СД образцов проводили с использованием оригинальной установки для высокотемпературной СД (УВСД-1), включающей высокотемпературную печь, бойки из интерметаллидного сплава типа ВКНА, изготовленные во ФГУП ГНЦ «ВИАМ», систему охлаждения датчика нагрузки испытательной машины, закрепленной на испытательной машине Schenck Trebel типа RMS100. Подготовленные образцы помещали в герметичный контейнер из нержавеющей стали. Внутри контейнера с образцами создавался вакуум, сохраняемый в течение всего процесса СД. В процессе выполнения диссертационной работы была усовершенствована методика высокотемпературной СД, направленная на уменьшение окисления соединяемых образцов на подготовительных стадиях и достижение вакуума не хуже $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

Исследование микроструктуры материала и EBSD анализ проводили с использованием высокоразрешающего растрового электронного микроскопа Mira 3LMN (TESCAN, Чехия), оснащенного детектором отраженных (SE) и обратно отраженных электронов (BSE). Энерго-дисперсионный анализ (ЭДА) проводили на растровом электронном микроскопе Vega 3SBH (TESCAN, Чехия), оснащенный детектором энерго-дисперсионного анализа X-ACT (Oxford Instruments) и программным обеспечением AZtec.

Микротвердость определяли на приборе МНТ-10 Microhardness Tester при нагрузке $\sim 1 \text{ Н}$ (100 г) и длительности выдержки под нагрузкой 10 секунд согласно ГОСТ 9450-76. Механические испытания на растяжение проводили на плоских образцах при комнатной температуре с начальной скоростью деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ на испытательной машине INSTRON. Для испытаний сварных соединений использовали плоские образцы с рабочим сечением $2,6 \times 2,0 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части 6 мм, вырезанные из центральной части сварных образцов. Механические испытания на сжатие проводили на цилиндрических образцах диаметром 10 мм и

высотой 15 мм. ТО сварных образцов в сочетании ЭП975//ВКНА-25 проводили в электропечи АТС. Использовали режим ТО, применяемый для сплава ЭП975: отжиг при $T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (6 часов) и старение при температуре $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (6 часов).

В третьей главе представлены результаты исследований микроструктуры и механических свойств сплавов ЭК61 (состояние поставки) и ЭП975 (исходное МЗ состояние), а также после ДТО.

Сплав ЭК61 в исходном горячедеформированном состоянии имел крупнозернистую (КЗ) структуру со средним размером зерен γ -фазы 62 ± 2 мкм с выделениями в теле зерен наноразмерных частиц упрочняющей γ'' -фазы (~ 40 нм). В процессе ВИК метастабильная γ'' -фаза преобразуется в термически стабильную δ -фазу. Показано, что в сплаве ЭК61 посредством обработки по режиму ВИК-I (первый режим) в интервале температур $950\text{...}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ во всем объеме формируется УМЗ структура смешанного типа со средним размером зерен γ -фазы $0,8\pm 0,2$ мкм и частиц δ -фазы размером $0,75\pm 0,15$ мкм (Рисунок 1а). Снижение нижней температуры ДТО до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (режим ВИК-II в интервале $950\text{...}750\text{ }^{\circ}\text{C}$) приводит к дополнительному измельчению УМЗ структуры (с размерами γ -фазы и частиц δ -фазы $\sim 0,3\pm 0,1$ мкм). При этом в обоих случаях наряду с УМЗ составляющей в структуре сплава наблюдаются отдельные крупные частицы δ -фазы размером до $2,0\pm 0,5$ мкм, которые образовались на первой высокотемпературной стадии ДТО ($950\text{...}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) формирования МЗ структуры дуэлексного типа и сохранились (являются «наследственными»).

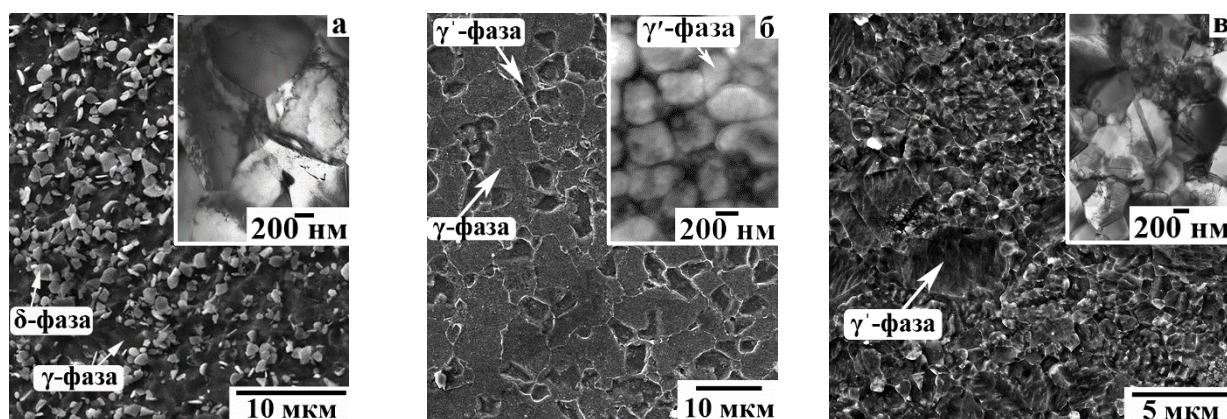


Рисунок 1 – Микроструктура никелевых сплавов:
ЭК61 (а) с УМЗ структурой и ЭП975 с МЗ (б) и УМЗ (в) структурами

Исходная микроструктура деформируемого сплава ЭП975 представляла собой МЗ ($\gamma+\gamma'$) структуру дуэлексного типа с размером частиц γ' -фазы $3,2\pm 1,1$ мкм и зерен γ -фазы – $8,0\pm 1,5$ мкм (Рисунок 1 б). В сплаве ЭП975 с исходной МЗ структурой после ДТО при пониженных температурах ($1000\text{...}950\text{ }^{\circ}\text{C}$) была сформирована УМЗ структура смешанного типа со средним размером новых некогерентных выделений γ' -фазы и зерен γ -фазы – $0,8\pm 0,2$ мкм (Рисунок 1 в). При этом в структуре сплава ЭП975 так же, как и в сплаве ЭК61, наблюдаются более крупные частицы γ' -фазы размером до $4,5\pm 1,2$ мкм, унаследованные от МЗ структуры.

В таблицах 2 и 3 представлены механические свойства сплавов ЭК61 и ЭП975 после испытаний на СП. На примере сплава ЭК61 показано, что формирование смешанной УМЗ структуры с размером зерен менее 1 мкм приводит к проявлению

эффекта низкотемпературной СП в интервале температур 675...900 °С. В таблице 2 приведены механические свойства сплава ЭК61 при испытаниях на СП при скорости деформации $10^{-3}c^{-1}$. Показано, что максимальные значения относительного удлинения ($\delta=1431...1741\%$) и коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения ($m=0,4...0,52$) наблюдаются в сплаве с УМЗ структурой при 800 и 850 °С (таблица 2). Исследование сплава ЭП975 показало, что формирование смешанной УМЗ структуры, включающей области со средним размером выделений γ' -фазы и зерен γ -фазы менее 1 мкм, а также отдельные крупные выделения γ' -фазы, обеспечивает достижение максимальных характеристик СП ($\delta=1490\%$, $m=0,44$) при 950 °С. Максимальные характеристики СП сплава ЭП975 с МЗ структурой, как показано ранее в работах [1, 6], проявляются при $T=1100...1125$ °С (таблица 3).

Таблица 2 – Механические свойства сплава ЭК61 при испытаниях на СП с начальной скоростью деформации $\dot{\epsilon}=10^{-3}c^{-1}$

Режим обработки сплава ЭК61	Параметры УМЗ составляющей, мкм		Т, °С	δ , %	σ , МПа	m
	γ -фаза	δ -фаза				
ВИК-I (950...850 °С) / ВИК-II (950...700 °С)	0,8±0,5 / 0,3±0,2	0,75±0,3 / 0,3±0,2	600	42 / 100	1220 / 1238	0,1 / 0,17
			675	– / 132*	– / 698	– / 0,26
			700	292 / 512	340 / 439	0,31 / 0,35
			750	440 / 1048	158 / 247	0,35 / 0,5
			800	1431 / 1583	100 / 121	0,4 / 0,5
			850	1200 / 1741	119 / 95	0,5 / 0,52
			900	639 / –	93 / –	– / –

*Примечание: в числителе приведены данные для УМЗ структуры после ВИК-I, а в знаменателе после ВИК-II. *Испытания при $T=675$ °С проводились при скорости деформации $\dot{\epsilon}=10^{-4} c^{-1}$, в этом случае удлинение составило $\delta=370\%$.*

Исследования микроструктуры образцов из сплава ЭП975 с УМЗ структурой после растяжения показали, что в структуре рабочей части вблизи зоны разрушения обнаруживаются единичные округлые поры размером не более 1 мкм. Аналогичная картина наблюдается в растянутых образцах из сплава ЭК61. Вблизи зоны разрушения наблюдается тенденция к выстраиванию отдельных пор в цепочки длиной до 50 мкм в направлении оси растяжения. Образование пор наблюдается преимущественно вблизи карбидных частиц.

Таблица 3 – Механические свойства сплава ЭП975 при испытаниях на СП

Сплав	ЭП975 УМЗ				ЭП975 МЗ [1, 6]					
	$d\gamma=0,8$ мкм				$d\gamma=2,5$ мкм			$d\gamma=8$ мкм		
Т, °С	850	900	950	1000	900	950	1000	1125	1000	1125
δ , %	132	275	1490	1073	220	550	≥ 550		270	680
σ , МПа	577	297	56	28	382	176	80	21	75	25
m	0,24	0,3	0,44	0,42	0,2	0,42	0,6	0,8	–	–

В главе также приведены результаты испытаний сплавов ЭК61 и ЭП975 с УМЗ структурой по схеме одноосного сжатия, которая используется при СД. Показано, что в сплавах ЭК61 и ЭП975 с предварительно подготовленной УМЗ структурой смешанного типа в интервале скоростей $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и температур деформации соответственно $600 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и $900 \dots 1125 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается типичный вид зависимости напряжения течения от степени деформации, характерный для СП деформации.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального и компьютерного моделирования СД в условиях СП сплава ЭК61 с УМЗ структурой как в одноименном сочетании сплава ЭК61//ЭК61 (Рисунок 2 и 3 а), так и в разноименном сочетании ЭК61//ВКНА-моно (Рисунок 3 б, в). Картина распределения сдвиговой деформации, совмещенная с общим видом сварных образцов из сплава ЭК61, показана на рисунках 2 а и 3 а, б.

На примере сплава ЭК61 проанализировано влияние исходной микроструктуры при СД на твердофазную свариваемость. Обнаружено, что осадкой двух одноименных КЗ образцов (КЗ//КЗ) не удается получить соединение при $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0,66 T_{\text{пл}}$). Однако в случае использования образцов с предварительно подготовленной УМЗ структурой при той же температуре ($800 \text{ }^\circ\text{C}$) в идентичных условиях были получены ТФС образцов из сплава ЭК61 в следующих микроструктурных сочетаниях: УМЗ//КЗ, УМЗ//УМЗ и КЗ//УМЗ//КЗ. Выявлено, что практически вся деформация локализуется в образцах с УМЗ структурой.

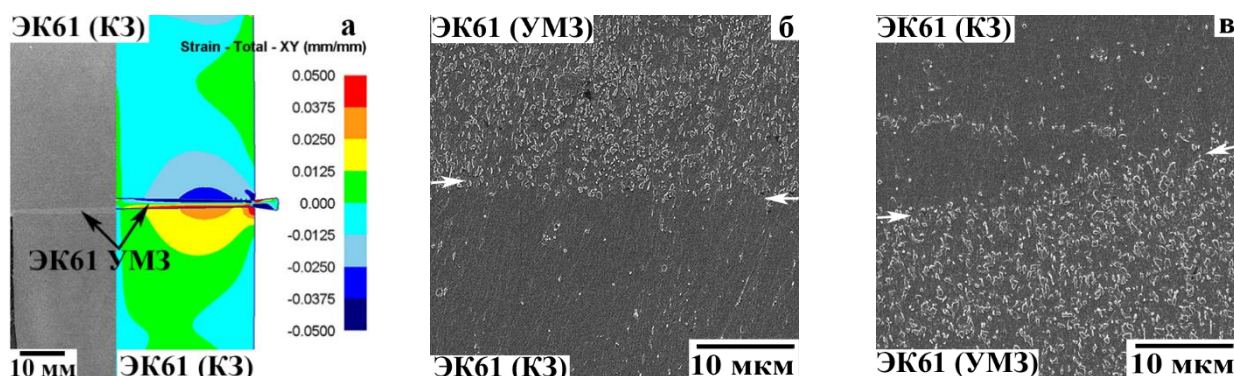


Рисунок 2 – Соединенные образцы в сочетании КЗ//УМЗ// КЗ (СД сплава ЭК61 при $800 \text{ }^\circ\text{C}$): а – общий вид; б, в – локальные участки зоны ТФС

Прочность ТФС оценивали по результатам механических испытаний на растяжение при комнатной температуре. Максимальная прочность выявлена в сварных образцах после СД с использованием прослойки и составляет 0,5 от прочности сплава ЭК61 с КЗ структурой. Разрушение сварных образцов происходило по ТФС. Результаты экспериментов позволяют заключить, что получение ТФС при пониженных температурах технологически возможно, если хотя бы один из соединяемых материалов деформируется в условиях проявления низкотемпературной СП.

Метод СД в условиях СП оказался эффективным для получения ТФС из разноименных сплавов при $800 \text{ }^\circ\text{C}$, а также при $850 \text{ }^\circ\text{C}$ (Рисунок 3 б, в): монокристаллического сплава на основе Ni_3Al и деформируемого сплава ЭК61 с УМЗ структурой. Картина распределения деформации аналогичная, как и в случае СД одноименных материалов: основная деформация локализуется в сплаве ЭК61 с УМЗ

структурой, а монокристаллический сплав так же, как и сплав ЭК61 с КЗ структурой, практически не деформируется (Рисунок 3). Особенностью соединения разноимённых сплавов является возникновение узкой диффузионной зоны шириной $\sim 5 \pm 2$ мкм, в которой выявлен градиент концентрации легирующих элементов между соединяемыми сплавами.

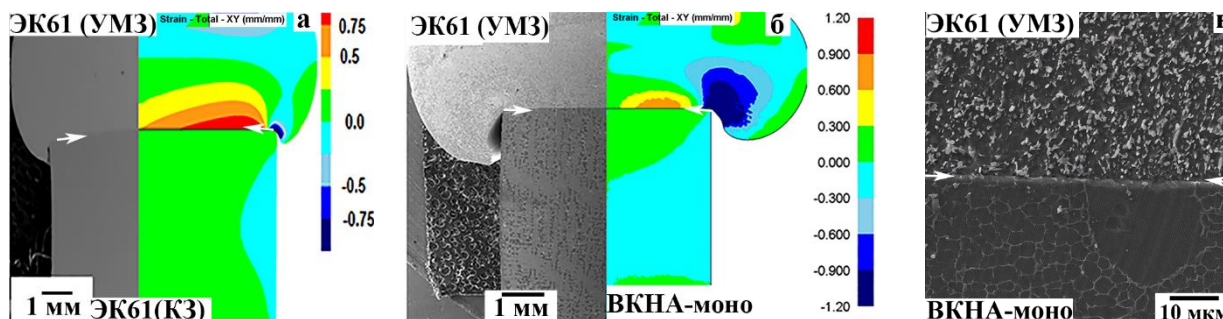


Рисунок 3 – Соединенные образцы в сочетании ЭК61//ЭК61 (а) и ЭК61//ВКНА-моно (б, в): а, б – общий вид; в – локальный участок зоны ТФС

В главе представлены результаты экспериментального и компьютерного моделирования влияния формы рельефа, созданного на поверхности сплава ВКНА-моно, на микроструктуру и картину распределения сдвиговой деформации в зоне ТФС. Рассмотрены различные формы рельефа: синусоидальный, прямоугольный, треугольный, трапециевидный и плоский. Во всех исследованных сочетаниях сверхпластическая деформация локализуется в УМЗ сплава ЭК61. Наличие рельефа увеличивает фактическую площадь контакта свариваемых поверхностей за счет сверхпластической деформации сплава ЭК61 при заполнении впадин рельефа. Полный физический контакт обеспечивается в образцах с такой формой рельефа, где отсутствуют углы. Предпочтительными формами рельефа одной из соединяемых поверхностей являются плоская или синусоидальная. Во всех случаях выявляется граница раздела. Ширина диффузионной зоны составляет $\sim 5 \pm 2$ мкм. В исследованных сварных образцах значение микротвердости в зоне ТФС, где имеется физический контакт, соответствует среднему значению между величинами микротвердости соединяемых сплавов.

В пятой главе представлены результаты исследований закономерностей формирования ТФС при СД литых монокристаллических интерметаллидных сплавов типа ВКНА с деформируемым сплавом ЭП975 с МЗ и УМЗ структурой.

Установлено, что общим для всех перечисленных случаев является следующее:

- ✓ Практически вся пластическая деформация локализована в образцах из сплава ЭП975, тогда как деформация интерметаллидного сплава не превышает 1%.
- ✓ Микроструктура сплава типа ВКНА сохраняется монокристаллической.
- ✓ Между свариваемыми сплавами в зоне ТФС сохраняется четкая граница раздела.
- ✓ При СД в зоне ТФС образуются градиентные структуры, строение которых определяется природой свариваемых материалов и условиями СД.
- ✓ В процессе СД под воздействием температуры происходит гетеродиффузия и формируется диффузионная зона, ширина которой изменяется от 18 мкм до 55 мкм в зависимости от режимов СД.

На примере сочетания разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25 проанализировано влияние исходной микроструктуры сплава ЭП975, температуры и степени деформации на формирование ТФС.

Проанализировано *влияние исходной микроструктуры* сплава ЭП975 на твердофазную свариваемость со сплавом ВКНА-25 с монокристаллической структурой. СД сплава ЭП975 с исходной УМЗ структурой проводили при 950 °С и 1125 °С, а с исходной МЗ структурой – при 1125 °С. Степень деформации сплава ЭП975 при СД составила $\varepsilon_{\text{ЭП975}}=30\%$. Формирование УМЗ структуры позволяет получить ТФС в условиях низкотемпературной СП при $T=950$ °С. В этом случае, несмотря на высокие усилия СД, достигающие 22,3 кН, микроструктуры обоих сплавов стабильны как в зоне, непосредственно прилегающей к границе раздела сплавов, так и в основном материале вдали от зоны ТФС. Относительная протяженность пор составила $\sim 12\%$, ширина диффузионной зоны 18 ± 3 мкм, прочность ТФС $\sigma_{\text{в}}=0,6$ от прочности сплава ВКНА-25. Повышение температуры СД до 1125 °С приводит к тому, что УМЗ структура сплава ЭП975 ($d_{\gamma}=0,8$ мкм) трансформировалась в МЗ ($d_{\gamma}=6$ мкм). Относительная протяженность пор, ширина диффузионной зоны и прочность ТФС соизмеримы с указанными параметрами в сварных образцах, полученных при 1125 °С, где в сплаве ЭП975 исходная микроструктура перед СД была МЗ ($d_{\gamma}=8$ мкм). В обоих случаях со стороны сплава ВКНА-25 на границе раздела соединяемых сплавов происходит незначительное утолщение прослоек, свидетельствующее о локализации деформации в приконтактной зоне. По сравнению с МЗ материалом использование УМЗ сплава ЭП975 приводит к снижению усилий при СД ($T=1125$ °С, $P=5\cdot 10^{-1}$ Па) и уменьшению глубины зоны с утолщенными прослойками до ~ 2 мкм.

Проанализировано *влияние температуры* СД на формирование ТФС. СД осуществлялась при температурах $T=1075$, 1125 и 1175 °С, степень деформации сплава ЭП975 с исходной МЗ структурой составила $\varepsilon_{\text{ЭП975}}=24\%$. После СД при температурах 1075 и 1125 °С структуры обоих сплавов стабильны. С повышением температуры деформации с 1075 до 1175 °С снижается относительная протяженность пор с 15 ± 3 мкм до $2,0\pm 0,5$ мкм; расширяется диффузионная зона с 24 ± 2 мкм до 30 ± 4 мкм; повышается прочность ТФС. СД при температуре 1175 °С позволяет сформировать практически беспористое ТФС. Структура сплава ВКНА-25 практически не изменяется. В процессе СД при $T=1175$ °С в сплаве ЭП975 из-за частичного неравномерного растворения γ' -фазы возникают области с разным размером зерна, различающимся в 2...3 раза, которые полностью устраняются при окончательной ТО.

Таким образом, по результатам проведенных исследований влияния исходной микроструктуры и температуры деформации на твердофазную свариваемость установлено, что наиболее предпочтительной температурой СД является $T=1125$ °С, а сплав ЭП975 целесообразно использовать с МЗ структурой¹.

Проанализировано *влияние степени деформации* сплава ЭП975 с исходной МЗ структурой на формирование ТФС. СД проводилась при следующих режимах: $T=1125$ °С; скорость деформации $\dot{\varepsilon}=10^{-4}\text{с}^{-1}$; вакуум $P=5\cdot 10^{-1}$ Па. Степень деформации

¹ Результаты получены в рамках выполнения гранта РФФИ № 17-38-50060 мол_нр под руководством д.т.н. профессора Поваровой К.Б.

соединяемого образца из сплава ЭП975 составляла $\varepsilon_{\text{ЭП975}} = 24, 30$ и 40% , а степень деформации сплава ВКНА-25 не превысила $\varepsilon_{\text{ВКНА-25}} \leq 1\%$. После усовершенствования методики СД, позволившей достичь вакуум $P=5 \cdot 10^{-2}$ Па внутри контейнера с образцами, были повторно проведены эксперименты по аналогичным режимам ($T=1125$ °С, $\dot{\varepsilon}=10^{-4}$ с $^{-1}$, $\varepsilon_{\text{ЭП975}} = 24, 30$ и 40%). Обнаружены общие закономерности, которые не зависят от глубины вакуума. Методом РЭМ выявлено, что в изученном интервале деформаций со стороны сплава ВКНА-25 формируется диффузионный слой в области двухфазных ($\gamma'+\gamma$) дендритов, в которых наблюдаются следующие изменения: вначале утолщаются прослойки γ -фазы и увеличивается их объемная доля, затем исчезают участки γ -матрицы между γ прослойками. В сплаве ЭП975 морфология зерен и γ' -фаз, характерных для дуплексной структуры исходного материала МЗ (Рисунок 4), практически не изменилась, несмотря на длительное воздействие высокой температуры и СП деформации. В результате диффузии со стороны сплава ЭП975 исчезают избыточные включения γ' -фазы. С увеличением степени деформации ширина диффузионной зоны увеличивается с 35 мкм до 55 мкм, а также в зоне ТФС граница раздела становится более извилистой (Рисунок 4 в).

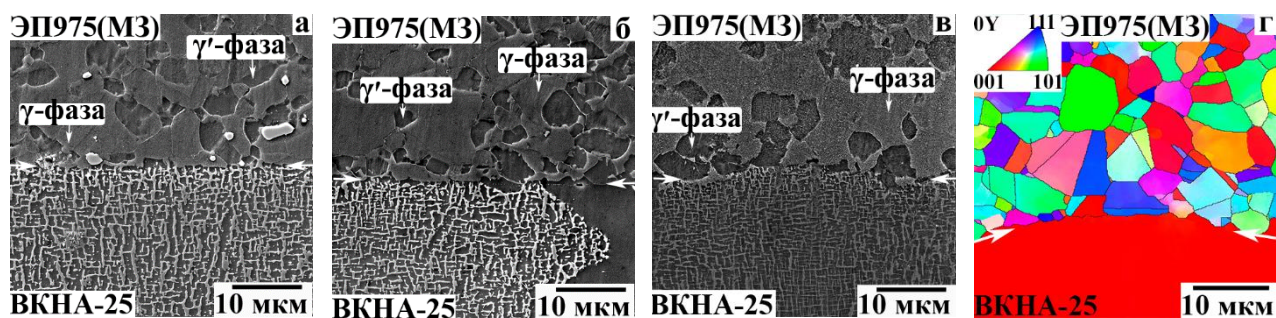


Рисунок 4 – Микроструктура зоны ТФС после СД (Вакуум $P=5 \cdot 10^{-2}$ Па) образцов ЭП975//ВКНА-25 при $T=1125$ °С и различных степенях деформации сплава ЭП975: а – 24% б – 30%; в, г – 40% (г – EBSD карта разориентировок зерен)

На границе раздела сплавов формируются поры двух типов: изолированные округлые поры диаметром до 200 нм и вытянутые вдоль границы раздела, длиной 0,6...1,3 мкм и толщиной, не превышающей 250 нм. Поры расположены хаотично, но в основном наблюдаются участки свободные от пор, протяженность которых составляет 40-50 мкм. Суммарная относительная протяженность пор в сварных образцах (Вакуум $P=5 \cdot 10^{-1}$ Па) со степенью деформации, составляющей 24 и 30%, не превышает 8...15%. Повышение степени деформации до 40% приводит к формированию практически беспористого ТФС (не более 3%). Микроструктуры обоих сплавов стабильны. Отклонений от исходной кристаллографической ориентации монокристаллического сплава ВКНА-25 не наблюдается, что подтверждается данными EBSD анализа. Отличительной особенностью микроструктуры сварных образцов, полученных в улучшенном вакууме (Вакуум $P=5 \cdot 10^{-2}$ Па), является то, что получены практически беспористые ТФС (Рисунок 4 г).

В шестой главе представлены результаты исследований влияния ТО по режиму, который применяется для сплава ЭП975, на структуру и свойства ТФС литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с деформируемым никелевым сплавом ЭП975.

При всех исследованных режимах СД и последующей ТО установлены общие закономерности изменения микроструктуры и фазового состава в зоне ТФС. Проведение ТО сварных образцов интенсифицирует в них диффузию всех элементов, а особенно таких, как Nb, Ti, Re, W, Mo, диффузия которых в процессе СД затруднена. ТО приводит к расширению в $\sim 2...4$ раза диффузионной зоны, которая характеризуется формированием градиентного изменения фазового состава и микроструктуры. После ТО изгиб на линиях распределения легирующих элементов становится более плавным при переходе от одного соединяемого сплава к другому (Рисунок 5).

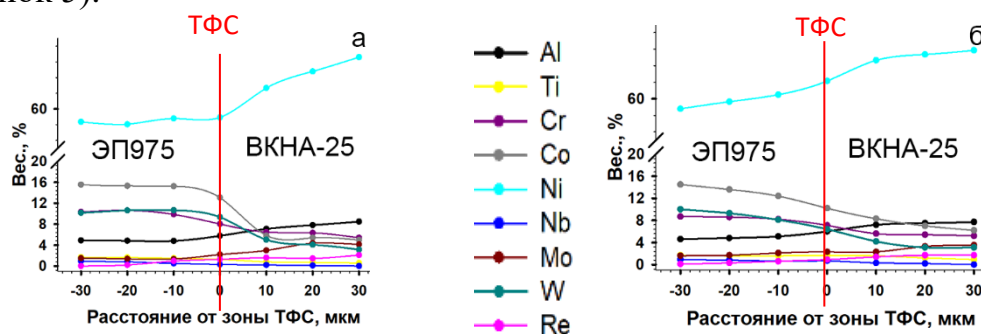


Рисунок 5 – Распределение элементов в поперечном направлении относительно зоны ТФС при переходе от сплава ЭП975 к сплаву ВКНА-25 после СД (а) и последующей ТО (б): СД при $T = 1125$ °С, $\varepsilon_{\text{ЭП975}} = 24\%$

Обнаружено, что ТО оказывает существенное влияние на микроструктуру соединяемого сплава ЭП975. При высокотемпературном нагреве ($T = 1200$ °С), превышающем температуру полного растворения γ' -фазы, исходная УМЗ или МЗ структура сплава ЭП975 преобразуется в КЗ с размером зерен γ' -фазы, достигающей $d_{\gamma'} = 130...210$ мкм в зависимости от условий СД и исходной микроструктуры сплава ЭП975. В сплаве ЭП975 наблюдаются двойники отжига. Последующее старение приводит к гомогенному выделению в теле крупных зерен матричной γ' -фазы дисперсных когерентных частиц упрочняющей γ' -фазы размером $150...500$ нм. Основная часть выделений ($\sim 85...90\%$) имеет форму частиц близкую к кубу с длиной ребра $\sim 0,5$ мкм (Рисунок 6). Оставшаяся часть более крупных выделений γ' -фазы ($\sim 10...15\%$) имеет округлую форму частиц. В зоне ТФС на границе раздела выделяются крупные (по сравнению с окружающими частицами) вытянутые частицы γ' -фазы толщиной $0,6...0,8$ мкм и длиной $1,5...3,0$ мкм (Рисунок 6 б, е). В сварных образцах, полученных в условиях вакуума $P = 5 \cdot 10^{-1}$ Па объемная доля пор на границе раздела двух сплавов после ТО в некоторых случаях увеличилась до $\sim 25\%$, поры стали более округлые. В случае повышенного до $P = 5 \cdot 10^{-2}$ Па вакуума объемная доля пор в зоне ТФС не превысила 5% .

Обнаружено, что после ТО от границы раздела в сторону соединяемого сплава ВКНА-25 наблюдаются градиентные изменения микроструктуры. Вблизи границы раздела сформировалась узкая зона глубиной до 10 мкм, микроструктура которой типична для жаропрочного никелевого сплава: в γ' -твердом растворе на основе никеля выделены дисперсные когерентные частицы γ' -фазы размером $20...600$ нм.

Далее наблюдается переходная зона протяженностью до $15...20$ мкм, характерной особенностью которой является формирование утолщенных прерывистых прослоек γ' -фазы неправильной формы. В этих прослойках

дополнительно выделяются дисперсные частицы γ' -фазы. Несмотря на указанные изменения, микроструктура сплава ВКНА-25 сохраняется монокристаллической, что подтверждается данными EBSD анализа (Рисунок 6 а, д). Из вышеизложенного следует, что диффузионная зона, а также соединяемые основные материалы ЭП975 и ВКНА-25, упрочняются под воздействием ТО.

Проведена оценка механических свойств сварных образцов в сочетании сплавов ВКНА-25//ЭП975 путем микроиндентирования на шлифах в зоне ТФС и в центре соединяемых образцов. Во всех изученных состояниях значение микротвердости в зоне ТФС соответствует среднему значению между величинами микротвердости соединяемых сплавов. Микротвердость сплава ЭП975 ($d_{\gamma}=8$ мкм) составляет $5,5\pm 0,5$ ГПа, диффузионной зоны соединения $5,2\pm 0,4$ ГПа, сплава ВКНА-25 $4,5\pm 0,6$ ГПа.

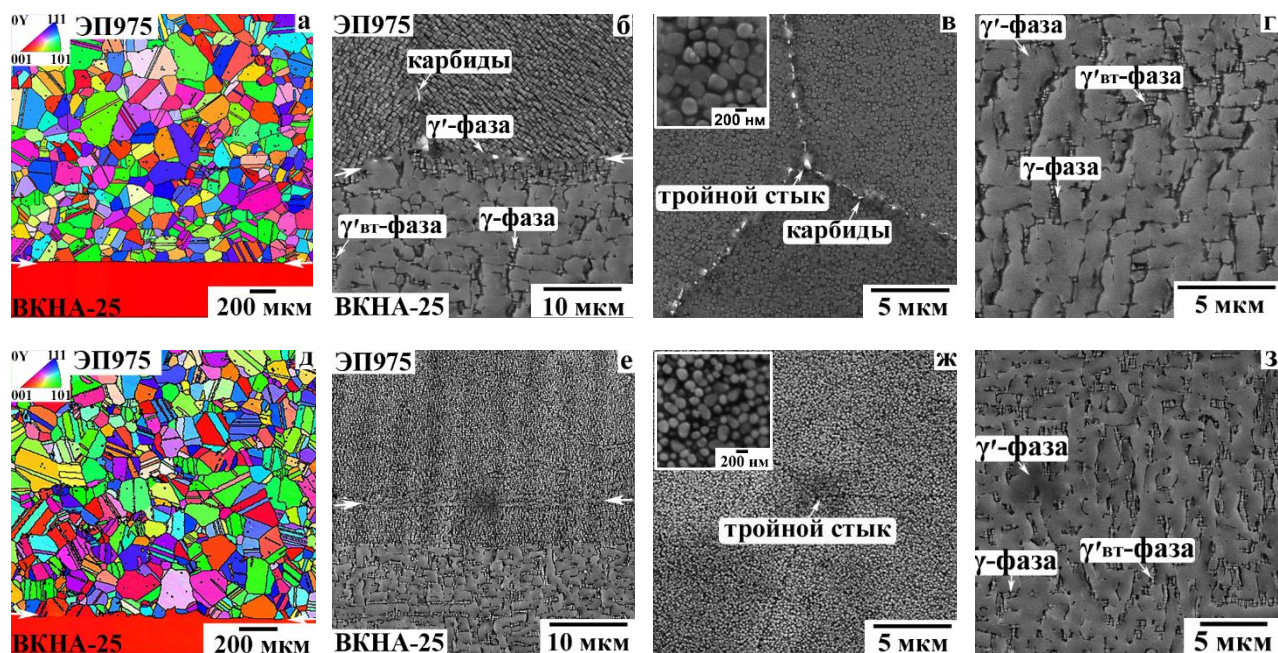


Рисунок 6 – Микроструктура сварных образцов ЭП975//ВКНА-25 с различной степенью деформации, полученных СД при $T=1125$ °С (Вакуум $P=5\cdot 10^{-2}$ Па), $T=1125$ °С, (а–г) $\varepsilon_{\text{ЭП975}}=24\%$ и (д–з) $\varepsilon_{\text{ЭП975}}=40\%$:
а, д – EBSD карты в зоне ТФС, б, е – зона ТФС; в, ж – ЭП975; г, з – ВКНА-25

Оценка прочности образцов с ТФС в сочетании сплавов ЭП975//ВКНА-25 была произведена по результатам испытаний на растяжение при комнатной и повышенной (850 °С) температурах. Полученные значения прочности сварных образцов сравнивали с уровнем прочности соединяемых сплавов в исходном состоянии перед СД. Эти значения составили 1564 ± 81 МПа и 1000 ± 100 МПа при комнатной температуре, а также 869 ± 48 МПа и 789 ± 73 МПа при $T=850$ °С соответственно для сплавов ЭП975 и ВКНА-25.

После СД (Вакуум: $P=5\cdot 10^{-1}$ Па) предел прочности составляет $0,6\ldots 0,8$ $\sigma_{\text{в}}$ от прочности сплава ВКНА-25 (менее прочный при комнатной температуре). При таком вакууме деформация оказывает заметное влияние на качество соединения. Увеличение степени деформации для сплава ЭП975 с $\varepsilon=24\%$ до 40% повышает прочность ТФС с $0,6$ (606 МПа) до $0,8$ (787 МПа) от предела прочности интерметаллидного сплава ВКНА-25. Проведение ТО позволяет повысить прочность

сварных образцов ЭП975//ВКНА-25 до 837 МПа ($0,84 \sigma_{\text{в}}$ от прочности ВКНА-25). При $T=850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность сварных образцов составляет $0,5...0,6 \sigma_{\text{в}}$ от прочности сплава ВКНА-25, ТО также повышает прочность до $0,6...0,7 \sigma_{\text{в}}$ от прочности сплава ВКНА-25. Разрушение сварных образцов, полученных СД в условиях вакуума $P=5 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$, произошло по границе раздела, на которой сконцентрированы все дефекты сварного соединения: несплошности, поры, частицы оксидов и др. Во всех случаях характер разрушения вязкий, ямочный: вытягиваются стенки γ -фазы, окружающей выделения γ' -фазы. По результатам механических испытаний на растяжение при комнатной температуре обнаружено, что ТО способствует повышению прочности сварных соединений на $6...30\%$.

Результаты исследования показали, что усовершенствование методики СД, позволившее улучшить глубину вакуума на порядок с $5 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ до $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, оказало существенное влияние на качество ТФС, и, как следствие, на прочность из разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25:

- ✓ получено практически беспористого ТФС и без оксидных частиц;
- ✓ прочность ТФС составила $1075...1326 \text{ МПа}$ (Таблица 4), что фактически соответствует прочности сплава ВКНА-25, а в некоторых случаях даже превышает ее. Разрушение произошло по основному материалу ВКНА-25 (таблица 4). Типичный вид испытанного сварного образца представлен на рисунке 7.

Таблица 4 – Механические свойства сварных образцов в сочетании разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25 (Вакуум $P=5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$) при комнатной температуре

Состояние сплавов	Режим обработки	Температура СД, $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{в(ТФС), МПа, } T=20 \text{ }^{\circ}\text{C}}$	$\sigma_{\text{в(ТФС)}} / \sigma_{\text{в(ВКНА)}}$	Характер разрушения
ЭП975 МЗ структура $d_{\gamma}=8,0 \pm 1,5 \text{ мкм}$ $d_{\gamma'}=3,2 \pm 1,1 \text{ мкм}$ //	СД 24%	1075	550 ± 24	0,55	Разрушение по ТФС
	СД 24%+ТО		950 ± 38	0,95	
	СД 24%	1125	1076 ± 33	1,08	Разрушение по сплаву ВКНА-25
	СД 24% + ТО		1217 ± 40	1,22	
	СД 30%		1094 ± 35	1,09	
	СД 30% + ТО		1326 ± 39	1,33	
СД 40%	1175	1075 ± 51	1,08		
СД 40% + ТО		1261 ± 63	1,26		
СД 24%		1160 ± 38	1,16		
ВКНА-25 монокристалл	СД 24% + ТО	1175	1259 ± 58	1,26	

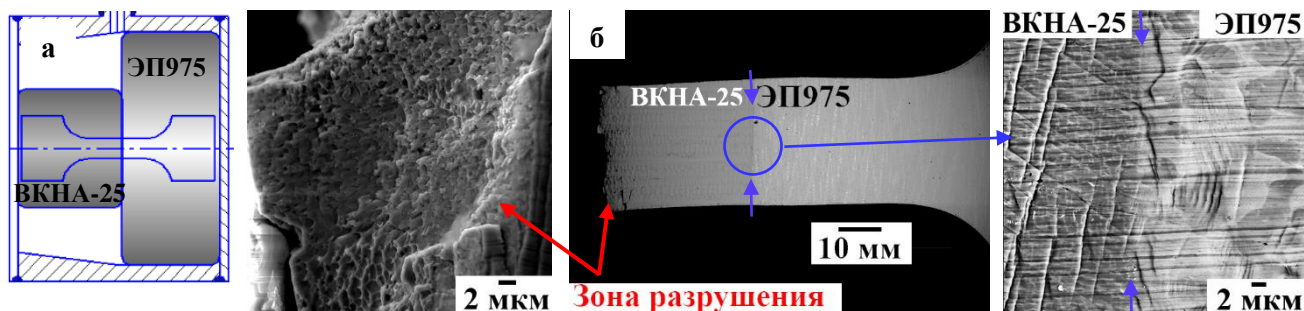


Рисунок 7 – Схема вырезки образца на растяжение (а) и рабочая часть сварного образца после разрушения (б), СД при $T=1125 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_{\gamma\text{ЭП975}}=8 \text{ мкм}$, $\epsilon_{\text{ЭП975}}=24\%$; вакуум $P=5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, разрушение произошло по сплаву ВКНА-25 (РЭМ)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны режимы низкотемпературной ДТО сплавов ЭК61 ($T=950\dots750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $e=8\dots11$) и ЭП975 ($T=1000\dots950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $e=2,7$), обеспечивающие формирование в объемных заготовках УМЗ структуры смешанного типа, включающей УМЗ составляющую ($\sim 70\dots76\%$) с размерами зерен матрицы (γ -фазы) и второй фазы менее 1 мкм и более крупные частицы второй фазы размером до $2\pm 0,5$ мкм в сплаве ЭК61 и $4,5\pm 1,2$ мкм в сплаве ЭП975.
2. Сплавы с различным типом упрочняющей фазы ЭК61 (Ni_3Nb) и ЭП975 ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) с УМЗ структурами смешанного типа демонстрируют признаки низкотемпературной СП. Максимальные характеристики СП ($m\geq 0,4$, $\delta>1000\%$) наблюдаются в сплаве ЭП975 при $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в сплаве ЭК61 при $T=800$ и $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Впервые показано, что СД в условиях СП деформируемых сплавов ЭК61 и ЭП975 с МЗ или УМЗ структурой является эффективным методом получения ТФС с литыми интерметаллидными сплавами на основе Ni_3Al с монокристаллической структурой. При СД вся деформация локализуется в сплавах ЭК61 и ЭП975, а степень деформации интерметаллидных сплавов типа ВКНА не превышает $1\dots2\%$. Ширина диффузионной зоны ТФС определяется химическим составом сплавов и условиями СД. Хрупких частиц избыточных фаз в зоне ТФС не обнаружено.
4. Исследованы закономерности формирования градиентных структур в зоне ТФС разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25 в зависимости от температуры СД, степени деформации соединяемого сплава ЭП975 и его исходной микроструктуры. Формирование УМЗ структуры в сплаве ЭП975 позволяет получить ТФС при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, прочность которого достигает 0,6 от прочности сплава ВКНА-25. Увеличение температуры СД с 950 до $1175\text{ }^{\circ}\text{C}$ и/или степени деформации с 24 до 40% при $T=1125\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к формированию ТФС практически без пор, а также расширению диффузионной зоны с 18 мкм до $30\dots55$ мкм и повышению прочности сварного соединения. Прочность сварных образцов с ТФС, полученных СД при температурах 1125 и $1175\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Вакуум $P=5\cdot 10^{-2}$ Па), соответствует интерметаллидному сплаву ВКНА-25, все образцы, испытанные при комнатной температуре, разрушились по сплаву ВКНА-25.
5. Термическая обработка сварных образцов из разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25, по режиму, рекомендованному для сплава ЭП975, приводит к более плавному изменению фазового и химического состава в зоне ТФС, в которой формируется диффузионная зона. Химический состав зоны ТФС промежуточный между соединяемыми сплавами. После термической обработки увеличивается ширина зоны диффузионного взаимодействия в $2\dots4$ раза. Прочность сварных образцов соответствует уровню $\sim 0,7\dots 1\sigma_{\text{в}}$ относительно прочности интерметаллидного сплава ВКНА-25 или даже несколько превышает.
6. На основе результатов проведенных исследований разработан способ получения ТФС между интерметаллидными сплавами на основе Ni_3Al с монокристаллической структурой и деформируемыми сплавами типа ЭП975 в условиях СП. Новизна технического решения защищена патентом Российской Федерации №2608118 «Способ изготовления биметаллического соединения». Разработаны технологические рекомендации Инв. № ТР. 49 ИНЕБ-21 ИПСМ РАН по подготовке УМЗ структуры в сплавах ЭК61 и ЭП975.

Список цитируемой литературы:

1. Кишкин, С. Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (К 100-летию со дня рождения) / С. Т. Кишкин. – М. : Наука, 2006. – 407 с.
2. Симс, Ч. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. / Ч. Симс, Т. Столофф, В. Хагель; в 2-х кн. – пер. с англ. – М. : Металлургия, 1995. – 568 с.
3. Логунов, А. В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин / А. В. Логунов – М. : ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. – 854 с.
4. Оспенникова, О. Г. Изготовление конструкции типа «Блиск» из разноименного сочетания материалов (Обзор) / О. Г. Оспенникова, В. И. Лукин, А. Н. Афанасьев–Ходыкин, И. А. Галушка // Труды ВИАМ. Жаропрочные стали и сплавы. – 2018. – № 10 (70). – С. 10–16.
5. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технология: коллективная монография / Р. Р. Мулюков, Р. М. Имаев, А. А. Назаров, В. М. Имаев, М. Ф. Имаев, В. А. Валитов, Р. М. Галеев, С. В. Дмитриев, А. В. Корзников, А. А. Круглов, Р. Я. Лутфуллин, М. В. Маркушев, Р. В. Сафиуллин, О. Ш. Ситдииков, В. Г. Трифионов, Ф. З. Утяшев; под ред. Р. Р. Мулюкова, Р. М. Имаева, А. А. Назарова, М. Ф. Имаева – М. : Наука, 2014. – 284 с.
6. Кайбышев, О. А. Влияние содержания γ' -фазы на режимы подготовки структуры и сверхпластичность жаропрочных никелевых сплавов / О. А. Кайбышев, Ф. З. Утяшев, В. А. Валитов // МиТОМ. – 1989. – № 7. – С. 40–44.

Основное содержание диссертации представлено в следующих научно-технических публикациях

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Галиева, Э. В.** Влияние всесторонней изотермическойковки на структуру и сверхпластические свойства сплава ЭК61 / Э. В. Галиева, В. А. Валитов, Е. Ю. Класман // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 461–465.
2. Дроздов, А. А. Влияние температуры сварки давлением деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА–25 на строение и свойства сварных образцов / А. А. Дроздов, К. Б. Поварова, В. А. Валитов, **Э. В. Галиева**, Э. Г. Аргинбаева, О. А. Базылева, М. А. Булахтина, А. Н. Раевских // Металлы. – 2020. – № 4. – С. 48–55. (Drozdov, A. A. Effect of the temperature of pressure welding of a wrought EP975 nickel alloy and a single-crystal intermetallic VKNA-25 alloy on the structure and properties of the welded joints / A. A. Drozdov, K. B. Povarova, V. A. Valitov, **E. V. Galieva**, E. G. Arginbaeva, O. A. Bazyleva, M. A. Bulakhtina, A. N. Raevskikh // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2020, N 7. – P. 752–759).
3. **Галиева, Э. В.** Строение и свойства твердофазных соединений деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА–25, полученных сваркой давлением со степенью деформации 24% в условиях

сверхпластичности сплава ЭП975 / Э. В. Галиева, К. Б. Поварова, А. А. Дроздов, В. А. Валитов // *Металлы*. – 2018. – № 6. – С. 64–72. (**Galieva, E. V.** Structure and properties of the solid-phase joints of a wrought EP975 nickel alloy and a single-crystal intermetallic VKNA-25 alloy formed by pressure welding at a strain of 24% under the superplasticity of the EP975 alloy / E. V. Galieva, K. B. Povarova, A. A. Drozdov, V. A. Valitov // *Russian Metallurgy (Metally)*. – Vol. 2018, N 11. – P. 1067–1073).

4. **Валитова, Э. В. (Галиева Э. В.)** Влияние скорости и температуры деформации на микроструктуру и свойства ультрамелкозернистого свариваемого сплава ХН58МБЮД / Э. В. Валитова, Р. Я. Лутфуллин, В. А. Валитов // *Перспективные материалы*. – 2013. – № 15. – С. 30–34.

5. **Валитова, Э. В. (Галиева Э. В.)** Формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры методами интенсивной пластической деформации в никелевом сплаве ХН58МБЮД / Э. В. Валитова (Галиева Э. В.), М. Х. Мухаметрахимов, Р. Я. Лутфуллин, В. А. Валитов // *Перспективные материалы*. – 2013. – № 15. – С. 35–39.

6. **Валитова, Э. В. (Галиева Э. В.)** Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки / Э. В. Валитова (Галиева Э. В.), А. Х. Ахунова, В. А. Валитов, С. В. Дмитриев, Р. Я. Лутфуллин, М. Х. Мухаметрахимов // *Письма о материалах*. – 2014. – Т. 4, № 3. – С. 190–194.

7. **Valitova, E. V. (Galieva E. V.)** Pressure welding of nickel-based 58Ni–Cr–Mo–B–Al–Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions / E. V. Valitova (E. V. Galieva), R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrahimov, V. A. Valitov, A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev // *Letters on materials*. – 2014. – Vol. 4, № 4. – P. 291–294.

8. Поварова, К. Б. Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («Блисков») и способа их соединения / К. Б. Поварова, В. А. Валитов, С. В. Овсепян, А. А. Дроздов, О. А. Базылева, **Э. В. Валитова (Галиева Э. В.)** // *Металлы*. – 2014. – № 5. – С. 61–70. (Povarova, K. B. Study of the properties and the choice of alloys for bladed disks (Blisks) and a method for their joining / K. B. Povarova, V. A. Valitov, S. V. Ovsepyan, A. A. Drozdov, O. A. Bazyleva, **E. V. Valitova (E. V. Galieva)** // *Russian Metallurgy (Metally)*. – Vol. 2014, N. 9. – P. 733–741).

9. Дроздов, А. А. Влияние степени деформации при сварке давлением деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА–25 на строение и свойства сварных образцов / А. А. Дроздов, К. Б. Поварова, В. А. Валитов, О. А. Базылева, **Э. В. Галиева**, М. А. Булахтина, Э. Г. Аргинбаева // *Металлы*. – 2019. – № 6. – С. 53–64. (Drozdov, A. A. Effect of the deformation during pressure welding of a wrought EP975 nickel alloy and a single-crystal intermetallic VKNA-25 alloy on the structure and properties of the welded joints / A. A. Drozdov, K. B. Povarova, V. A. Valitov, O. A. Bazyleva, **E. V. Galieva**, M. A. Bulakhtina, E. G. Arginbaeva // *Russian Metallurgy (Metally)*. – Vol. 2019, N 11. – P. 1195–1204).

10. Ахунова, А. Х. Моделирование процесса сварки давлением при наличии рельефа на свариваемых поверхностях / А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, **Э. В. Валитова (Э. В. Галиева)**, В. А. Валитов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т. 11, № 2. – С. 159–162.

11. Ахунова, А. Х. Локализация деформации в зоне сварки давлением образцов с рельефом на свариваемых поверхностях / А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, В. А. Валитов, **Э. В. Валитова (Э. В. Галиева)** // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 11. – С. 13–17.
12. Дроздов, А. А. Формирование твердофазных соединений жаропрочного дискового никелевого сплава с ультрамелкозернистой структурой и монокристалльного лопаточного сплава на основе Ni₃Al / А. А. Дроздов, В. А. Валитов, К. Б. Поварова, О. А. Базылева, **Э. В. Галиева**, С. В. Овсепян // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5, № 2. – С. 142–146.
13. Ахунова, А. Х. Роль сдвиговой компоненты деформации при сварке давлением образцов из разнородных литых и деформируемых сплавов на основе никеля / А. Х. Ахунова, **Э. В. Галиева**, А. А. Дроздов, Э. Г. Аргинбаева, С. В. Дмитриев, Р. Я. Лутфуллин // Письма о материалах. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 211–216.
14. Поварова, К. Б. Формирование градиентных структур в зоне соединения деформируемого никелевого и монокристаллического интерметаллидного сплава при термодиффузионной сварке давлением и термической обработке / К. Б. Поварова, В. А. Валитов, А. А. Дроздов, О. А. Базылева, **Э. В. Галиева**, Э. Г. Аргинбаева / Металлы. – 2018. – № 1. – С. 48–57. (Povarova, K. B. Formation of gradient structures in the zone of joining a deformable nickel alloy and a single-crystal intermetallic alloy during thermodiffusion pressure welding and subsequent heat treatment / K. B. Povarova, V. A. Valitov, A. A. Drozdov, O. A. Bazyleva, **E. V. Galieva**, E. G. Arginbaeva // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2018, N. 1. – P. 42–50).

Публикации в зарубежных рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science):

15. **Galieva, E. V.** Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys / E. V. Galieva, R. Ya. Lutfullin, A. Kh. Akhunova, V. A. Valitov, S. V. Dmitriev / Science and technology of welding and joining. – 2018. – Vol. 27, N 7. – P. 612–618. Квартиль Q1
16. **Galieva, E. V.** Low-temperature superplasticity of the Ni-based EK61 superalloy and application of this effect to obtain solid phase joints / E. V. Galieva, V. A. Valitov, R. Ya. Lutfullin, A. A. Bikmukhametova / Defect and Diffusion Forum. – 2018. – Vol. 385, – P. 150–154.
17. **Galieva, E. V.** Solid-phase joining of the cast intermetallic Ni₃Al-based alloy and deformed nickel-based alloys using superplastic deformation / E. V. Galieva, R. Ya. Lutfullin / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 447.
18. **Galieva, E. V.** Experimental and simulation modelling Nickel-based alloy pressure welding / E. V. Galieva, V. A. Valitov, R. Ya. Lutfullin, S. V. Dmitriev, A. Kh. Akhunova, M. Kh. Mukhametrakhimov // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 838–839. – P. 350–354.
19. Lutfullin, R. Ya. Influence of superplastic deformation on the quality of solid-phase joints obtained by welding of crystalline alloys / R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov, **E. V. Galieva** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 1008, N. 012011.

20. Valitov, V. A. Reseach of solid compound formation during thermal deformation effect on intermetallic Ni₃Al–alloy with a heat–resistant alloy EP975 and influence on the physical, mechanical and performance properties / V. A. Valitov, K. B. Povarova, O. A. Bazyleva, A. A. Drozdov, S. V. Ovsepyan, **E. V. Galieva** // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 838–839. – P. 523–527.

Прочие публикации:

21. **Галиева, Э. В.** Механические свойства сплава ХН58МБЮД с ультрамелкозернистой структурой / Э. В. Галиева, Р. Я. Лутфуллин, В. А. Валитов, П. А. Классман, М. И. Нагимов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах : Механика деформируемого твердого тела. – 2019. – Т. 3. – С. 284–286.
22. Бикмухаметова, А. А. Сверхпластичность никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 / А. А. Бикмухаметова, **Э. В. Галиева**, В. А. Валитов, Р. Я. Лутфуллин, Е. Ю. Классман, М. И. Нагимов // Сборник тезисов докладов «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы». Уфа. Россия. – 2018. – С. 82.
23. Булахтина, М. А. Влияние условий проведения сварки давлением и термической обработки на строение и свойства твердофазных соединений инерметаллидного сплава ВКНА–25 моно с суперсплавом ЭП975 / М. А. Булахтина, **Э. В. Галиева**, К. Б. Поварова, А. А. Дроздов, В. А. Валитов // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». Сборник материалов. – 2020. – Т. I. – С. 57–64.
24. **Галиева, Э. В.** Твердофазная сварка сплавов на основе никеля в условиях сверхпластичности / Э. В. Галиева, Е. Ю. Классман, М. А. Булахтина, А. А. Бикмухаметова, А. Х. Ахунова // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа–2020». – 2020. – С. 163.
25. Бикмухаметова, А. А. Физическое и компьютерное моделирование влияния рельефа поверхности при сварке давлением никелевых сплавов / А. А. Бикмухаметова, **Э. В. Галиева**, А. Х. Ахунова // Сборник трудов секции «Механика и моделирование материалов и технологий» Международной молодежной научной конференции «XLV Гагаринские чтения». – 2019. – С. 23–25.
26. Технологические рекомендации. Деформационно-термическая обработка никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 для получения ультрамелкозернистой структуры в объемных заготовках / Р. Я. Лутфуллин, В. А. Валитов, **Э. В. Галиева**, Е. Ю. Классман // г. Уфа. : ИПСМ РАН, 2021. – 23 с. – Инв. № ТР. 49 ИНЕБ-21.

Патент:

27. Способ изготовления биметаллического изделия [Текст] : пат. 2608118 Рос. Федерация : МПК В 23 К 20/14, В 23 К 20/22 / В. А. Валитов, Р. Р. Мулюков, О. Г. Оспенникова, К. Б. Поварова, О. А. Базылева, **Э. В. Галиева**, Р. Я. Лутфуллин, С. В. Овсепян, С. В. Дмитриев, А. Х. Ахунова, А. А. Дроздов, М. Х. Мухаметрахимов ; заявитель и патентообладатель ИПСМ РАН. – N 2015128846 ; заявл. 15.07.2015 ; опубл. 13.01.2017, Бюл. 2. – 26 с.