

На правах рукописи



Пицък Виктор Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ НЕРАЗЪЕМНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА ОТ4-1 В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОЙ
ТУГОЙ ПОСАДКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ
НА ИХ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВА**

Специальность 2.6.17 – Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства».

Научный руководитель: **Дмитриев Эдуард Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Научный консультант: **Муравьев Василий Илларионович** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Официальные оппоненты **Гордиенко Павел Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт химии ДВО РАН», г. Владивосток

Бурдасова Александра Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов», ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита состоится 9 февраля 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/ 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/168.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При создании современных летательных аппаратов (ЛА) все шире применяются титан и сплавы на его основе благодаря их уникальным свойствам (высокие прочностные показатели при небольшой плотности, высокая пластичность, повышенная коррозионная стойкость, способность работать длительное время при повышенных температурах (до 500 °С) без потери технологических свойств и т.д.). Данная группа материалов нашла широкое применение при изготовлении трубопроводных систем (ТС) различного назначения, изготовление которых невозможно без применения неразъемных соединений (НС). Стоит отметить, что порядка 15 % общей трудоемкости изготовления ЛА составляет производство и монтаж его ТС, общая протяженность данных систем на одном ЛА может достигать нескольких километров.

Опыт эксплуатации ЛА показывает, что их ресурс в значительной мере определяется долговечностью элементов конструкции. Данные статистики показывают, что 15-20 % всех аварийных ситуаций, возникающих при эксплуатации ЛА, связано с выходом из строя его ТС. При этом в 75 – 85 % случаев выход из строя ТС связан с потерей прочности НС. Это, в первую очередь, связано с наличием в приконтактном объеме (ПО) НС материала с составом, структурой и свойствами, отличными от основного металла (ОМ). Наличие разнородных и переходных областей в ПО НС в первую очередь определяется технологией его получения.

Наличие переходных и разнородных зон в ПО НС характерно для всех наиболее распространенных методов, используемых при изготовлении ТС ЛА – аргодуговой сварки плавлением (АрДС) и пайки токами высокой частоты (ПТВЧ). Кроме того данные методы имеют целый ряд ограничений металлургического и технологического характера: необходимость подачи присадочного материала или припоя; необходимость специальной защиты зоны НС – подача газа или флюса; наличие зоны термического влияния; остаточные напряжения и деформации; высокая вероятность возникновения дефектов металлургического характера; необходимость вращения заготовки или перемещения сварочной дуги по орбите; наличие переходной муфты, существенно увеличивающей вес соединения, значительные габаритные размеры используемого оборудования и т.д. Перечисленные особенности не только ограничивают повсеместное применение данных способов при изготовлении ТС, но в ряде случаев вообще делают их применение нецелесообразным. Так, использование дуговой сварки при монтаже топливных систем и трубопровода высокого давления с использованием дуговой сварки нецелесообразно в силу невозможности проведения процесса дугой сварки в стесненных условиях.

Применение традиционных методов диффузионной сварки включающих нагрев до температуры фазового превращения при постоянном давлении извне на соединяемые заготовки позволяет исключить образование переходных и разнородных областей в ПО НС, однако, специфические условия термомеханического цикла получения НС, необходимость проведения процесса в вакууме существенно ограничивают номенклатуру и габаритные размеры изготавливаемых деталей, и значительно увеличивают их себестоимость. Таким образом,

несмотря на то, что традиционные методы диффузионной сварки позволяют получить НС, в ПО которых материал имеет состав, структуру и технологические свойства аналогичные ОМ, а также исключают возникновение металлургических дефектов, их применение в большинстве случаев экономически неэффективно или технологически невозможно, особенно при создании ТС ЛА. Решение этих проблем выдвигает ряд задач различной сложности, не решенных в ранее проведенных исследованиях.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в рамках:

1. НИР «Разработка термических и деформационных технологий создание и обработки гетерогенных материалов на основе динамики структурных превращений и компьютерного материаловедения» в рамках гранта по программе «Стратегическое развитие ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» на 2012-2016 гг.», 2011-ПР 054, приказ №2280 от 27.07.2012.

2. НИР «Исследование процессов формирования диффузионных соединений из конструкционных материалов, обеспечивающих эксплуатационную надежность конструкций» в рамках гранта по программе «мол_а» Российского фонда фундаментальных исследований на 2014-2016 гг. Государственный регистрационный номер ЦИТиС: 01201453032.

Цель диссертационной работы: исследование влияния напряженно-деформационного состояния и термической обработки в условиях фазовых превращений на эволюцию структуры и свойств диффузионных неразъемных соединений изделий из титановых сплавов.

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

1. Анализ возможностей применения методов получения неразъемных соединений в твердом состоянии при изготовлении трубопроводных систем летательных аппаратов из титановых сплавов.

2. Исследование и разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния, обеспечивающего физический контакт сопрягаемых поверхностей по величине натяга при холодной тугой посадке;

3. Установление влияния степени напряженно-деформационного состояния (величина натяга) на изменение структуры, состава и свойства материала при контактного объема неразъемного соединения.

4. Исследование влияния термических условий на кинетику и температурную зависимость процессов изменения структуры и свойств материала при контактного объема диффузионного неразъемного соединения с предельной степенью (величиной натяга) напряженно-деформированного состояния.

5. Разработка технологического приема получения качественных неразъемных соединений титанового сплава ОТ4-1 по результатам исследований.

Объект исследования: материал приконтактного объема неразъемного соединения, полученный в условиях холодной тугой посадки.

Предметы исследования: процессы, происходящие в приконтактном объеме материала диффузионного неразъемного соединения, получаемого в условиях холодной тугой посадки и последующей термической обработки.

Научная новизна заключается в установлении закономерностей изменения структуры и свойств материала приконтактного объема (ПО) неразъемного

соединения (НС) от величины натяга при холодной тугой посадке (ХТП) и последующей термообработки в интервале фазового превращения сплава ОТ4-1 в системе заготовок «втулка-вал», позволяющих получать качественные НС со структурой и свойствами идентичными свойствам основного металла.

Экспериментально установлено ХТП с предельным натягом (450 мкм, площадью физического контакта более 60%) приводит к образованию структуры в материале приконтактного объема неразъемного соединения с характерным деформационным рельефом (следы скольжения по границам зерен – уменьшение контактных поверхностей и объемного взаимодействия, как в плоскости контакта (сужение и искривление зерен), так и в объеме зоны контакта (разрывы, завихрения зерен и очаги выхода дислокаций)). Наиболее полно отражает структурные изменения материала приконтактного объема неразъемного соединения основные показатели интерфейса структурного состояния (удельный параметр организации структуры – q_c ; средняя плотность зерен – q ; средняя плотность границ зерен – q_{cp} ; развитость границ зерен – q_{yd} ;) в разы (10; 4; 1,8; 1,5 соответственно) превышающие таковые основного металла в исходном состоянии, что свидетельствует об избыточных остаточных напряжениях. При этом диффузионные процессы приводят к изменению распределения легирующих элементов, микротвердости в ПО, их скачкообразный характер и в особенности по величине разброса, четко прослеживаются процессы стадийности – дискретности изменения под влиянием упруго-пластической деформации. Расчетами распределения плотности дислокаций (скачкообразный характер увеличения и уменьшения) установлено полное совпадение с закономерностями изменения структур, распределения легирующих элементов и микротвердости при ХТП системы «втулка-вал» с натягом 450 мкм сплава ОТ4-1.

Установлено появление стадии образования глобулярной структуры при нагреве пластически-деформированного металла в температурно-временных условиях фазового превращения. С увеличением температуры время существования глобулярной составляющей структуры уменьшается. Снижение уровня напряженно-деформированного состояния материала приконтактного объема неразъемного соединения увеличивает время существования глобулярной составляющей структуры и способствует ее появлению при более низких температурах и выдержки.

Показано, что при температурах 925, 950 °С с выдержкой 60 минут, 975 °С - 20 минут, и 1000 °С -10 минут происходит перераспределение дислокаций, которые в области скопления собираются в ячеистую структуру с образованием правильных границ.

Выявлена при переходе к температурам 975-1000 °С высокая скорость протекания диффузионных процессов, вызывающая при увеличении выдержки переход стадии полигонизации к стадии рекристаллизации, т.е. диффузионное взаимодействие завершается и структура ПО становится идентичной структуре основного металла (ОМ) характеризующаяся повышенной прочностью по сравнению с отожжённым состоянием.

Количественная оценка структурных изменений, как по основным параметрам интерфейса структурного состояния, так и рекристаллизационных диф-

фузионных процессах позволяют выявить механизм, кинетику и температурную зависимость структурных изменений от степени пластической деформации и режимов термической обработки и определять температурно-временные условия термической обработки, обеспечивающие «залечивание» несплошностей, исчезновение границ раздела и свойства идентичные свойствам основного металла (скоростной нагрев в автономном вакууме до температур 920, 950, 975 и 1000 °С при выдержке 60, 40, 20 и 10 минут соответственно). Усилие на выпрессовку неразъемных соединений и сплава ОТ4-1, полученных при обозначенных условиях, составляет более 960 Мпа, что превышает прочность при срезе для основного материала.

Практическая значимость от реализации результатов работы:

1. Определены условия формирования в материале приконтактного объема неразъемного соединения, получаемого холодной тугой посадкой, напряженно-деформационного состояния приводящего к изменению основных показателей интерфейса структурного состояния, которые используются как фактор активации процессов рекристаллизации.

2. Определен вид и технологические режимы термической обработки, обеспечивающие получение материала приконтактного объема неразъемного соединения, полученного в условиях холодной тугой посадки, с составом и структурой аналогичными основному металлу и более высокими технологическими свойствами.

3. Разработана и экспериментально проверена методика расчета значения натяга для заготовок системы «втулка-вал», обеспечивающего достаточный уровень физического контакта для получения качественного неразъемного соединения.

4. Для заготовок системы «втулка-вал» из сплава ОТ4-1 установлено предельное значение натяга (450 мкм), обеспечивающее получение материала приконтактного объема неразъемного соединения, полученного холодной тугой посадкой с последующей термической обработки, структура, состав и свойства которого аналогичны основному металлу.

5. Разработан технологический прием получения неразъемных соединений заготовок системы «втулка-вал», за счет холодной тугой посадки и последующей термической обработки, обеспечивающий получение материала в приконтактном объеме неразъемного соединения, состав, структура и свойства которого аналогичны основному металлу.

6. Разработана схема установки термической обработки в автономном вакууме, предусматривающая нагрев соединяемых элементов конструкции в слое электропроводных графитизированных частиц, что позволяет за счет высокой скорости нагрева до заданной температуры, интенсифицировать процесс рекристаллизации, что обеспечивает получение материала в приконтактном объеме неразъемного соединения, состав, структура и свойства которого аналогичны основному металлу.

7. Теоретические положения и практические результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, внедрены в учебный процесс в виде лекционных и лабораторных занятий на кафедрах «Материаловедение и технология но-

вых материалов» и «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Методология и методы диссертационного исследования:

Проведенные исследования основаны и сочетаются с: трехстадийной теорией образования НС в твердом состоянии; теорией пластической деформации, триботехники, формирования соединений с тугой посадкой. Полученные закономерности эволюции структуры и свойств материала ПО НС, полученного в условиях ХТП с последующей ТО, на примере титанового сплава ОТ4-1, отвечают теоритическим аспектам фазовых преобразований протекающих в титановых сплавах в ходе ТО.

Структура и химический состав материала ПО НС исследовались методами: спектрального оптико-эмиссионного анализа, оптической и растровой электронной микроскопией (РЭМ), компьютерной металлографии; микрорентгеноструктурного анализа.

Микродюриметрия проводилась по методу Викерса (ГОСТ 9450-76). Определение температуры фазового $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращения образцов из сплава ОТ4-1 определялась путем дилатометрических исследований. Контроль герметичности и плотности материала ПО НС проводился методами капиллярной дефектоскопии (ГОСТ 18442-80) и радиографического контроля (ГОСТ 7512-82).

Прочностные свойства НС проводились путем выпрессовки «вала» из «втулки» на исследовательском комплексе Instron 3382.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа по определению возможностей применения методов получения неразъемных соединений в твердом состоянии при изготовлении, как трубопроводных систем, так и других элементов конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов.

2. Методика оценки напряженно-деформированного состояния, обеспечивающая физический контакт сопрягаемых поверхностей по величине натяга при холодной тугой посадке заготовок системы «втулка-вал».

3. Результаты по определению влияния степени напряженно-деформационного состояния (величина натяга) на изменение структуры, состава и свойства материала приконтактного объема неразъемного соединения.

4. Результаты исследований по влиянию термических условий на кинетику и температурную зависимость процессов изменения структуры и свойств материала приконтактного объема неразъемного соединения с предельной степенью (величиной натяга) напряженно-деформированного состояния.

5. Технологический прием получения качественных неразъемных соединений заготовок системы «втулка-вал» титанового сплава ОТ4-1.

Достоверность полученных результатов обеспечивается системным подходом к исследованиям, привлечением современных, преимущественно стандартных и взаимно дополняющих друг друга экспериментально-аналитических методов и испытаний на современном и поверенном оборудовании; полученные результаты не противоречат общепринятой теории формирования диффузионных НС.

Результаты, полученные в ходе работы, докладывались и обсуждались на: Основные результаты работы доложены и обсуждены на: 43-ой научно-технической конференции аспирантов и студентов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (Комсомольск-на-Амуре, 2013); школе-семинаре по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения» (Комсомольск-на-амуре, 2013); VI всероссийской конференции молодых ученых и аспирантов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2013); XVII всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2013); V международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013)» (Курск, 2013); 44-ой научно-технической конференции аспирантов и студентов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (Комсомольск-на-Амуре, 2014); дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» «Владивосток, 2014»; XVIII всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2014); III всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Комсомольск-на-Амуре, 2014); международной научно-технической конференции «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения» (Комсомольск-на-Амуре, 2015); международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2015); краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов в сфере научного творчества (Хабаровск, 2016) 9-ом Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2017); 20-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2021); 5 Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2021).

Публикации результатов исследований. По результатам исследований опубликовано 16 работ, из них 6 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 публикация в зарубежном издании, входящая в перечень Scopus, 8 публикаций в журналах, сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, включая патент на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в анализе состояния вопроса, разработке методики экспериментов и их проведении, обработке полученных результатов, написании статей, подготовке докладов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Работа изложена на 253 страницах машинописного текста (включая приложения), содержит 46 таблиц, 96 рисунков, список литературы из 131 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, изложена научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая ценность и основные вопросы, рассмотренные в диссертации.

В первой главе показано, что титановые сплавы широко применяются при создании ТС ЛА. Анализ применяемых методов получения НС при изготовлении ТС ЛА (АрДС и ПТВЧ) показывает, что их общим и основным недостатком, является наличие в материале ПО НС материала со структурой, составом и свойствами отличны от ОМ. Применение традиционных методов диффузионной сварки позволяет исключить образование разнородных областей в материале ПО НС, однако, специфические условия термомеханического цикла получения НС, существенно ограничивают номенклатуру и габаритные размеры изготавливаемых деталей, и значительно увеличивают их себестоимость. Решение этих проблем выдвигает ряд задач различной сложности, не решенных в ранее проведенных исследованиях.

Оценка современного состояния вопроса разработки и совершенствования традиционных методов диффузионной сварки показал, что основное внимание в работах зарубежных авторов (S. Chatterjee, S. Kundu, Y. Deng, и др.) уделяется вопросам соединения титановых сплавов со сталями и сплавами цветных металлов, а так же интенсификации процессов формирования НС за счет использования переходных прослоек. В России вопросами развития диффузионной сварки титановых сплавов занимаются А.В. Люшинский, В.Р. Пешков, А.М. Семенов, М.И. Плышевский, М.И. Новожилов, А.Б. Булков, В.Р. Петренко и др. Основными направлениями отечественных исследований являются: применение различных переходных прослоек; получение биметаллических соединений титановых сплавов со сталями; изучение кинетики формирования НС и влияния технологических параметров процесса получения НС и исходной структуры соединяемых заготовок на свойства соединения. Наибольший интерес представляют работы В.И. Муравьева, П.В. Бахматова и А.Ф. Мельничука по разработке технологического приема изготовления корпуса замка из листовой заготовки из сплава ВТ20 и трубной холоднопрессованной порошковой заготовки из сплава 2М2А.

Во второй главе представлены традиционные и разработанные методы исследования, материалы, приборы и установки.

В работе использовались образцы типа втулка-вал из сплава ОТ4-1 (ГОСТ 19807-91), на которых: определялось влияние напряженно-деформационного состояния (величина натяга) на структуру, состав и свойства материала ПО НС; определялось влияние термических условий контакта на структуру, состав и свойства материала ПО НС, полученного в системе «втулка-вал» в условиях ХТП; оценивался уровень механических свойств соединений посредством проведения испытаний на выпрессовку; оценивалась герметичность соединения методами неразрушающего контроля качества. Образцы изготавливались на высокоточных станках с ЧПУ (16К20Ф3, VF-1). Запрессовка образцов производилась на испытательной машине INSTRON 3382. Анализ химического состава образцов и зона соединения производился на оптико-эмиссионном спектрометре Q4 Tasman 170 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) S 3400-N.

Оптическая микроскопия проводилась на металлографическом микроскопе Nikon MA200 в диапазоне увеличений 200-1500 крат. РЭМ выполнялась на микроскопе марки S 3400-N в диапазоне увеличений 500-10000 крат. Компьютерная обработка микроструктуры осуществлялась в программе Image-Pro Plus. Измерение шероховатость образцов производилось с использованием плофилметра Elcometer 7061 MarSurf PS1. Испытания на выпрессовку производились на испытательной машине INSTRON 3382. Микродюриметрия производилось на микротвердомере НМV-2. Дилатометрические исследования проводились на дилатометре DIL 402 РС. Радиографический контроль качества НС (ГОСТ 7512-82) производился с использованием портативного рентген аппарат РПД-150 и радиографической пленки AGFA D8. Капиллярная дефектоскопия (ГОСТ 18442-80) НС производилась с использованием комплекта для цветной дефектоскопии от компании Sherwin.

Автором предложена методика определения значения натяга (N) в системе «втулка-вал», обеспечивающего достаточный уровень физического контакта для получения качественного НС, основанная на общих положениях триботехники и теории деформаций:

$$N = 1,2 \times (Ra_1 + Ra_2) + \frac{A_r \times d \times \left(\frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1 \quad \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} + \mu_2 \right)}{E_1 + E_2} \times 0,4 \times E \times \Delta^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^{\frac{5}{4}}}{0,5 \times A_H \times (1 - \mu^2) \times b \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^{0,2} \times \left(\frac{R_{max}}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \times \left(1 + \frac{2,2 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^{-\frac{1}{6}}}{\Delta^{\frac{1}{6}}} \times \left(\frac{HB \times (1 - \mu^2)}{E}\right)^{\frac{1}{3}}\right)} \quad (1)$$

где, A_r – площадь физического контакта; A_H – номинальная площадь сопрягаемых поверхностей; Ra_1 и Ra_2 – шероховатость заготовок; b , и Δ – параметры шероховатости, зависящие от вида обработки; R_{max} – максимальная высота микронеровности, зависит от вида механической обработки; r – радиус кривизны вершины микронеровности, так же определяется видом обработки; HB – твердость материала по Бринеллю; E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуансона материала; d – номинальный диаметр соединения; d_1 – внутренний диаметр охватываемой заготовки; d_2 – наружный диаметр охватывающей заготовки.

В третьей главе приведены результаты исследований эволюции структуры и свойств материала ПО НС полученных в условии ХТП заготовок номинального размера системы «втулка-вал» из сплава ОТ4-1.

Экспериментальная оценка разработанной методики определения значения натяга, обеспечивающего требуемый уровень физического контакта, показала, что для повышения точности выражения (1) в него необходимо ввести поправочный коэффициент (k), который является функцией величины (A_r / A_H):

$$k = -10888 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^5 + 3636,9 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^4 + 10215 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^3 - 8091,9 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right)^2 + 1610,6 \times \left(\frac{A_r}{A_H}\right) + 0,0829. \quad (2)$$

На основании экспериментальных исследований и разработанной методики расчета требуемого значения натяга был определен уровень натяга 450 мкм, обеспечивающий максимально возможную площадь физического контакта – 60%.

Микроструктура претерпевает возрастающую пластическую деформацию соответственно увеличению натяга от 200 до 450 мкм. Аналогично исходной структуры α -пластины разделены прослойками вторичной α -фазы и распавшейся β -фазой. При удалении от границы раздела (сопряжения) степень деформации структуры уменьшается (рис. 1). Область физического контакта общая для «втулки и вала». Наблюдается чередование структурных колоний (физический контакт – от 4,73 до 12,84 мкм; значительная деформация зерен – от 3,92 до 16,22 мкм; переходная зона – 40-45 мкм) физического контакта, где структура мелкозернистых α -пластин без явно выраженных границ и далее деформированные α -пластины, собранные в колонии, параллельны между собой и ориентированы вдоль границы сопряжения.

Из данных рис. 1 е, ж явно видно развитие деформационного рельефа (следы скольжения по границам зерен) ПО, сближение контактных поверхностей и объемное взаимодействие, как в плоскости контакта, так и в объеме зоны контакта. Наличие следов скольжения, косвенно подтверждает, что холодная пластическая деформация трением скольжения в условиях ХТП сплава ОТ4-1 обусловлена движением дислокаций.

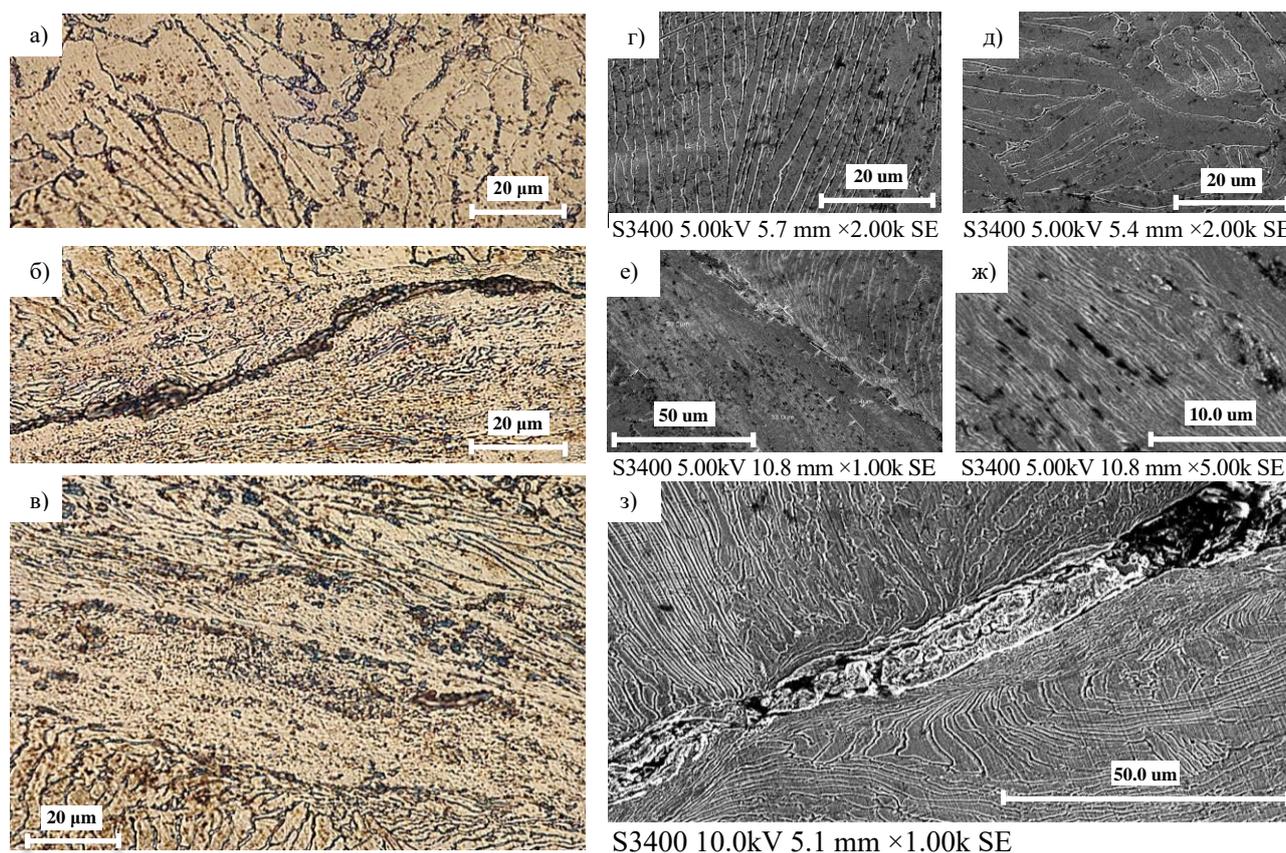


Рис. 1. Оптическая (а, б, в) и растровая электронная (г, д, е, ж, з) микроскопии ПО НС, полученного в условиях ХТП при различных натягах: б – 300 мкм; в, е, ж, з – 450 мкм; а, г, д – основной металл

Компьютерной металлографией установлено полное соответствие эволюции структурных изменений с оптической и рентгеновской микроскопией. Как видно из данных (рис. 2) с увеличением величины натяга средний диаметр зерна (d_{cp}), средняя ширина зерна (a_{cp}) и средняя длина (e_{cp}) уменьшаются; по ана-

логичной зависимости изменяются средняя площадь зерна (F_{cp}), средний периметр зерна (P_{cp}) и общая площадь зерен ($\sum F_i$), фрактальная размерность зерен (D) не изменяется; с увеличением величины натяга возрастают показатели – развитость границ зерен ($q_{уд}$) средняя плотность границ зерен (q_{cp}), плотность зерен (g) и удельный параметр организации структуры (q_c); по мере увеличения величины натяга возрастают число зерен (n) и общая площадь границ зерен ($\sum F_{гpi}$), и общий периметр границ зерен ($\sum P_{гpi}$).

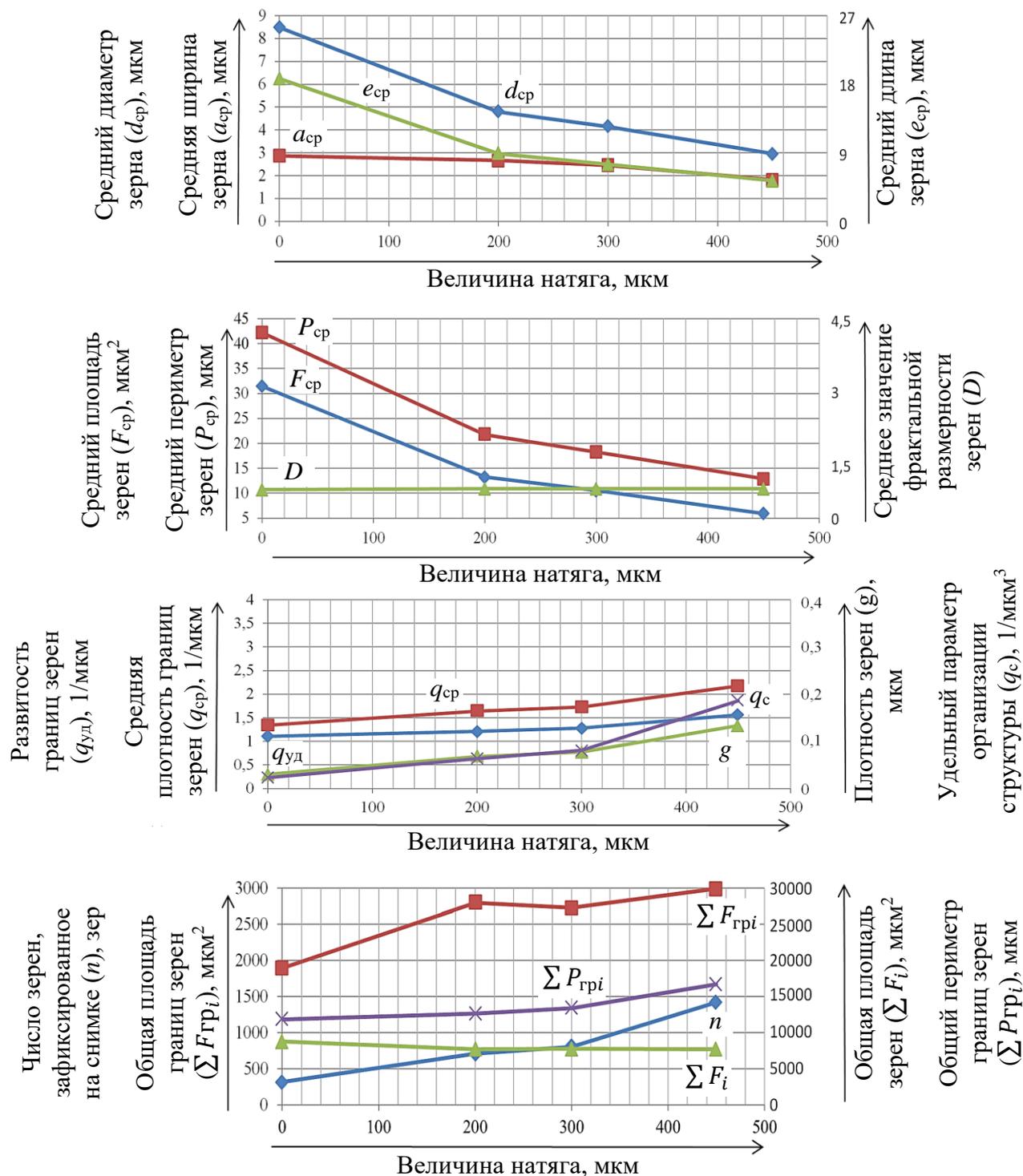


Рис. 2. Зависимость количественных показателей микроструктуры от величины натяга

ХТП образцов системы «втулка-вал» сплава ОТ4-1 приводит к существенному изменению распределения, как примесей, так и основных легирующих элементов в зависимости от величины натяга от 200 до 450 мкм в ПО НС (рис. 3).

Микроструктура материала ПО материала НС, полученного в условиях холодной ТП

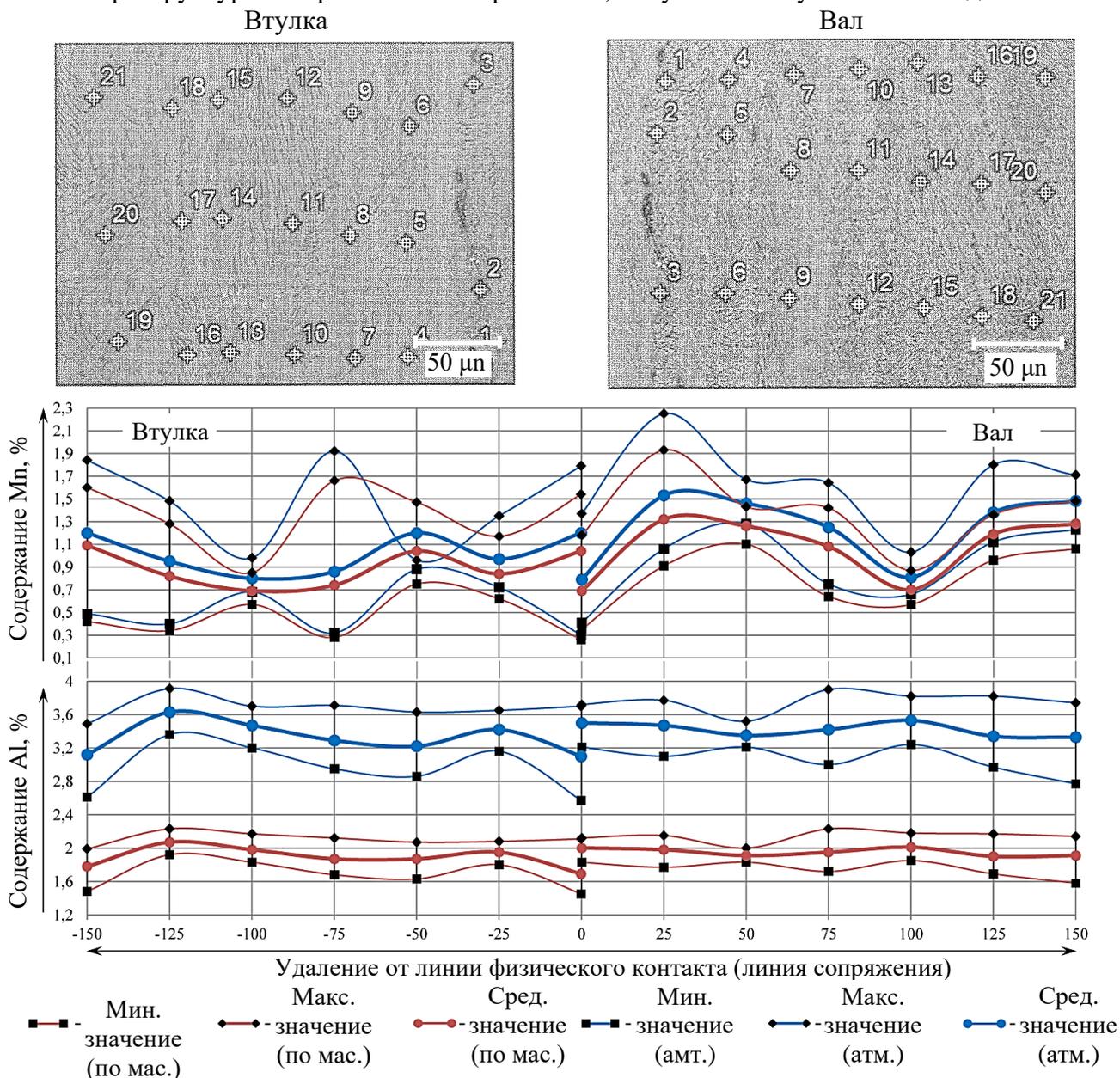


Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ точечного распределения легирующих элементов Al и Mn в α -твердом растворе ПО физического контакта по сечению образца системы «втулка и вал», полученного холодной ТП с натягом 450 мкм

Наблюдается общая тенденция повышения концентрации содержания элементов в материале ПО (от ± 0 до ± 1000 мкм), максимум в зоне сопряжения и равный основному металлу. По «скачкам» в изменении распределения средних значений содержания основных легирующих элементов Al и Mn в ПО физического контакта, и, в особенности, по величине разброса, четко прослежи-

ваются процессы стадийности-дискретности и изменения под влиянием упругопластической деформации.

Распределение микротвердости в материале ПО физического контакта неравномерное по всему сечению, «скачкообразный» разброс значений свидетельствует о дискретности процесса изменения микротвердости (рис. 4). Максимум значений в зоне физического контакта более чем на 200% превышает значения микротвердости основного металла. Резкое снижение микротвердости, как для ПО втулки, так и для вала наблюдается на расстоянии ± 100 мкм от линии физического контакта. Постепенное снижение микротвердости до значений основного металла наблюдается на расстоянии ± 1000 мкм от линии физического контакта.

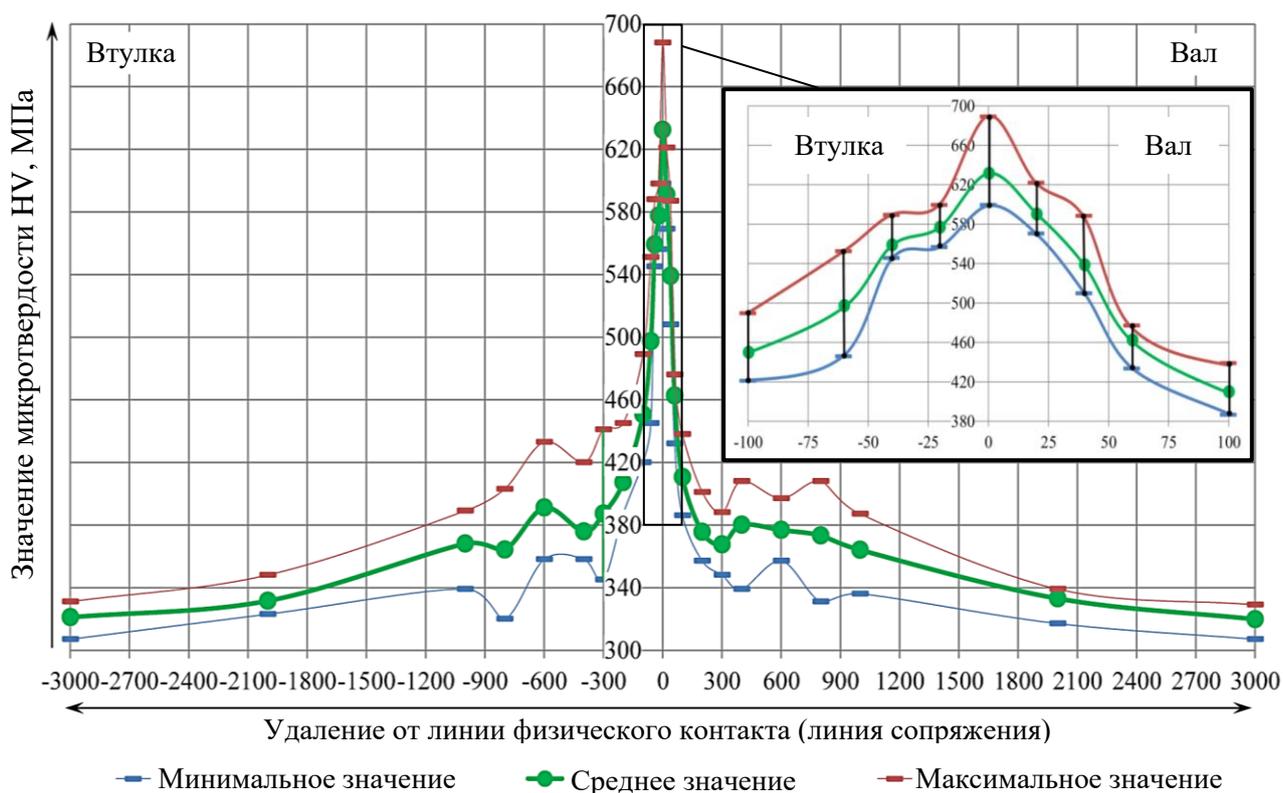


Рис. 4. Распределение микротвердости в материале ПО НС полученного холодной ТП с натягом 450 мкм заготовок системы «втулка-вал» из сплава ОТ4-1

Постепенность, стадийность, дискретность эволюции структуры, распределения легирующих элементов, микротвердости, и распределения плотности дислокаций, как в процессе увеличения натяга от 200 до 450 мкм, так и в процессе упругопластической деформации в системе «втулка-вал» из сплава ОТ4-1 обосновывается автокаталитическим релаксационным характером, когда конечный результат возвращает систему в исходное состояние с последующим повторением аналогичных циклов.

Условия ХТП системы «втулка и вал» из сплава ОТ4-1 с натягом 450 мкм способствует первой стадии образования физического контакта на площади соприкосновения 60% с существенным напряженным состоянием в объеме приконтактной области. При это прочность физического контакта увеличилась по

сравнению с натягом 200 мкм более чем на 50%, но по сравнению с прочностью основного металла составила всего 45%.

В четвертой главе установлено влияние теплового воздействия в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ превращения на структуру, состав и свойства материала ПО НС, полученного в условиях ХТП заготовок системы «втулка-вал» из сплава ОТ4-1. Экспериментально установлены режимы ТО, обеспечивающие получение материала ПО со структурой и свойствами аналогичными ОМ. Приведены результаты испытаний на выпрессовку, и неразрушающего контроля НС, полученных в условиях ХТП и последующей ТО.

Используемые режимы ТО, приведены в табл. 1.

Табл. 1 Режимы термической обработки образцов типа «втулка-вал», полученных при ТП заготовок из сплава ОТ4-1 при натяге 450 мкм

Номер режима ТО	Температура выдержки, °С	Время выдержки, мин	Защитная среда	Охлаждение
1	925	60	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
2	950	60	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
3	950	40	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
4	975	60	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
5	975	20	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
6	975	10	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
7	975	10	Защитная эмаль	В воде с приспособлением
8	975	60	Защитная эмаль	В воде с приспособлением
9	1000	60	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
10	1000	40	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением
11	1000	20	Автономный вакуум	На воздухе с приспособлением

Изменение структуры материала физического контакта ПО НС сплава ОТ4-1, полученного при ХТП (рис. 5) в ходе ТО претерпевает несколько стадий:

1. В первоначальный момент при нагреве (925°С 60 минут как и при 950°С 40 минут) в автовакууме в ПО происходит перераспределение дислокаций из-за стремления системы к минимуму энергии вызывающих процессы полиганизации и рекристаллизации которые приводят к снятию искажений кристаллической решетки и образованию пояса равновесных глобулярных α -зерен из вытянутых пластическим деформированием зерен, уменьшению общей плотности контактной поверхности. Ширина её составляет 1,5-1,7 мкм, что вдвое меньше по сравнению с ХТП. Наблюдается узкая зона шириной 5 мкм не претерпевшая изменений и нитевидные несплошности шириной не более 1 мкм (рис. 6, 925°С – 60 минут).

2. При повышении температуры до 950°С - 60 минут, 975°С – 20 минут, 1000°С – 20 минут, на границе раздела исчезает область не претерпевшая изменений и граница между заготовками сформирована мелким α -зернами. При дальнейшем увеличении выдержки при температурах 975°С - 60 минут, 1000°С - 40 и 60 минут, наблюдается процесс собирательной рекристаллизации и превращения глобулярных α -зерен в α -зерна игольчатой формы, одновременно идет процесс слияния дискретных очагов (несплошностей), заканчивается процесс рекристаллиза-

ции образованием общих зерен в зоне контакта и исчезновением границ раздела образуется по микроструктуре сплошной металл ПО не отличающийся от ОМ.

Из данных кинетических кривых (рис. 5) влияния температуры на эволюцию структуры в зоне напряжённо-деформированного диффузионного контакта сплава ОТ4-1 в образцах «втулка-вал» наблюдается резкий скачок по времени при переходе к температурам 975 и 1000°C, что свидетельствует о высокой скорости протекания диффузионных процессов, т.е. о предпревращении в данных температурных условиях и степени пластической деформации ПО НС сплава ОТ4-1.

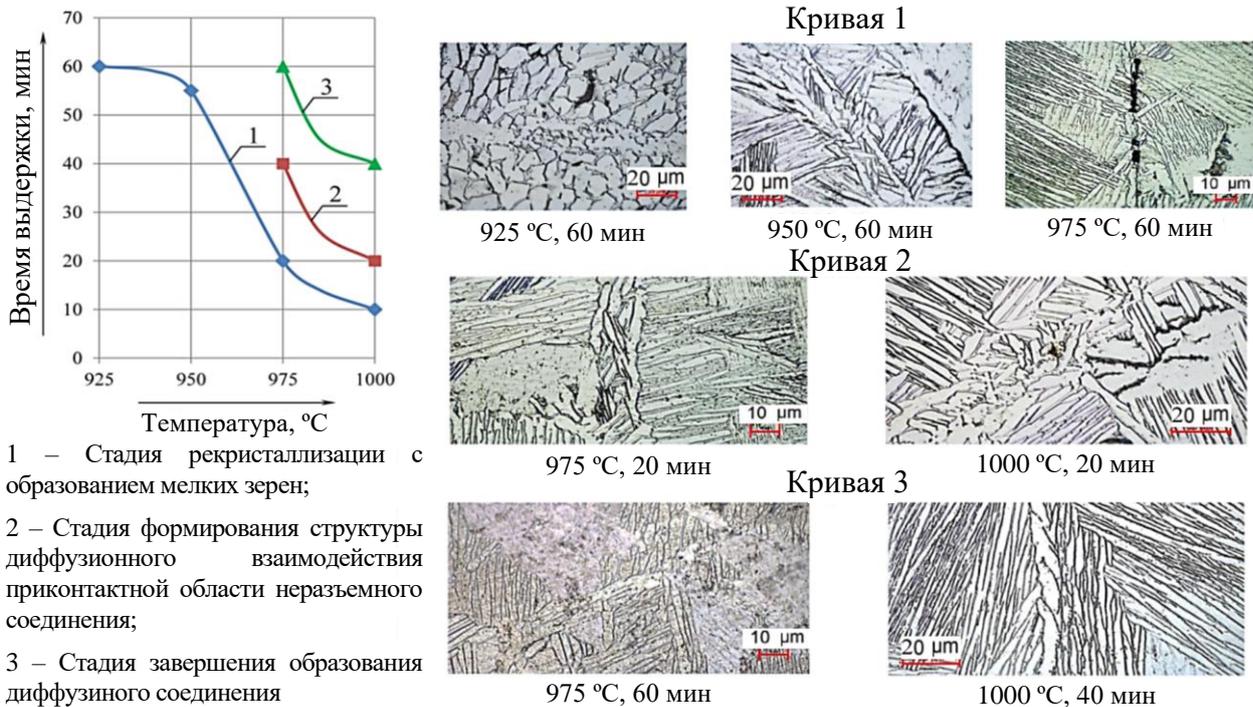


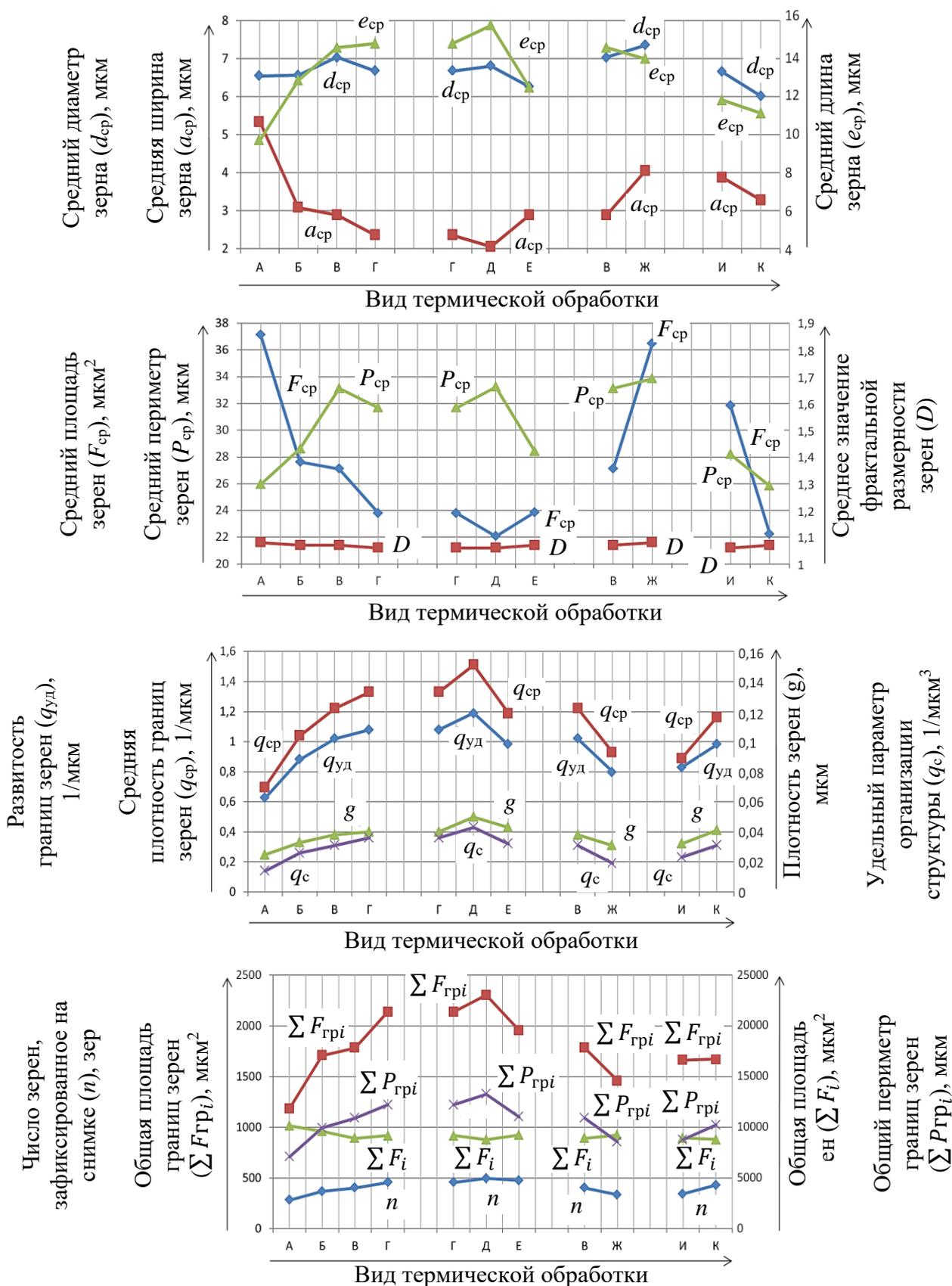
Рис. 5. Кинетические кривые влияния температуры на изменение структуры в зоне напряженно-деформированного диффузионного контакта сплава ОТ4-1 в образцах «втулка-вал»

Количественная оценка структурных изменений по основным параметрам интерфейса структурного состояния (рис. 6) позволяет с высокой степенью точности выявить механизм, кинетику и температурную зависимость структурных изменений от степени пластической деформации и режимов термообработки, стадийность процесса полигонизации и рекристаллизации, температурно-временную область ускоренных диффузионных процессов.

С увеличением температуры выдержки при прочих равных условиях значения практически все параметры структуры увеличиваются, исключение составляют среднее значение ширины зерен, общая площадь зерен и фрактальная размерность (значения первых двух уменьшаются, последнее остается без изменений);

- при уменьшении времени выдержки при прочих равных условиях увеличиваются значения ширины зерен, фрактальной размерности, числа зерен на снимке; значение общей площади зерен и средней площади зерен остаются практически неизменными; остальные параметры структуры уменьшаются;

- изменение вида защитной среды оказывает более сложное влияние на основные параметры организации структуры.



А – режим 1; Б – режим 2; В – режим 4; Г – режим 9; Д – режим 10;
 Е – режим 11; Ж – режим 8; И – режим 6; К – режим 7

Рис. 6. Влияние режимов ТО на количественные показатели микроструктуры ПО НС, полученного в условиях ХТП с натягом 450 мкм

В процессе высокой скорости пластической деформации ускоряются диффузионные процессы, генерация и движение в зону контакта дефектов кристаллической структуры «втулки и вала» (дислокации и вакансии). Наблюдается четко стадийность процесса распределения легирующих элементов Al и Mn. Чем дальше от линии физического контакта, тем менее выражена стадийность изменения распределения как примесей, так и основных легирующих элементов Al и Mn в α -твердом растворе.

Такая закономерность свидетельствует о затухании степени упругопластической деформации в ПО и её влиянии на процессы взаимодействия поля искажений кристаллической решётки и изменения распределения легирующих элементов (рис. 7)

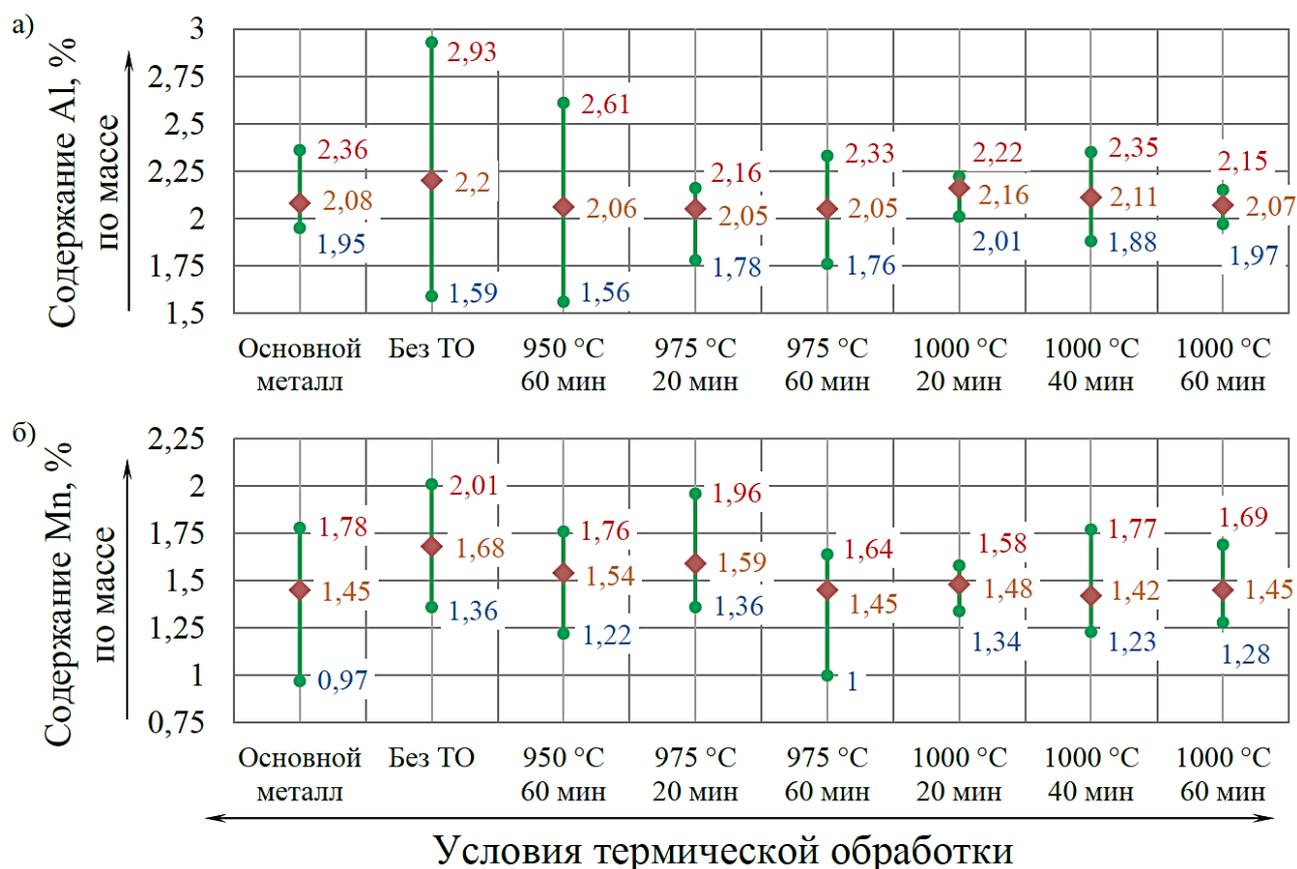


Рис. 7. Температурно-временная зависимость распределения основных легирующих компонентов Al и Mn в зоне сопряжения заготовок из сплава OT4-1 после их холодной ТП и ТО в интервале температур фазового перехода с различным временем выдержки: а – Al; б – Mn

Максимальная скорость диффузионных процессов распределения основных легирующих элементов Al и Mn соответствует температурному интервалу 975-1000°C, как и для структурных изменений.

Изменение микротвердости в зоне физического контакта образцов из сплава OT4-1 в температурно-временных условиях фазового превращения полностью соответствуют рекристаллизационным закономерностям структурных изменений (рис. 8).

Наиболее эффективное влияние на прочностные показатели материала ПО НС, полученного в условиях ХТП, оказывают режимы, обеспечивающие

формирование в материале ПО НС структуры аналогичной ОМ (режимы 4, 9, 10), поднимая прочность материала ПО НС при выпрессовке до уровня ОМ и более (прочность цельной заготовки при испытаниях на срез согласно справочным данным 960 МПа, прочность при выпрессовке после ТО по режимам 4, 9 и 10 составляет 964,8, 1040,8 и 996,2 МПа соответственно). Наименее эффективными являются режимы ТО, не обеспечивающие залечивание несплошностей в материале ПО НС – режимы 7, 8, 1 и 3 (перечислены в порядке увеличения прочности) (табл. 2).

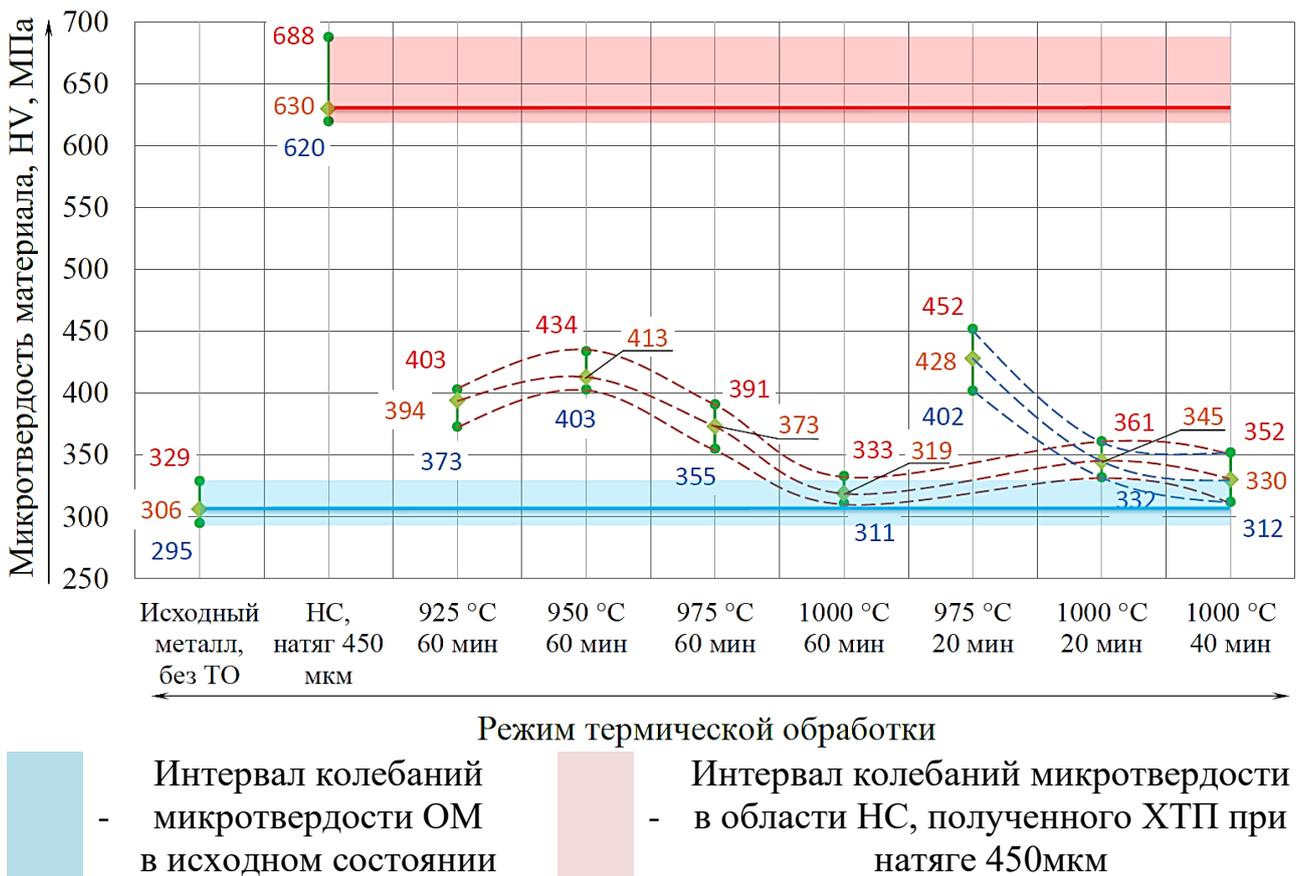


Рис. 8. Температурная зависимость изменения микротвердости диффузионного НС сплава ОТ4-1 в сравнении с микротвердостью ОМ и физического контакта после ТП с натягом 450 мкм и предельным допуском микротвердости к ОМ из сплава ОТ4-1

Табл. 2. Влияние нагрева в интервале температур фазового превращения заготовок системы «втулка и вал» из сплава ОТ4-1 на прочность при испытании на выпрессовку-срез

Режим т/о, выдержка, мин	Прочность при выпрессовке, МПа			
	925 °C	950 °C	975 °C	1000 °C
60	$\frac{816 - 873}{840,2}$	$\frac{883 - 951}{916}$	$\frac{924 - 1006}{964,8}$	$\frac{973 - 114}{1040,8}$
40	-	-	-	$\frac{958 - 1053}{996,2}$
20	-	-	$\frac{912 - 991}{950,2}$	$\frac{903 - 968}{933,4}$
Без т/о ОМ, не менее 960 МПа				

Капиллярная и радиографическая дефектоскопия не выявили наличия в соединениях внутренних и сквозных дефектов (рис. 9).

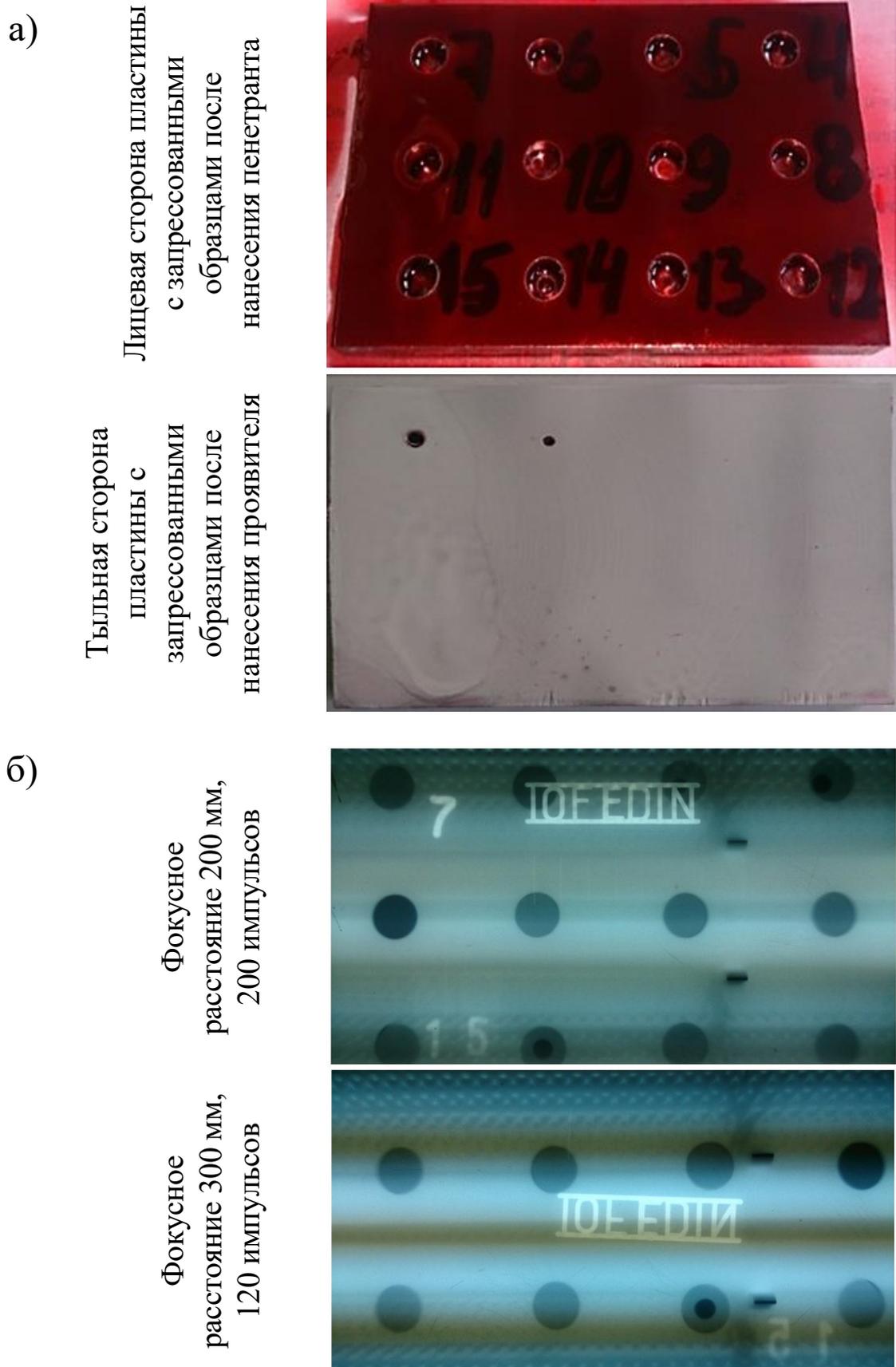


Рис. 9. Результаты неразрушающего контроля:
а – капиллярная дефектоскопия; б – радиографический контроль

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены закономерности изменения в процессе холодной тугой посадки с натягом от 200 до 450 мкм в ПО НС образцов системы «втулка и вал» из сплава ОТ4-1 в условиях номинального размера «втулки и вала» под действием возникающих напряжений: микроструктуры, микротвердости, распределения легирующих элементов, плотности дислокаций.

Экспериментально и теоретически на основании общих положений триботехники и теории деформации установлен уровень натяга 450 мкм, обеспечивающий максимально возможную площадь физического контакта $\geq 60\%$. При этом введен для повышения точности поправочный коэффициент (k) являющийся функцией величины (A_r / A_n) (2.20).

2. Установлено, что тепловое воздействие в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \beta$ превращения (930-940 °С) приводит к изменению структуры материала ПО НС, полученного в условиях ХТП, существенному уменьшению количества несплошностей и их размеров.

3. Выявлен температурно-временной интервал фазового предпревращения ускоренных диффузионных процессов образования диффузионного НС сплава ОТ4-1 соответствующий нагреву в автовакууме при температуре 975-1000 °С с выдержкой от 20 до 60 минут. При этом структура в ПО претерпевает трансформацию из вытянутых текстурованных деформацией зерен в ячеистую мелкозернистую округлой формы с увеличением выдержки процесс трансформации завершается и структура становится идентичной структуре ОМ. Наблюдается вторая и третья стадия образования диффузионного НС из полученного холодной ТП заготовок систем «втулка-вал» физического контакта сплава ОТ4-1.

4. Капиллярная и радиографическая дефектоскопия НС, полученного в условиях ТП заготовок системы «втулка-вал» с последующей ТО, не выявили наличия сквозных и внутренних дефектов, что говорит о высокой плотности материала ПО НС и герметичности соединения.

5. Годовой экономический эффект от применения в качестве метода получения НС на элементах трубопроводных систем летательных аппаратов холодной тугой посадки с последующей термической обработкой вместо аргонодуговой сварки и пайки токами высокой частоты при годовой программе выпуска 10000 шт. составляет более 1 и 3,8 млн. р, соответственно.

6. Теоретические положения и практические результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, внедрены в учебный процесс в виде лекционных и лабораторных занятий на кафедрах «Материаловедение и технология новых материалов» и «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Bakhmatov P.V. Effect of Heating on the Structure and Properties of a Solid-Phase Diffusion Bond Based on a Forced Fit in OT4-1 Alloy / P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev, A.V. Frolov, V.S. Pitsyk // *Steel in Translation*, 2018, Vol. 48, №12, P. 773-782 (Scopus).

2. Пицък, В.С. Изменение зеренной структуры и микротвердости приконтактных областей диффузионного соединения титановых сплавов / Пицък В.С., Муравьев В.И., Бахматов П.В. // *Учение записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2018, №2-1 (34), С. 91-104.

3. Муравьев, В.И. Применение диффузионной сварки при изготовлении титановых элементов авиационного назначения / В.И. Муравьев, В.С. Пицък // *Авиационная промышленность*, 2015, №4, С. 25-32.

4. Муравьев, В.И. Исследование процессов объемного взаимодействия заготовок типа отверстие-вал в автовакууме при температуре предпревращения / В.И. Муравьев, В.С. Пицък // *Учение записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2014, №3-1, С. 96-104.

5. Муравьев, В.И. Влияние прессовой посадки на процессы «схватывания» в зоне соединения трубных заготовок / В.И. Муравьев, В.С. Пицък // *Учение записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2014, №1-1, С. 52-61.

6. Муравьев В.И. Получение соединения втулка-вал запрессовкой с последующим спеканием / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, В.С. Пицък // *Вестник машиностроения*, 2013, №12, С. 73-79.

Статьи, опубликованные в прочих изданиях:

7. Пицък В.С., Муравьев В.И., Дмитриев Э.А. Исследование структуры и свойств физического контакта неразъемного соединения, созданного холодной тугой посадкой вала во втулку из сплава OT4-1 // *Учение записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2021, №1-1 (49), С 69-75.

8. Пицък В.С. Перспективы применения твердофазных неразъемных соединений при создании систем авиационной техники из титановых сплавов // В.С. Пицък // 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. – Москва, 20 – 24 ноября, 2017 – С. 26 – 28.

9. Пицък В.С. Влияние структуры, состава и технологии получения диффузионных соединений на их свойства на примере титановых сплавов / В.С. Пицък, В.И. Муравьев // *Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций. Международная конференция. Сборник тезисов докладов.* – Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 – С. 185-187.

10. Пицык, В.С. Оценка возможности интенсификации массопереноса за счет повышения скорости нагрева при создании неразъемных диффузионных соединений / В.С. Пицык, В.И. Муравьев // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения. Международная научно-техническая конференция. Материалы и доклады. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУВПО «КнАГТУ», 2015 – С. 164-167.

11. Пицык, В.С. Установление закономерностей структуры, состава и технологии получения неразъемных твердофазных соединений на их свойства на примере титановых сплавов авиационного назначения/ В.С. Пицык, В.И. Муравьев // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения. Международная научно-техническая конференция. Материалы и доклады. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУВПО «КнАГТУ», 2015 – С. 168-171.

12. Бахматов, П.В. Влияние различных методов обработки поверхностей деталей из титановых сплавов на содержание водорода в поверхностном дефектном слое / П.В. Бахматов, В.И. Муравьев, С.З. Лончаков, Н.О. Плетнев, В.С. Пицык // XX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Тезисы докладов. – Москва, 3 – 6 марта, 2014 – С. 378 – 381.

13. Пицык, В.С. Оценка возможности интенсификации процессов создания неразъемных соединений из конструкционных материалов / В.С. Пицык, В.И. Муравьев, П.В. Бахматов // Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов. Труды II международной конференции. В 2 т. Т.1. – Новокузнецк: ФГБОУ ВПО «СибГИУ», «МГИУ» и ИМАШ РАН, 2013 – С. 99 – 105.

14. Пицык, В.С. Разработка процессов получения твердофазных соединений деталей типа отверстие-вал / В.С. Пицык, В.И. Муравьев // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013). Материалы V международной научно-технической конференции. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. – С. 299 – 302.

15. Пицык В.С., Муравьев В.И. Исследование возможности применения диффузионных соединений при производстве трубопроводных систем // XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество». Сборник трудов конференции. – Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет, 8 – 11 октября 2013 – С. 350 – 355.

Патенты на изобретения и полезные модели:

16. Муравьев, В.И. Установка диффузионной сварки в автовакууме с нагревом в виброкипящем слое / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, В.С. Пицык, В.И. Фролов, К.А. Мелкоступов, А.А. Дебеляк // Патент на полезную модель № RU 134471 U1 от 4.03.2013.

Пицык Виктор Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ НЕРАЗЪЕМНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА ОТ4-1 В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОЙ
ТУГОЙ ПОСАДКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ
НА ИХ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук