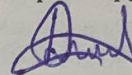


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Поправко Даниил Геннадьевич

**Разработка и исследование высокопроизводительного способа
термической обработки сварных соединений титановых сплавов**

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» и в филиале ПАО ОАК «КНААЗ» им. Ю.А. Гагарина».

Научный руководитель:

Григорьев Владимир Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «ТСМП имени В.И.
Муравьева», директор Технопарка
ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре
государственного университета»

Рецензент:

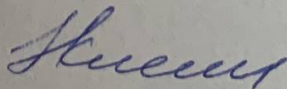
Жилин Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории проблем создания и
обработки материалов и изделий
обособленного подразделения
Института машиноведения и
металлургии Дальневосточного
отделения Российской академии наук
Хабаровского Федерального
исследовательского центра
Дальневосточного отделения
Российской академии наук, г.
Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «10» июня 2026 г. в 14:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «ТСМП имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Автореферат разослан 1 июня 2026 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент



О.Н. Клешина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

При проектировании изделий авиационной отрасли широко внедряются сборные металлоконструкции, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и надежности. При этом, наряду с механическими соединениями, все чаще используются сварные соединения, позволяющие значительно снизить массу конструкций вследствие отсутствия крепежных изделий.

Титановые сплавы занимают одно из ведущих мест в перечне материалов, используемых для изготовления силовых элементов планера современной авиационной техники. Особый интерес с данной точки зрения представляет класс высокопрочных сплавов, наиболее типичными представителями, которых являются сплавы ВТ6ч, ВТ20 и ВТ23. С конца 1990-х годов в рамках проекта «ПАК ФА» ОКБ им. П.О. Сухого осуществляло разработки по созданию многофункционального истребителя пятого поколения, в котором из титановых сплавов ВТ20, ВТ23 предполагается изготовление силовых сборных конструкций с применением автоматической электронно-лучевой сварки (ЭЛС), которая является одним из наиболее востребованных методов, позволяющих соединять детали толщиной до 120 мм и более

Актуальность темы:

Несмотря на преимущество электронно-лучевой сварки, проблемой в условиях растущих требований к количеству изготавливаемых изделий является длительный цикл термической обработки после сварки. Проведение термической обработки сварной сборки или готовой конструкции необходимо для устранения внутренних напряжений в металле сварного шва и создания равновесной структуры по всему сечению детали. Длительный цикл термической обработки обусловлен длительным нагревом и охлаждением вакуумных печей, в которых проходят термическую обработку детали, для недопущения образования альфированного слоя на деталях, не имеющих припуска под механическую обработку поверхности. Разработка и исследование способа проведения термической обработки в условиях фазового превращения после сварки ее влияние на свойства конструкции является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы:

Провести опробование способа термической обработки в условиях фазового превращения и определить ее влияние на качество сварных соединений из сплавов ВТ20 и ВТ23.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработать и опробовать способ высокопроизводительной термической обработки сварных соединений титановых сплавов ВТ20 и ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой, с использованием токов высокой частоты (ТВЧ) в условиях фазового превращения.
- исследовать влияние времени выдержки при ТВЧ (90, 120, 150 секунд) на макро- и микроструктуру сварных соединений (зона шва, зона термического влияния, основной металл).
- определить распределение микротвердости по сечению сварного соединения после различных режимов ТВЧ и оценить эффективность снятия внутренних напряжений.
- установить механические свойства (предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение) сварных соединений после ускоренной термической обработки и сравнить их с требованиями нормативно-технической документации (РТМ 1.4.1379-84).
- провести фрактографический анализ изломов образцов после испытаний на растяжение для определения характера разрушения и выявления микродефектов.
- выполнить технико-экономическое сравнение традиционной термической обработки в вакуумной печи и предлагаемого способа ТВЧ, оценить сокращение времени и затрат.

- разработать практические рекомендации по внедрению высокопроизводительной термической обработки ТВЧ в условиях серийного производства (на примере Филиала ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»).

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены:

1. На восьмой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, организуемой ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» «Исследования и перспективные разработки в машиностроении»: секция «Технология материалов» (г. Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2024 г.);

2. В финале всероссийского конкурса инженерных работ студентов и молодых специалистов «Будущее авиации 2025», организованным ПАО «ОАК» (г. Москва, декабрь 2026).

Положения, выносимые на защиту:

- аналитическое обоснование необходимости и возможность применения высокопроизводительной термической обработки сварных соединений титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой, с использованием нагрева в условиях фазового превращения.

- установленное влияние режимов ускоренной термической обработки на формирование структуры и изменение физико-механических свойств сварных соединений из сплавов ВТ20 и ВТ23.

- экспериментально подтвержденное снижение уровня остаточных сварочных напряжений после предложенного способа термической обработки, характеризующееся изменением локализации разрушения при статических испытаниях.

- разработанный способ защиты поверхности титанового сплава от газонасыщения при высокотемпературном нагреве на воздухе.

- рекомендации по промышленному внедрению высокопроизводительной термической обработки сварных конструкций из титановых сплавов, обеспечивающие сокращение производственного цикла и снижение себестоимости.

Научная новизна работы:

- экспериментально обоснована и доказана возможность эффективного применения высокопроизводительного нагрева для термической обработки сварных соединений из псевдо- α и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов, заключающаяся в кратковременной выдержке в области фазового превращения (980°C), что обеспечивает многократное сокращение времени цикла по сравнению с традиционным вакуумным отжигом.

- выявлены и систематизированы закономерности структурообразования в различных зонах сварного соединения (шов, зона термического влияния, основной металл) при высокоскоростном нагреве и охлаждении. Установлено, что предложенный режим способствует формированию однородной игольчатой (мартенситоподобной) структуры α' -фазы, выравниванию микротвердости и полной релаксации внутренних сварочных напряжений.

- для сплава ВТ23 разработан и апробирован способ защиты поверхности от газонасыщения при высокотемпературном нагреве на воздухе с применением обмазки на основе оксида алюминия и жидкого стекла, что позволило проводить термическую обработку без использования вакуумных сред.

Практическая значимость работы:

Практическая значимость работы заключается в разработке технологических рекомендаций по проведению высокопроизводительной термической обработки сварных соединений титановых сплавов с использованием нагрева в условиях фазового превращения, позволяющих сократить производственный цикл и снизить себестоимость операции, а также в апробации способа защиты поверхности от газонасыщения при нагреве на воздухе для сплава ВТ23. Предложенные решения могут быть внедрены в серийное

производство авиационных предприятий, изготавливающих силовые конструкции из титановых сплавов.

Личный вклад автора:

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично производил оценку существующей технологии термической обработки сварных соединений титановых сплавов, выполняемых на КнААЗ, анализировал литературные источники и проводил экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных, проводил металлографические, физико-механические и другие виды исследований.

Публикации:

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатных работы.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, одного приложения. Диссертация содержит 146 страниц; 98 рисунков.; 16 таблиц.; список литературы 35 названий; 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки высокопроизводительной термической обработки сварных соединений титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой; сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрены классификация и свойства титановых сплавов, особенности электронно-лучевой сварки, а также существующие способы термической обработки сварных соединений, включая вакуумный отжиг и обработку в условиях фазового превращения.

Во **второй главе** описаны материалы исследования (сплавы ВТ20 и ВТ23), режимы подготовки кромок и электронно-лучевой сварки, методика вырезки образцов, оборудование и режимы термической обработки токами высокой частоты, а также методы неразрушающего и разрушающего контроля (рентгенография, металлография, микротвердость, статическое растяжение, растровая электронная микроскопия).

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования: влияние термической обработки ТВЧ с выдержками 90, 120 и 150 секунд на микроструктуру, распределение микротвердости и механические свойства сварных соединений ВТ20 и ВТ23; приведены результаты фрактографического анализа изломов; выполнено технико-экономическое сравнение предлагаемого способа с традиционным вакуумным отжигом и даны рекомендации по промышленному внедрению.

В **заключении** сформулированы основные выводы: доказана эффективность высокопроизводительной термической обработки ТВЧ, установлены оптимальные режимы для сплавов ВТ20 и ВТ23, подтверждено снижение напряжений и возможность применения защитной обмазки, а также приведены показатели сокращения времени и себестоимости операции.

В серийном производстве ЛА применяется сварка на ЭЛУ. ЭЛС производят на установках КЛ-144 и КЛ-138.

Проведение термической обработки после сварки в силовых конструкциях является обязательной операцией для снятия внутренних напряжений в металле шва, так как после ЭЛС сварной шов является концентратором потенциального разрушения изделия.

Анализом установлено, что термическая обработка на КНААЗ имеет недостатки по причине высокой трудоемкости операции, появление цветов побежалости после термической обработки.

В рамках проведения исследований высокопроизводительного способа термической обработки были отобраны темплеты из сплава ВТ20 и ВТ23 и сварены на ЭЛУ по режимам предприятия. По результатам рентгенографического контроля, сварной шов соответствовал НТД предприятия.

Далее был произведен раскрой на образцы согласно ГОСТ 6996-66 и проведена термическая обработка в условиях фазового превращения при температуре 980 °С в интервале выдержки 90-150 секунд.

При термической обработке токами высокой частоты (рисунок 1, а) наблюдался эффект передачи тепла из струбины в титан. Время нагрева титана до температуры 700⁰С составляло более 2 минут, что не соответствует условиям эксперимента.

Была спроектирована специальная оснастка в виде кольца для проведения термообработки на оборудовании АМБИТ ИНМ 30-8-50 (рисунок 1, б), для создания конвекционного нагрева и сделаны технологические отверстия для установки термопар.

Проведение термической обработки в плавильной печи Graficabro (рисунок 1, в), работающей на тех же принципах, как и оборудование, указанное выше, только образец в нем помещается в закрытое пространство.

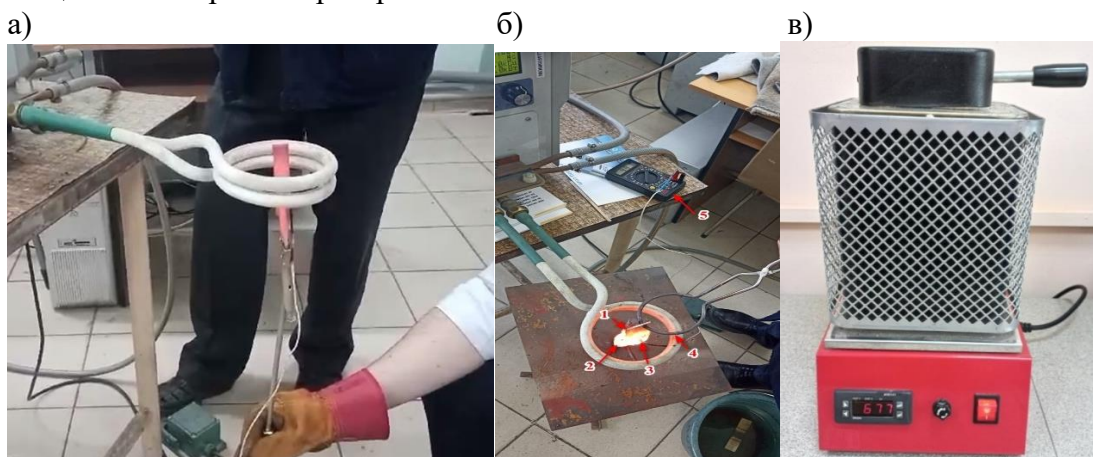


Рисунок 1 – Способы проведения термической обработки

а – метод ТВЧ, б – метод ТВЧ с использованием специальной оснастки(кольца) для передачи тепла, в – печь сопротивления Graficabro

На этапе подготовки образцов к проведению термической обработки в печи Graficabro, образцы из сплава ВТ23 были защищены от взаимодействия титана с внешней средой во время нагрева составом из смеси оксида алюминия и жидкого стекла.

Внешний вид образцов после термической обработки и после удаления остатков покрытия представлен на рисунке 2, а,б.

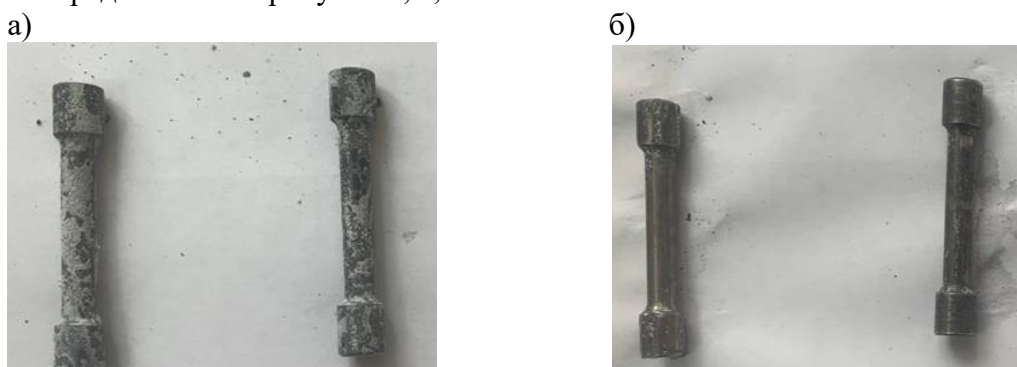


Рисунок 2 – Внешний вид образцов после термической обработки

а – до удаления остатков обмазки, б – после удаления остатков обмазки

Визуальный анализ образцов после термической обработки подтвердил хорошее состояние поверхности образцов после высокотемпературного нагрева титана, однако, присутствовали очаги окалины в виде точек в месте для зажима образца и на изгибе между места для зажима и рабочей зоны образца, что можно связать недостаточным высушиванием, неудовлетворительным нанесением покрытия в этих участках или взаимодействия участков с проволокой при нагреве. Покрытие после термообработки удалялось механическим путем, наждачной бумагой зернистостью P1000-P1500 под водой.

Анализ микроструктуры (рисунок 3) на образцах из сплава ВТ20 показал, что с увеличением времени выдержки (от исходного состояния образца) происходит стабильное формирование мартенситоподобной α' -фазы во всех зонах соединения.

Увеличение времени выдержки приводит к закономерному укрупнению β -зерен во всех исследованных зонах (основной металл, зона термического влияния, сварной шов), что связано с ростом зерна при длительном пребывании в β -области.

Несмотря на укрупнение β -зерен, морфология мартенситоподобной α' -фазы сохраняется стабильной: формируются плотные пакеты игольчатых пластин с минимальным межпластинчатым расстоянием, что указывает на эффективное охлаждение в процессе термической обработки.

Во всех режимах термической обработки структура сварного соединения сохраняет высокую однородность и стабильность. Дефекты сварочного или термического происхождения (поры, включения, микротрещины, признаки рекристаллизации или фазовой дегградации) не зафиксированы.

Полученные результаты подтверждают, что исследованный режим термической обработки обеспечивает стабильное фазовое состояние, однородность морфологии и отсутствие структурных дефектов сварного соединения сплава ВТ20 при различной продолжительности выдержки.



Рисунок 3 – Типовая микроструктура образцов из сплава ВТ20

Также, с увеличением времени выдержки установлено, что происходит распределение микротвердости (рисунок 4) по всему сечению образца, исключая пиковые значения твердости в металле шва.

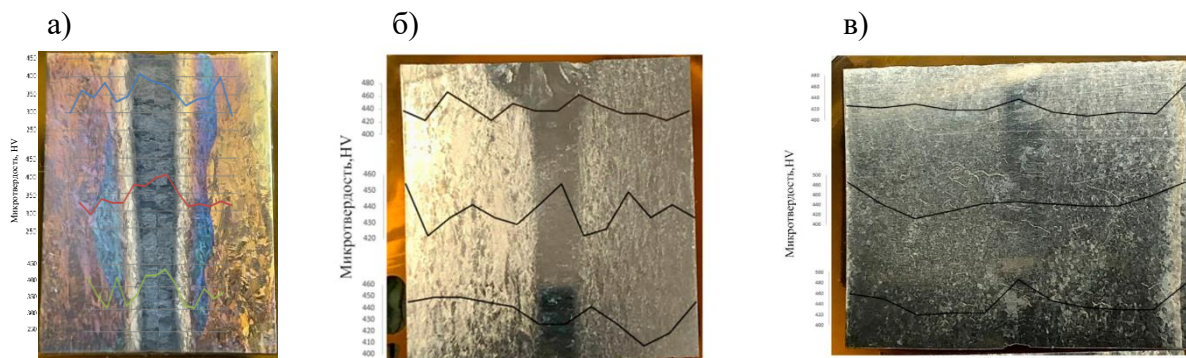
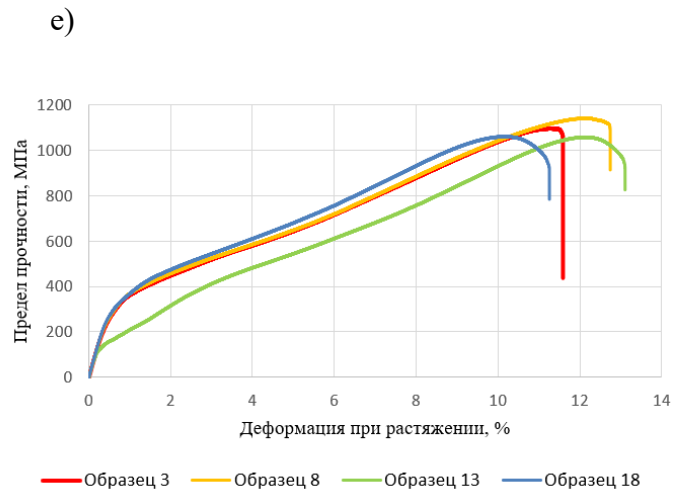
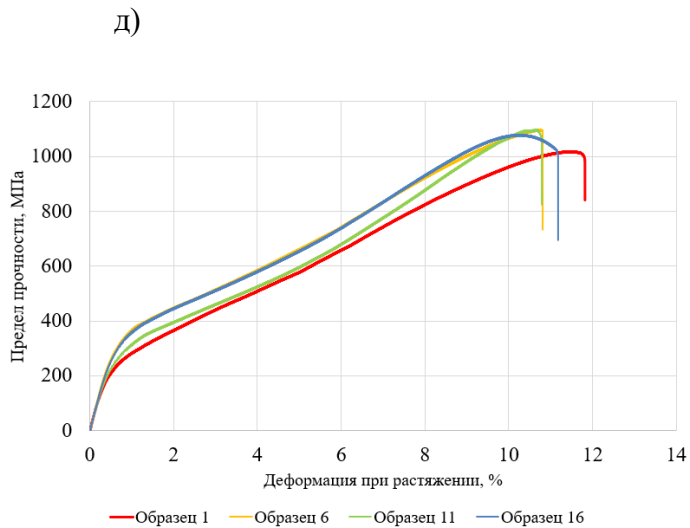
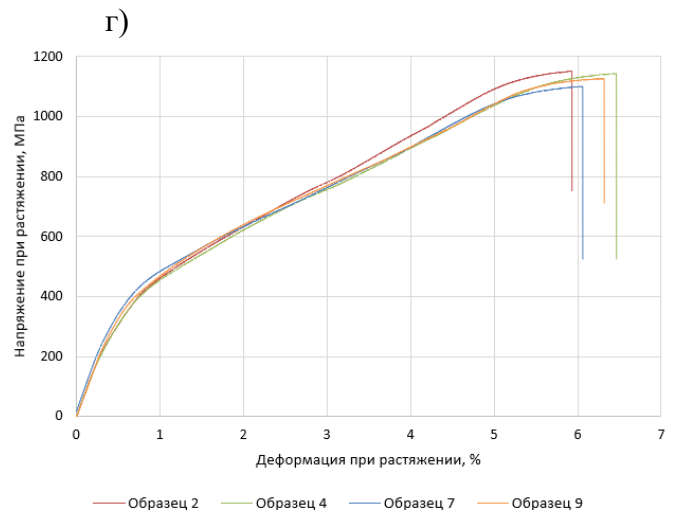
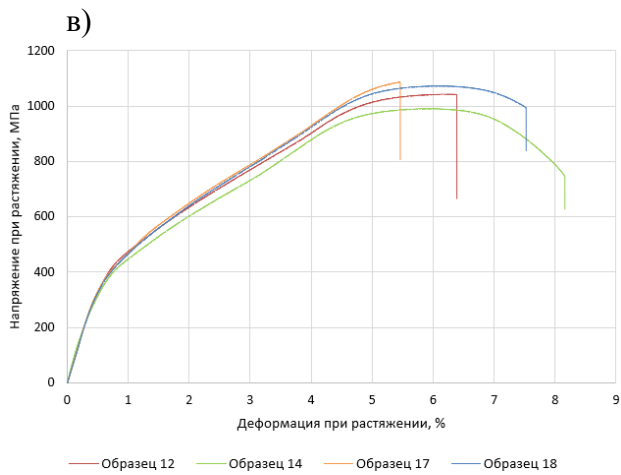
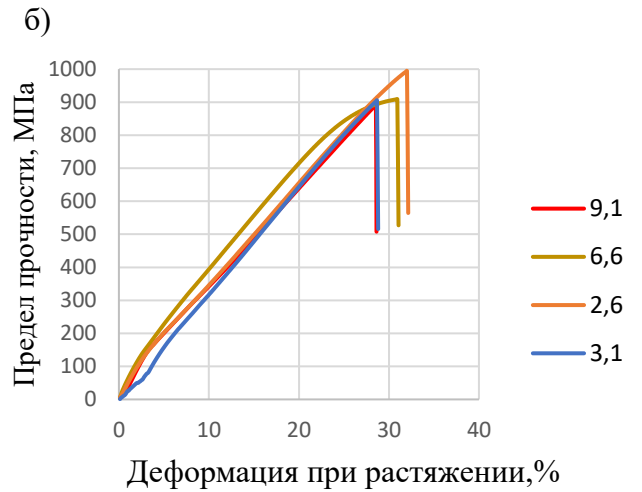
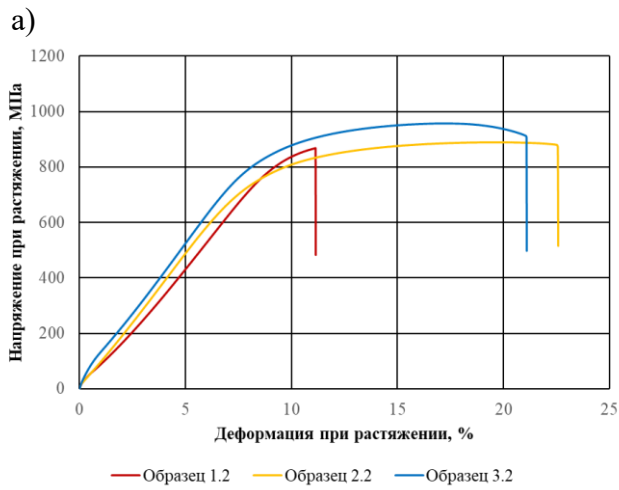


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по сечению образца
а – исходное состояние, б – выдержка 90 секунд, в – выдержка 120 секунд)

Испытания механических свойств на статическое растяжение образцов из сплавов ВТ20 и ВТ23 производились на испытательной машине и Shimadzu AG-X (ИМиМ ДВО РАН) и Instron 3382 (ФГБОУ ВО КНАГУ). Полученные результаты испытаний на растяжение представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний на статическое растяжение образцов

№ образца	Время выдержки, сек	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ %	Относительное сужение, ψ %	Место разрушения, МПа
ВТ20 – ТВЧ с использованием специального приспособления (кольца)					
1.2	60	869,2	2,3	3,34	ЗТВ и осн мет
2.2	120	888,6	8,06	9,13	ЗТВ и осн мет
3.2	150	956,7	6,89	15,16	ЗТВ и осн мет
ВТ20 – ТВЧ с использованием печи Graficabro					
9.1	90	891,5	3,5	144,7	Место зажима
3.1	120	905,3	8,35	136,6	Шов(центр)
2.6	150	994,5	3,28	113,7	ЗТВ
ВТ20 Без термической обработки					
6.6	-	909	10,63	68,4	Линия сплавления
Примечание – Для сплавов из ВТ20 согласно РТМ 1.4.1379-84 уровень механических свойств сварного соединения должен соответствовать значениям не менее 960 МПа.					
ВТ23					
Без термической обработки Фреза $\varnothing 32$					
32.5.3	-	1086,56	7,85	2,6	ЗТВ
32.5.5	-	1072,0	14,93	15,9	ЗТВ
32.6.2	-	1042,18	7,96	6	ЗТВ
32.6.4	-	989,7	17,58	22,2	ЗТВ
Без термической обработки Фреза $\varnothing 16$					
16.5.3	-	1100,1	2,56	3,21	ЗТВ
16.5.5	-	1125,87	1	3,81	ЗТВ
16.6.2	-	1150,76	4,5	2,5	ЗТВ
16.6.4	-	1142,66	6,62	2	ЗТВ
ВТ23 – ТВЧ с использованием печи Graficabro и защитным составом из оксида алюминия и жидкого стекла от взаимодействия с внешней средой					
16.6.1	90	1017,0	18,4	7,9	Основной материал
32.6.1	90	1095,35	12,1	3,5	Место зажима
16.5.2	90	1096,38	16,9	3,5	Основной материал
32.5.2	90	1077,45	14,2	7,9	ЗТВ
16.6.3	120	1094,64	16,7	3,3	Место зажима
32.6.3	120	1055,86	15,7	15,3	Основной материал
16.5.4	120	1138,89	12,9	6,5	Место зажима
32.5.4	120	1058,6	17,3	15,14	Основной материал
16.6.5	150	1064,65	16,9	14,7	ЗТВ
32.6.5	150	1056,95	18,2	13,4	ЗТВ
16.5.6	150	1094,14	22,1	9,4	ЗТВ
32.5.6	150	1092,08	19,4	17,7	ЗТВ
Примечание – Для сплавов из ВТ23 согласно РТМ 1.4.1379-84 уровень механических свойств сварного соединения должен соответствовать значениям не менее 1130 МПа.					



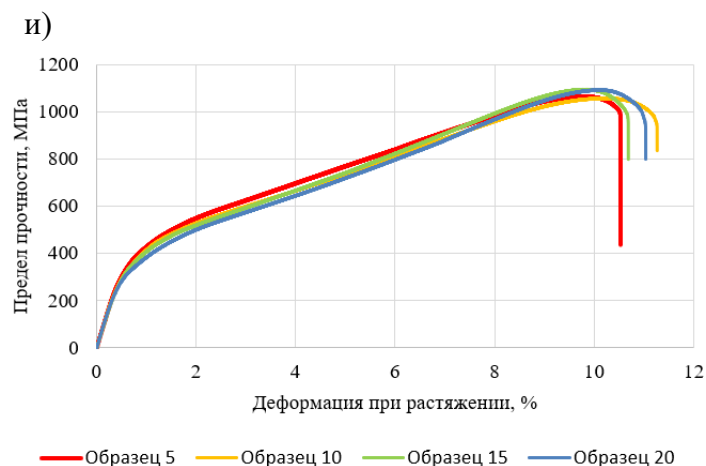


Рисунок 5 – Диаграммы растяжения образцов

а – термически обработанные образцы из сплава ВТ20 методом ТВЧ; б – термически обработанные образцы из сплава ВТ20 в печи Graficabro; в – исходное состояние образцов из сплава ВТ23, фреза Ø 32 мм; г - исходное состояние образцов из сплава ВТ23 фреза Ø 16 мм; д - термически обработанные образцы из сплава ВТ23 в печи Graficabro, выдержка 90 с, е - термически обработанные образцы из сплава ВТ23 в печи Graficabro, выдержка 120 с, и - термически обработанные образцы из сплава ВТ23 в печи Graficabro, выдержка 150 с

После статических испытаний произведены металлографические исследования изломов образцов на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Внешний вид изломов для растрово-электронной микроскопии представлены на рисунке б.

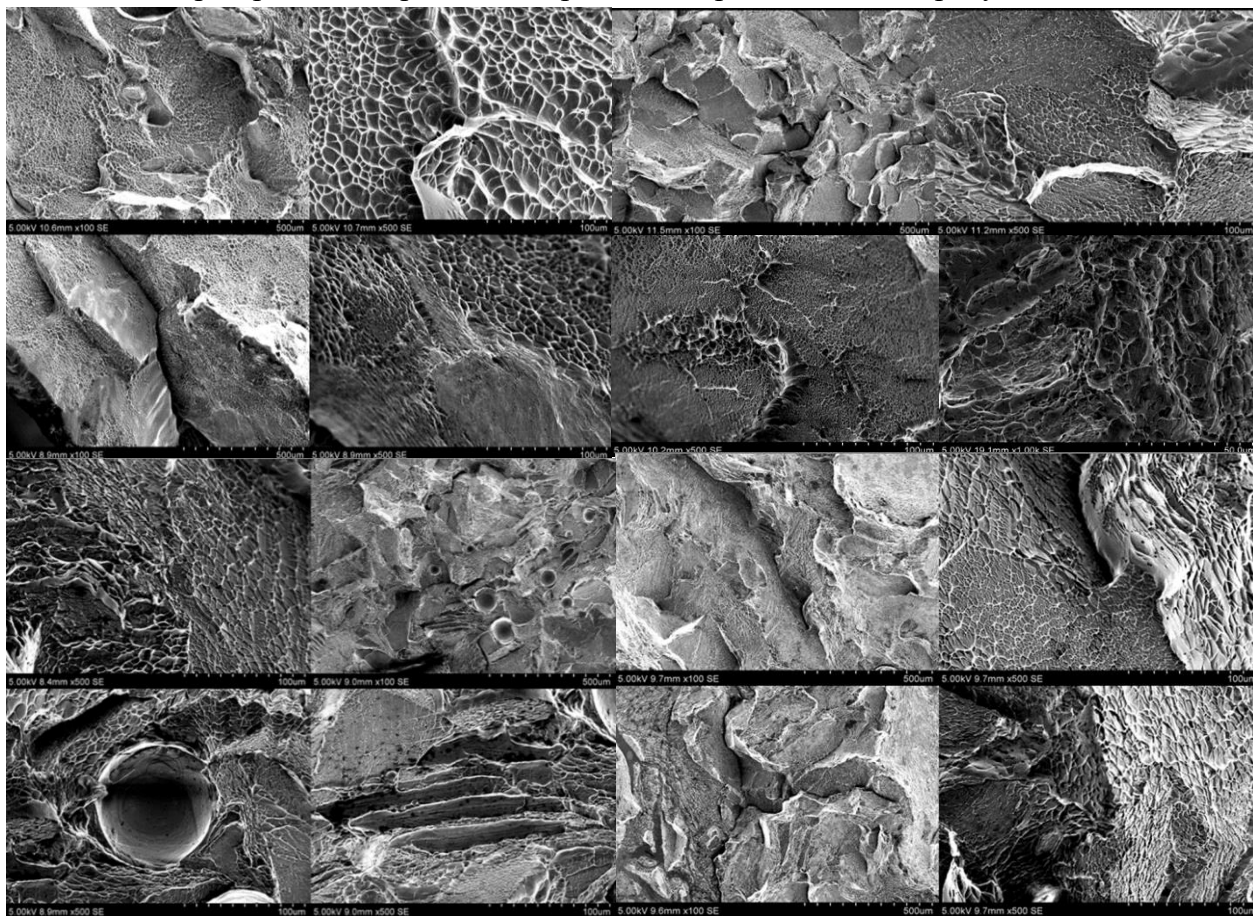


Рисунок 6 – Виды изломов после испытаний на растяжение образцов из сплава ВТ20 и ВТ23

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Для образцов из сплава BT20, термически обработанных в печи Graficabro:

- установлено, что с повышением времени выдержки от 90 до 150 секунд при высокоскоростной термообработке в печи сопротивления в сварных титановых образцах, полученных ЭЛС, выдержанный 90 секунд образец еще сохраняет игольчатую структуру, в образцах выдержки 120-150 секунд наблюдается переход структуры металла шва в крупноигольчатую структуру;

- установлено, что с повышением времени выдержки от 90 до 150 секунд, изменяется характер распределения микротвердости в термообработанных образцах в сравнении с исходным образцом, которому характерно увеличение микротвердости от основного металла к центру шва с максимумом 400 HV. Так, в термически обработанных образцах характерно выравнивание микротвердости по сечению и в целом, повышение этого параметра до 437 HV у образцов, выдержанных 90 и 120 секунд, 455 HV у образца с временем выдержки 150 секунд;

- по результатам статического растяжения, выявлено, что предел прочности сварных соединений не удовлетворяет требованиям РТМ 1.4.1379-84 (допуск не менее 960 МПа), за исключением образца 2.6 с выдержкой 150 секунд с пределом прочности 994,5 МПа. Так же с ростом времени выдержки от 90 до 150 секунд отмечается снижение относительного удлинения вплоть до 3,28% по сравнению с исходным образцом без термической обработки, где относительное удлинение составило 10,28%, но при этом предел прочности является не удовлетворительным (909 МПа);

- по результатам анализа полученных изломов растрово-электронной микроскопией выявлено: на всех образцах наблюдается неоднородный тип излома с преобладающим сотовым рельефом.

Для образцов из сплава BT20, термически обработанных методом ТВЧ:

- с увеличением времени выдержки от 90 секунд до 150 секунд происходит уменьшение межпластичного расстояния в структуре шва с появлением игольчатой структуры;

- при увеличении времени выдержки от 90 секунд до 150 секунд происходит распределение микротвердости по сечению образца, происходит выравнивание значений по сечению шва;

- по результатам статического растяжения выявлено, что ближайших необходимых значений согласно РТМ 1.4.1379-84 достиг образец 3.2 со значениями 959,7 МПа при требуемых 960 МПа;

- защитный состав от взаимодействия с внешней средой при подобном типе термообработки необходим, так как даже за короткий промежуток времени происходит достаточное насыщение примесями поверхности титана для искажения полученных значений.

Для образцов из сплава BT23, термически обработанных в печи Graficabro:

- установлено, что создание защитной пленки на поверхности титана в виде смеси оксида алюминия и жидкого стекла позволяет значительно ослабить влияние внешней среды на поверхностный слой титана, предотвращая моментальное гасынасыщение, однако, на поверхности образцов после удаления защитного состава присутствуют следы окалины в виде точек, что может быть связано с некачественным нанесением обмазки в местах появления окалины, недостаточным высыханием, взаимодействием участков с проволокой из низколегированной конструкционной стали. Общий цвет образца после термической обработки однотонный, матовый. Выдержка в течение 150 секунд оказалось слишком длительной, поэтому нанесенный слой защитного состава не обеспечил защиту поверхности титана, при утолщении наносимого слоя, возможно сохранение положительных результатов, аналогичных результатам при выдержке 90 секунд и 120 секунд.

- по результатам статического растяжения было выявлено, что образцы без термической обработки разрушались в центре шва и ЗТВ, степень деформации была низкой, кроме 2 образцов - 32.5.5 и 32.6.4. При выдержке в течение 90 секунд и 120 секунд наблюдалось выравнивание физико-механических свойств, образцы продемонстрировали хорошее сочетание значений временного сопротивления и относительного удлинения, а также разрушились преимущественно по основному материалу или месту зажима, что может быть связано с релаксацией напряжений в ЗТВ и сварном шве. Образцы с выдержкой в течение 150 секунд также показали хорошее сочетание уровня физико-механических свойств, однако, разрушение образцов произошло в ЗТВ и в зоне сварного шва;

- анализ растровой микроскопии изломов показал, что степень разрушения образцов без термической обработки и после термической обработки значительно отличаются. При увеличении времени выдержки, происходит повышение неоднородности рельефа излома.

Общие выводы:

Для обеспечения качества проводимой термической обработки необходимо усиление контроля за чистотой рабочего пространства вакуумных печей и самой оснастки с деталью, предотвращая появление цветов побежалости и окалины.

Также, при внедрении способа высокопроизводительной локальной термической обработки ЗТВ и сварного соединения взамен операции традиционного отжига, экономия затрат с одной операции отжига после сварки составляет до 50%, повышается производительность участка за счет высвобождения дефицитных мощностей вакуумного оборудования, окупаемость внедрения данной технологии в первом приближении занимает до 6 циклов проведения термической обработки после сварки.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Поправко, Д. Г. Разновидность способов термической обработки сварных соединений упрочняемых и неупрочняемых титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой / Д. Г. Поправко, В. В. Григорьев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 93-97. – EDN NXSFFV.
2. Григорьев, В. В. Влияние термической обработки токами высокой частоты на структуру и свойства сварных соединений титанового сплава ВТ20, выполненных электронно-лучевой сваркой / В. В. Григорьев, Д. Г. Поправко, О. Н. Клешнина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2025. – № 5(85). – С. 61-73. – EDN APXLUO.
3. Поправко, Д. Г. Влияние термической обработки токами высокой частоты на механические свойства сварных соединений титанового сплава ВТ20, выполненных электронно-лучевой сваркой / Д. Г. Поправко, Н. Р. Асомидинов, В. В. Григорьев // Жизненный цикл конструкционных материалов : Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Иркутск, 13–15 мая 2025 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2025. – С. 184-188. – EDN KIXMBC.
4. Григорьев, В. В. Влияние ускоренной термообработки в условиях фазового превращения на микроструктуру сварных соединений из сплава ВТ20 / В. В. Григорьев, О. Н. Клешнина, Д. Г. Поправко // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Комсомольск-на-Амуре, 07–08 октября 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 369-372. – EDN URПQH.