

На правах рукописи



Григорьев Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ ТИТАНОВЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
СВАРКОЙ**

Специальность 2.5.13 – Проектирование, конструкция, производство,
испытания и эксплуатация летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель:

Бахматов Павел Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Официальные оппоненты:

Медведев Александр Юрьевич,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Абашкин Евгений Евгеньевич,
кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация:

Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» (АО НИАТ), г. Москва

Защита состоится «18» мая 2023 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.02 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 «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/181

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.316.02.

Автореферат разослан марта 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.316.02
кандидат физико-математических наук



Д.А. Потянихин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: Применение титановых сплавов ВТ20, ВТ23 в крупногабаритных силовых элементах конструкции (шпангоуты, лонжероны, центроплан и пилоны) современных летательных аппаратов семейства Су-27, испытывающих колоссальные нагрузки в процессе эксплуатации, потребовало для их изготовления использование электронно-лучевой сварки, что вызвано следующими ее преимуществами: возможностью соединения крупногабаритных изделия толщиной до 400 мм за один проход; более надежной защитой зоны сварки от газов атмосферы; малой шириной шва и зоны термического влияния; существенным (в 8...10 раз) снижением энергетических затрат по сравнению с другими дуговыми способами сварки толстостенного материала; возможностью локальной термической обработки расфокусированным лучом для предварительного нагрева кромок и непосредственно после сварки для снижения уровня остаточных напряжений.

Однако в сварных соединениях силовых титановых конструкций летательных аппаратов, выполняемых электронно-лучевой сваркой по результатам рентгенографического контроля обнаруживаются дефекты в виде цепочек пор, подрезов, непроваров, несплавлений, корневые дефекты в виде пикообразований, а с появлением современных рентгеноскопических комплексов, обладающих большей чувствительностью, фиксируется явление - «темные полосы», располагающиеся вдоль линии сплавления, преимущественно в верхней части шва и не характеризующиеся нормативной документацией как дефект. По этой причине с 16.06.2016 года термин «темные полосы» стал употребляться и фиксироваться специалистами центральной заводской лаборатории КнААЗ им. Ю.А. Гагарина в журналах контроля и регистрации дефектов, но причины и механизм его образования, влияние на эксплуатационные свойства сварных конструкций не установлены.

Статистическая оценка выявляемых дефектов сварных соединений силовых титановых конструкций, по результатам рентгенографического контроля за 2-х летний период показала: для сплава ВТ20 характерными дефектами являются: цепочки пор – 2 %, непровар – 10 %, явление в виде «темных полос» фиксировалось в 88% соединений. Для сплава ВТ23: цепочки пор – 41 %, непровар – 31 %, несплавление – 19 %, явление «темные полосы» – 9%. Операции устранения дефектов увеличивают трудоемкость, ухудшают прочностные свойства сварных соединений из-за образования внутренних напряжений, вызывающих риск разрушения силовых элементов в процессе эксплуатации.

Таким образом, актуальным становится проведение комплексного исследования всех стадий процесса образования сварного соединения, выполняемого электронно-лучевой сваркой, включающее систематизацию и обобщение существующих знаний, и на этой основе разработку научно-обоснованных путей и технологических рекомендаций по предотвращению образования дефектов для повышения эксплуатационных свойств и снижения трудоемкости изготовления элементов силовых титановых конструкций летательных аппаратов.

Степень разработанности темы: Большой теоретический и практический вклад в решение проблемы порообразования при сварке цветных металлов внесли отечественные ученые, представляющие разные научные школы и направления в изучении этой проблемы: А.А. Алов, В.К. Любавский, А.А. Ерохин, В.В. Фролов, Г.Д. Никифоров, Л.С. Сапиро, В.В. Баженов, И.К. Проходня, С.М. Гуревич, Д.М. Рабкин, И.Р. Пацкевич, Г.Ф. Деев, В.Н. Замков, М.А. Абралов, В.В. Подгаецкий, И.И. Фрумин, Г.Л. Петров, Ф.Е. Третьяков, А.И. Горшков, Б.А. Калачев, Л.Я. Ищенко, В.И. Рязанцев, Е.Г. Антонов,

А.Н. Хатунцев, А.Ю. Медведев, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов и многие их ученики. Среди зарубежных ученых необходимо выделить Д. Андреа, У. Масахира, М. Махинара, Д. Митчела, С. Ямомото и др.

В.В. Редчиц, В.А. Фролов, В.А. Казаков и В.И. Лукин в своих работах отмечали, что при электронно-лучевой сварке обычно фиксируются мелкие поры, часто не обнаруживаемые при рентгеновском просвечивании и выявляемые только металлографическими исследованиями. Там же отмечено, что готовыми зародышами пор могут являться дефекты торцевой поверхности свариваемых кромок с наличием в их объеме адсорбированных газов, паров воды и загрязнений, способных разлагаться с образованием газов. Неоднократное подтверждение данной теории и способы минимизации порообразования отражены в работах В.И. Муравьева и Б.И. Долотова.

В качестве мер снижения порообразования известны технологии осцилляции электронного луча, многованной и многофокусной электронно-лучевой сварки, которые нашли свое отражение в работах Е.К. Саломатовой, Т.В. Ольшанской, Д.Н. Трушниковой, В.Я. Беленького, Е.М. Федосеевой, J. Kar, D. Chakrabarti, S.K. Roy, G.G. Roy, K. Rüttrich, R. Zenker, M. Mangler.

Исследования, отражающие проблематику «темных полос» и их влияния на эксплуатационные свойства сварных соединений силовых элементов титановых конструкций, выполненных электронно-лучевой сваркой, практически отсутствуют, что подтверждает актуальность исследования и требует разработку технологических рекомендаций, способствующих минимизации образования дефектов.

Цель диссертационной работы: повышение качества элементов силовых титановых конструкций летательных аппаратов, выполняемых электронно-лучевой сваркой, за счет исключения факторов, вызывающих порообразование в сварных соединениях, путем совершенствования операций подготовки поверхности стыкуемых кромок.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Провести анализ технологических факторов изготовления сварных элементов силовых титановых конструкций, оказывающих влияние на образование дефектов, характерных для электронно-лучевой сварки;
2. Установить механизм образования «темных полос» и их влияние на механические свойства сварных соединений элементов силовых титановых конструкций, выполненных электронно-лучевой сваркой;
3. Установить закономерность влияния режимов механической обработки поверхности стыкуемых кромок на уровень дефектности сварных соединений элементов силовых титановых конструкций, выполненных электронно-лучевой сваркой;
4. Разработать технологические рекомендации по изготовлению элементов силовых титановых конструкций электронно-лучевой сваркой, гарантирующих исключение образования дефектов, улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств, снижение себестоимости.

Научная новизна работы:

1. Установлен характер и выявлен механизм образования «темных полос», представляющих собой цепочки субмикро- и микропор, достигающих в диаметре от 5 нм до 50 мкм, расположенных в плоскости линий сплавления шва, преимущественно в верхней части. Это выполнено на основе экспериментальных исследований взаимосвязи порообразования в сварных соединениях силовых титановых конструкций летательных аппаратов и качества подготовки поверхности стыкуемых кромок под электронно-лучевую сварку.

2. Выявлено, что наличие «темных полос» на рентгенограммах сварных соединений силовых элементов титановых конструкций летательных аппаратов приводит к снижению пластических свойств.

3. Установлено, что снижение уровня содержания капиллярно-конденсированной влаги в поверхности стыкуемых кромок сплава ВТ20 и дефектности сварных соединений, выполняемых электронно-лучевой сваркой достигается управлением параметрами режима резания при механической обработке.

Теоретическая значимость работы заключается в подтверждении гипотезы порообразования, утверждающей, что готовыми зародышами газовой фазы являются заваренные дефекты торцов кромок перед сварочной ванной, для объяснения природы возникновения и механизма образования «темных полос» в сварных соединениях толсто-стенных титановых деталей при электронно-лучевой сварке.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению элементов силовых титановых конструкций электронно-лучевой сваркой, гарантирующих исключение образования дефектов, улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств неразъемных соединений, снижение себестоимости.

2. Показано, что операция контроля насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями в дополнение к контролю шероховатости поверхности, позволит минимизировать порообразование в сварных соединениях элементов силовых титановых конструкций.

3. Определены рациональные параметры режима резания при механической обработке титанового сплава ВТ20, способствующие минимизации количества капиллярно-конденсированной влаги в торцах стыкуемых кромок и снижению уровня дефектности сварных соединений, за счёт обезводораживания поверхностного слоя при торцевом и цилиндрическом фрезеровании, таковыми параметрами являются: скорость резания 40 ± 5 м/мин; подача 100 ± 10 мм/мин; обороты 800 ± 100 об/мин.

4. Результаты работы внедрены в технологический процесс изготовления элементов силовых титановых конструкций ПАО "ОАК" - "КнААЗ им. Ю.А.Гагарина" (акт внедрения предложения по улучшению ППУ №19/0021-2453 22 от 05.08.2022, акт об использовании диссертационной работы).

Методология и методы исследования:

Работа выполнена с применением современных методов исследований: спектрального химического анализа, рентгенографии и рентгеноскопии, электронного и оптического микроструктурного анализа, испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа выявленных дефектов и причины их образования при технологическом контроле силовых титановых элементов летательных аппаратов из сплавов ВТ20, ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой;

2. Результаты оценки операций технологического процесса изготовления элементов силовых титановых конструкций летательных аппаратов, с точки зрения оказания доминирующего влияния на образование дефектов, изменение механических свойств и формирование структуры сварных соединений при электронно-лучевой сварке;

3. Взаимосвязь параметров режима резания при механической обработке поверхности стыкуемых кромок под электронно-лучевую сварку и уровня дефектности сварных соединений элементов силовых титановых конструкций из сплава ВТ20.

Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается использованием современного оборудования, стандартизированных и проверенных методик исследования, воспроизводимостью и совпадением полученных в работе данных с данными, представленными в отечественных и зарубежных открытых источниках.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: 14-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, МАИ, 2022 г.); Всероссийский конкурс инженерных работ студентов и молодых специалистов «Будущее авиации 2022» (г. Москва, ПАО ОАК, 2022 г.); V-VII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» «Исследования и перспективные разработки в машиностроении»: секция «Технология материалов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2018-2022 г.г.); I-V Всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука» (г. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2018-2022 г.г.); XXIII Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов: секция «Технические и химические науки» (г. Хабаровск, ТОГУ, январь 2021); Третья международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Москва, ноябрь 2020); XVII Всероссийский конкурс молодёжных авторских проектов и проектов в сфере образования, направленных на социально-экономическое развитие российских территорий, «Моя страна – моя Россия» в номинации «Большая технологическая разведка моей страны» (г. Москва, август 2020); VI Всероссийский форум «Наука будущего – наука молодых» (г. Москва, ноябрь 2021 г.); IV Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» (г. Комсомольск-на-Амуре, ноябрь 2021 г.);

Публикации результатов исследований:

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 6 входящих в перечень изданий рекомендованных ВАК РФ, 1 публикация в зарубежном издании, входящая в перечень Scopus, 5 в сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, 1 монография (в соавторстве).

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста (включая приложения), содержит 26 таблиц, 57 рисунков, список литературы из 87 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния вопроса в области образования сварных соединений титановых конструкций летательных аппаратов. Проведен анализ элементов титановых конструкций летательных аппаратов (ЛА), выполняемых электронно-лучевой сваркой, а также статистическая оценка образования дефектов сварных соединений элементов силовых титановых конструкций. Проанализированы способы улучшения качества сварных соединений ЛА.

Цель анализа – выявление факторов, оказывающих влияние на образование дефектов и явления «темные полосы» (рис. 1, а) сварных соединений силовых элементов конструкций типа шпангоут (рис. 1, б) и лонжерон (рис. 1, в), выполненных электронно-лучевой сваркой в серийном производстве ЛА.

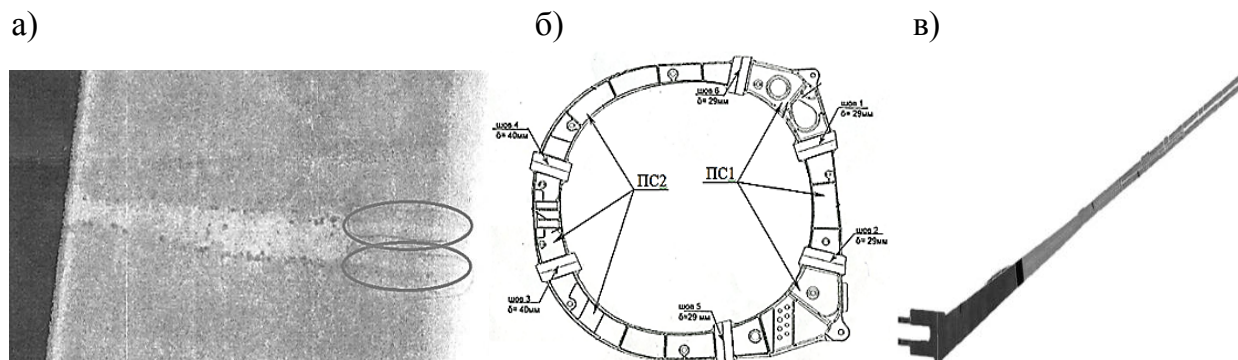


Рисунок 1 – Внешний вид «темных полос» на рентгенограмме сварного соединения (а) и силовых элементов конструкций из титановых сплавов: шпангоута (б), лонжерона (в)

Общее количество анализируемых дефектных изделий – 11 шт., из них 5 выполнены из сплава ВТ23 (изделие лонжерон), 6 из сплава ВТ20 (изделие шпангоут). Контроль качества проводили с использованием рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225.

Анализ видов, количества и места расположения дефектов сварных швов, выполненных электронно-лучевой сваркой по толщинам и марке материала титановых сплавов, позволил установить некоторые особенности образования дефектов. Явление «темные полосы» выявлено и в изделиях из ВТ20, и в изделиях из ВТ23, также выявлены дефекты в виде цепочек пор, непроваров, а несплавления только в сварных соединениях изделий из сплава ВТ23.

Максимальное количество дефектов обнаружено в изделиях: шпангоут, толщиной $h = 44$ мм из сплава ВТ20; лонжерон, $h = 75$ мм из сплава ВТ23, причем доминирующим дефектом для ВТ20 является дефект «темные полосы», а для ВТ23 – цепочки пор. Характерные места расположения дефектов представлены на рис. 2.

Установлено, что при скорости сварки от 6 до 16 мм/с и толщине стыка от 24 до 75 мм, сварные соединения наиболее подвержены появлению специфического явления в виде «темных полос» (рис. 3). При скорости сварки менее 6 мм/с и толщине стыка более 75 мм, сварные соединения менее подвержены вероятности возникновения «темных полос», но цепочки пор, несплавления и непровары в них образуются чаще.

Такая закономерность связана с неравномерным распределением температурного поля по объему свариваемой заготовки и временем существования расплавленной ванны.

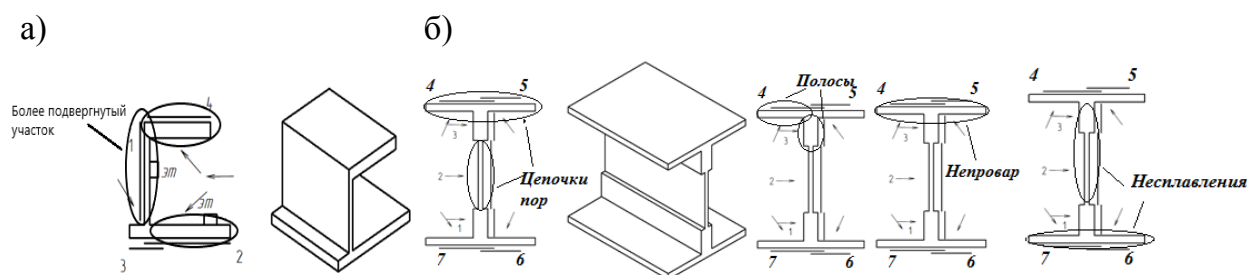


Рисунок 2 – Места расположения дефектов в сварном соединении изделий: а – из сплава ВТ20; б – из сплава ВТ23

Тепловложения при чистке и прихватке при 10 мА, недостаточно чтобы полностью удалить капиллярно-конденсированную влагу, так же, как и при самой электронно-лучевой сварке. При сварке в начале шва недостаточно образование сжимающих напряжений для формирования крупных замкнутых полостей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой, тем не менее, образование частичных малых полостей с капиллярно-конденсированной влагой происходит.

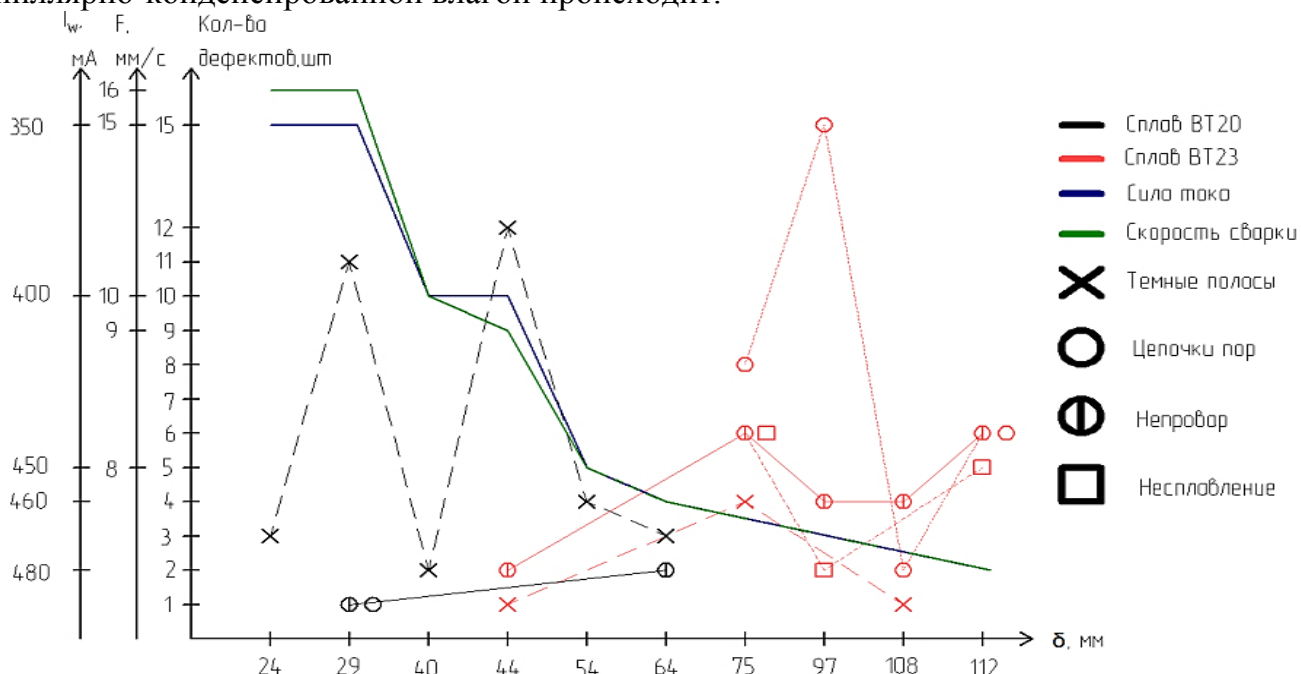


Рисунок 3 – Влияние режимов электронно-лучевой сварки, толщины свариваемых заготовок и марки материала на образование дефектов и их количества

Можно предположить, что в первоначальный момент образования сварочной ванны в этом участке происходит бурное взаимодействие капиллярно-конденсированной влаги с расплавом металла и образующийся атомарный водород в результате диссоциации загрязнений растворяется в расплаве сварочной ванны. При кристаллизации расплава, как известно, образуется не только твердый раствор водорода в α -титане, но и гидрид титана TiH_2 , плотность которого составляет $3,76 \text{ г/см}^3$, меньше плотности титана, что и вызывает при рентгенографии появление темных полос.

Факторами, подтверждающими появление темных полос, связанных с уменьшением сплошности на рентгенограммах, являются: во-первых, следом за темными полосами на рентгенограмме выявляются вначале цепочки пор, а затем и единичные поры; во-вторых, темные полосы исчезают при повторном нагреве, что связано, как известно с обратным процессом выделения водорода из металла или его диффузионным распределением в объеме металла. С порами этого не происходит. Отсюда следует вывод: необходимо исключить образование капиллярно-конденсированной влаги на поверхности стыкуемых кромок.

Наличие несплавлений и непроваров может быть вызвано как недостаточностью тепловложения или пробивной мощности луча, так и некорректным заданием хода луча по координатам.

Наблюдениями за технологическими операциями подготовки заготовок под сварку (особенно обеспечение требуемого зазора между стыкуемыми кромками) установлено, что корректировка электронного луча ведется по контрольным рискам с лицевой и обратной стороны стыка, не обеспечивая корректный проход луча в режиме эмуляции. Согласно нормативно-технической документации, зазор между стыкуемыми кромками

составляет $0^{+0,2}$, неудовлетворительная шероховатость из-за некачественной механической обработки может привести к неравномерности его величины.

Наличие заоваливания, грубой шероховатости и волнистости стыкуемых кромок приводит к нестабильному зазору (при движении со сварочной скоростью и постоянной мощностью электронный луч оплавляет разный объем основного металла), что приводит к образованию непроваров в средней и корневой части шва. При прохождении луча, расположенного заведомо некорректно, происходит оплавление одной из кромок сварного стыка, ввиду этого происходит создание замкнутых полостей и несплавлений.

Таким образом, по результатам анализа установлено следующее:

1. Преимущественное расположение дефектов, их вид, место и количество свидетельствуют о влиянии технологических операций на их образование.

2. Место расположения, режимы электронно-лучевой сварки, позволяют предполагать, что образование «темных полос» связано с недостаточным удалением капиллярно-конденсированной влаги в ходе прогрева расфокусированным лучом. При электронно-лучевой сварке в момент формирования сварочной ванны не создается замкнутых полостей готовых зародышей, и капиллярно-конденсированная влага, взаимодействуя с расплавом непосредственно путем диссоциации, образует твердый раствор водорода в α -титане и гидрид титана с плотностью ниже плотности металла шва.

3. Неудовлетворительная шероховатость, волнистость стыкуемых кромок, ошибка в корректировке электронного луча, недостаточная пробивная мощность могут привести к появлению непроваров и несплавлений.

Во **второй главе** показаны используемые в работе материалы и методы исследования. В качестве основных материалов для исследований использованы титановые сплавы ВТ20, ВТ23, применяемые в силовых конструкциях ЛА.

Подготовка образцов под сварку производилась следующими способами:

- традиционная технология подготовки кромок: обезжиривание стыкуемых поверхностей свариваемых заготовок, вводных/выводных планок ацетоном техническим ГОСТ 2768-84 и обезвоживание спиртом ГОСТ 18300-87, прихватка аргонодуговой сваркой вводных и выводных планок, с использованием вольфрамового электрода СВИ-1 $\varnothing 3$ мм и аргона высшего сорта ГОСТ 10157-2016. Толщины заготовок, использованных в исследованиях 50...80 мм;

- для получения явления в виде «темных полос» подготовка стыкуемых кромок по традиционной технологии не производилась с целью увеличения вероятности образования явления;

- высокопроизводительным фрезерованием, как торцевым, так и цилиндрическим с целью обезводороживания поверхностного слоя и минимизации пористости.

Оценка насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями производилась с использованием спектрографа ИСП-51 по ОСТ 1 90034-81. Электронно-лучевая сварка титановых сплавов выполнена на установках КЛ-144, 30ЕЗ000 и КЛ-138 в соответствии с РТМ 1.4 1379-84. Термическую обработку образцов выполняли в вакуумной печи УВН-1500, по режимам: ВТ23 - отжиг при 750°C в течение 30 минут, старение в течение 10 часов при температуре 550°C; сплав ВТ20 – отжиг при 750°C, 30 минут. Сведения о режимах сварки и габаритах заготовок представлены в табл. 1.

При исследовании влияния режимов фрезерования на минимизацию порообразования использовался 5-осевой обрабатывающий центр DMG DMU 80 P3 DUOBLOCK, вертикально-фрезерный станок ВМ127М, смазочно-охлаждающая жидкость Avantin 361 I-N и Blasocut 2000 Universal с применением концевой фрезы МТ190VB-016Z16R05-32-

L100-T. Шероховатость поверхности оценивалась профилометром HOMMEL TESTER T500 и TR-200.

Вырезка образцов после сварки выполнялась на лентопильной установке Danobat и универсальном вертикальном фрезерном станке BM127M дисковой пилой с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Типовые схемы раскроя сварных соединений представлены на рис. 4.. После сварки и вырезки сварных экспериментальных образцов произведен их визуальный и радиографический контроль качества согласно РТМ 1.4 1379-84, ПИ 1.4.1898-2003, ГОСТ 7512-82, ГОСТ ISO 17636-1-2017 с применением установок ЭКСТРАВОЛЬТ-225, РАП 150/300.

Таблица 1 – Режимы электронно-лучевой сварки заготовок из сплавов ВТ20 и ВТ23

№ режима	Тип электронно-лучевой установки	Марка сплава	Протяженность шва, мм	Толщина заготовки, мм	Режимы сварки			
					I _w , МА	I _f , МА	F, мм	V _{св} , мм/с
1	30E3000	ВТ23	130	50* ¹	415	600	200	7
2	КЛ-144	ВТ23	93	70 ²	470			10
3		ВТ20	60	60 ²	470			10
4		ВТ20	123	20 ²	230			15
5		ВТ20	130	30 ³	320			16
6		ВТ23	130	60 ³	420			10

Примечания:

* С использованием подкладной пластины из ВТ23 толщиной 10 мм.

¹ Без подготовки стыкуемых кромок под сварку.

² Обезжиривание ацетоном, обезвоживание спиртом.

³ Фрезерование стыкуемых кромок на форсированных режимах резания

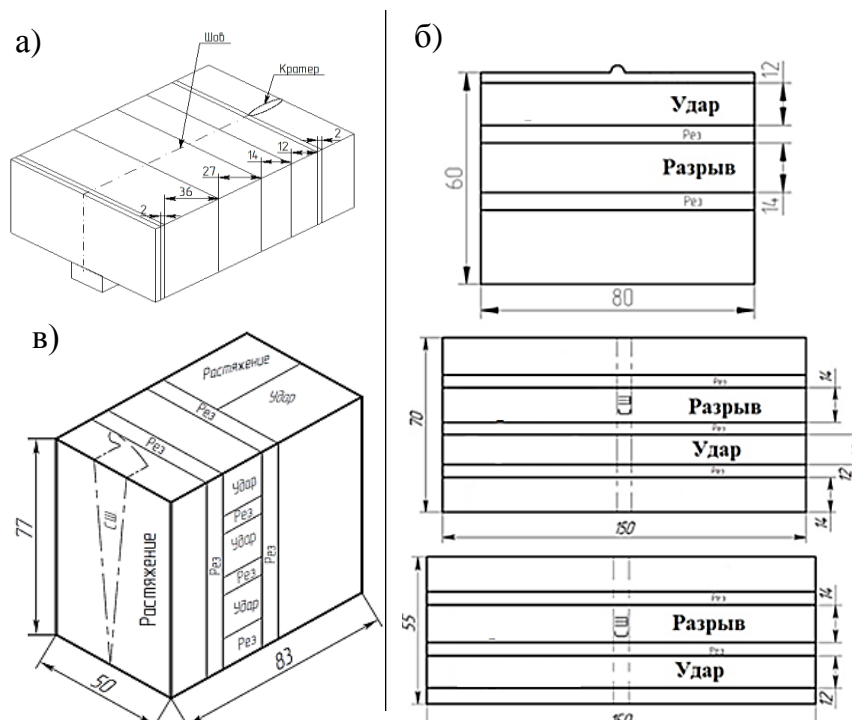


Рисунок 4 – Типовые схемы раскроя сварных соединений: а – сплав ВТ23, толщина 50 мм; б – сплав ВТ20; в – сплав ВТ23

Испытания сварных соединений на статическое растяжение производились на испытательных машинах Instron 3382, Shimadzu AG-X при скорости растяжения 2 мм/мин и комнатной температуре 20-25 °С, согласно ГОСТ 1497-84 (тип III, образец 7).

Определение ударной вязкости произведено с использованием маятникового копра JB-W300, с использованием молотов на 300 Дж и 150 Дж. Ударный изгиб выполнялся при комнатной температуре на образцах согласно ГОСТ 6996-66 (тип VI, тип IX, 55x10x10 мм). Нарезка U и V-образных концентраторов напряжений, выполнена на станке фирмы Time Group.

Нарезка U и V-образных концентраторов напряжений, выполнена на станке фирмы Time Group.

Исследование структуры сварных соединений и изломов образцов проводились методами оптической и растровой электронной микроскопии с использованием оптического микроскопа Nikon MA200, в диапазоне увеличения $\times 200 \dots \times 1000$ и растрового электронного микроскопа Hitachi S-3400N, в диапазоне $\times 50 \dots \times 7000$. Пробоподготовка образцов производилась на станке EsoMet 250 Pro с насадкой Auto Met 250. Измерение микротвердости в поперечном сечении сварных соединений вели по ГОСТ 9450-76, охватывая основной металл, зону термического влияния, сварной шов с шагом 0,5 мм на твердомере Shimadzu HNV-2, при величине нагрузки на индентор 0,9807 Н.

В **третьей** главе представлен анализ распределения водорода после электронно-лучевой сварки, а также выявлены особенности образования дефектов элементов силовых титановых конструкций.

Как видно из данных рис. 5 – 7, распределение водорода в сварном шве титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой, имеет сложный характер и в значительной степени отличается от распределения водорода в сечении сварного шва, выполненного аргонодуговой сваркой в среде защитных газов. При этом изостатическое давление в металле, возникающее в отдельных участках сварного соединения в связи с неравномерностью нагрева и, следовательно, растворимости, вызывают возникновение направленных диффузионных потоков водорода, что приводит к появлению пиков его концентрации у зоны сплавления. В рассматриваемом случае появление пиков наблюдается не только в зоне сплавления, но и в центральной части сварного шва (рис. 5).

Распределение водорода вдоль сварного шва сплавов ВТ20 и ВТ23 находится в полной зависимости от порообразования при электронно-лучевой сварке: максимумы по линии сплавления и центру сварного соединения, минимумы (близкие по содержанию водорода в основном металле) по промежутку между центром сварного соединения и линией сплавления (рис. 5-7). Неравномерность распределения водорода по зонам определяется температурой соединяемых в процессе электронно-лучевой сварки кромок.

Для сплава ВТ23 при двухсторонней сварке более равномерное распределение водорода в поперечном сечении сварного соединения наблюдается на втором участке сварного шва, что можно объяснить влиянием первого прохода сварки на перераспределение водорода за счет термодиффузии (рис. 6).

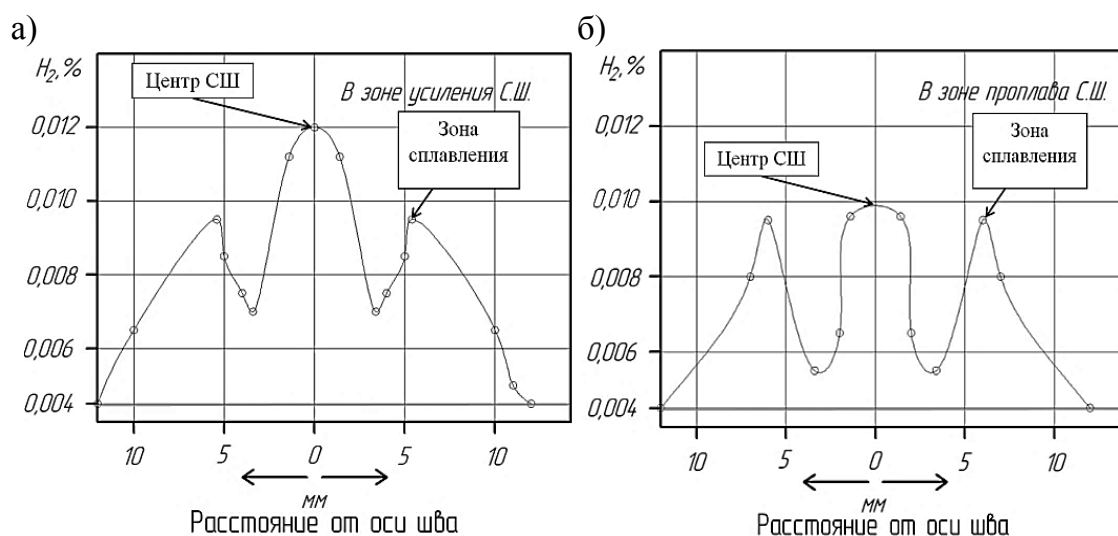


Рисунок 5 – Распределение содержания водорода по сварному шву сплава ВТ23, выполненного на установке 30Е3000 с толщиной 50 мм, исходное состояние $H_2 = 0,004\%$:

а – зона усиления; б – корневая зона

В проведённых исследованиях исходное содержание водорода составило в сплавах: ВТ20 (h = 60 мм) – 0,0035%; ВТ23 (h = 70 мм) – 0,003; ВТ23 (h = 50 мм) – 0,004%. Поэтому водород, растворённый в указанных количествах, практически не может оказывать влияние на образование пор и концентрированное распределение водорода в сварных соединениях. Существенное влияние на образование пор оказывают вещества, не просто адсорбированные, а капиллярно-конденсированные в развитой дефектной поверхности стыкуемых кромок.

Плотность энергии электронного луча достигает $5 \cdot 10^3$ кВт/мм², что в несколько тысяч раз превышает плотность энергии при дуговой сварке. В связи с этим в процессе электронно-лучевой сварки происходит очень интенсивный локальный разогрев сварочной ванны с последующим образованием узкого и глубокого шва в виде клина (так называемый «кинжальный проплав»). Площадь зоны проплавления при электронно-лучевой сварке в ~25 раз меньше, чем при аргодуговой сварке, что в совокупности с высокой концентрацией энергии в луче приводит к образованию относительно узкой зоны термического влияния при высокой скорости охлаждения, что способствует формированию значительных по величине внутренних напряжений.

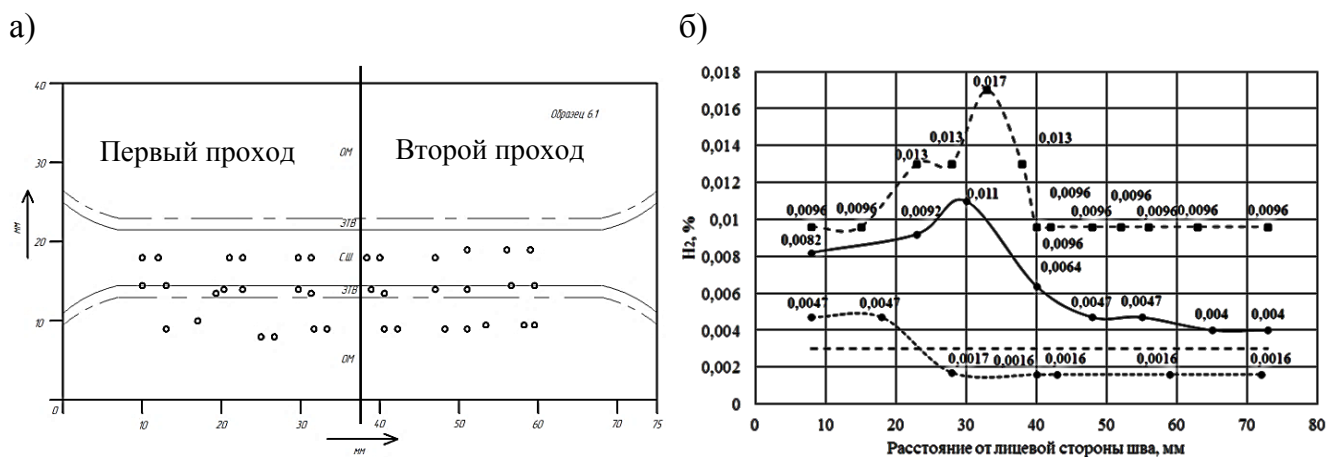


Рисунок 6 – Места точечного замера (а) и распределение водорода по характерным зонам в поперечном сечении шва (б) из сплава ВТ23:

—■— — по линии сплавления; —●— — по центру сварного соединения; - - ● - - по промежу- ку между линий сплавления и центром сварного соединения; - - - - исходное состояние

Поэтому, неизбежно, в процессе электронно-лучевой сварки перед фронтом расплавленной ванны соединяемых кромок появится зона твердофазного соединения с замкнутыми полостями, заполненными капиллярно-конденсированной влагой, т.е. готовыми зародышами пор, которые непосредственно попадут в расплав на кромках образующейся сварочной ванны.

Температурные условия разогрева свариваемых кромок зависят от мощности установки электронно-лучевой сварки, скорости сварки, толщины свариваемых заготовок, возможности фокусировки луча (поскольку зазор между свариваемыми заготовками имеет допуск $0^{+0,2}$ мм, шероховатость поверхности заготовок Ra более 3,2 мкм и коррек- тировка электронного луча должна производиться по центру между рисками, наноси- мыми на заготовках), изменения геометрии глубины и ширины проплавления (из-за ко- лебательных процессов в канале проплавления под действием мощного концентриро- ванного пучка электронов).

Максимальная температура нагрева стенок, достаточная для плавления по объёму зёрен при взаимодействии с расплавом под давлением парогазовой плазмы, а также низ-

кое качество поверхности стыкуемых кромок (значительная насыщенность капиллярно-конденсированными загрязнениями) приведёт к попаданию готовых зародышей пор (ККВ загрязнений) и увеличенному содержанию водорода (из продуктов десорбции загрязнений) в сварном шве.

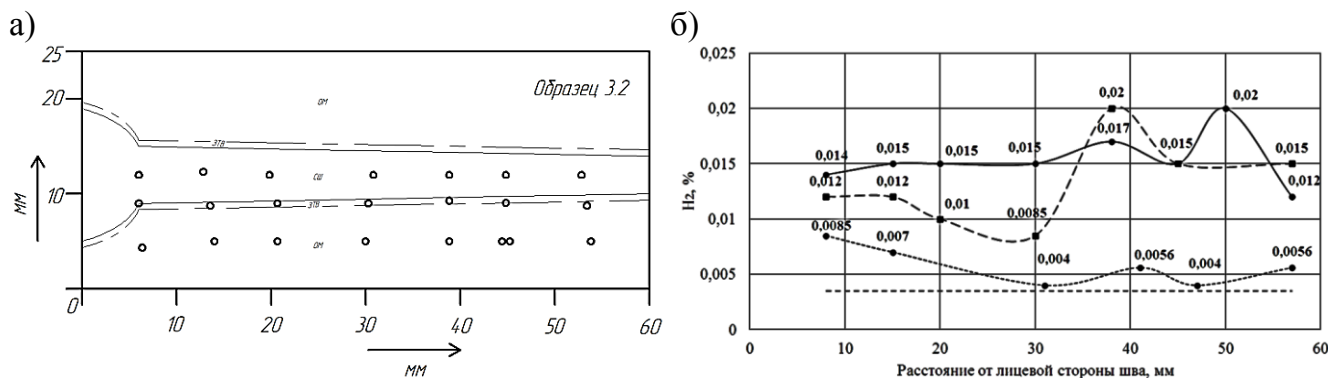


Рисунок 7 – Места точечного замера (а) и распределение водорода по характерным зонам в поперечном сечении шва (б) из сплава ВТ20 по зонам: —■— по линии сплавления; —●— по центру сварного соединения; - -●- - по промежутку между линиями сплавления и центром сварного соединения ближе к линии сплавления; - - - - исходное состояние

В четвертой главе установлено влияние дефектов, не выявляемых рентгенографическим контролем на механические свойства и структуру сварных соединений.

Электронно-лучевую сварку заготовок из сплавов ВТ20 и ВТ23 проводили на электронно-лучевых установках КЛ-144 и 30Е3000 при режимах, приведенных в табл. 1. Выбор режимов сварки указанных заготовок основан на результатах статистической оценки появления дефектов в процессе серийного производства сварных конструкций.

Визуально-оптическим контролем выявлены утяжины и углубления, характерные для сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой титановых сплавов. Результат анализа рентгенограмм сварного соединения из сплава ВТ23 толщиной $h = 50$ мм, выполненного на установке 30Е3000 без подготовки стыкуемых кромок (рис. 8), показал, что дефекты наблюдаются практически по всей протяженности сварного соединения.

По результатам радиографического контроля сварных соединений, выполненных с подготовкой стыкуемых кромок фрезерованием, толщиной 30 и 60 мм из сплавов ВТ20 и ВТ23 обнаружена единичная пора диаметром 0,3 мм. В остальных рентгенограммах сварных соединений наличие дефектов и явления «темные полосы» не выявлено.

После сварки и радиографического контроля сварные соединения подвергались раскрою на лентопильном станке с использованием смазочно-охлаждающей эмульсии с последующей механической обработкой для получения нужной формы образцов на статическое растяжение и ударный изгиб, нумерация полученных образцов приведена в табл. 2.

При статических испытаниях на растяжение и при динамических испытаниях на ударный изгиб разрушение сварных образцов из титановых сплавов происходит преимущественно в околошовной зоне – зоне сплавления.

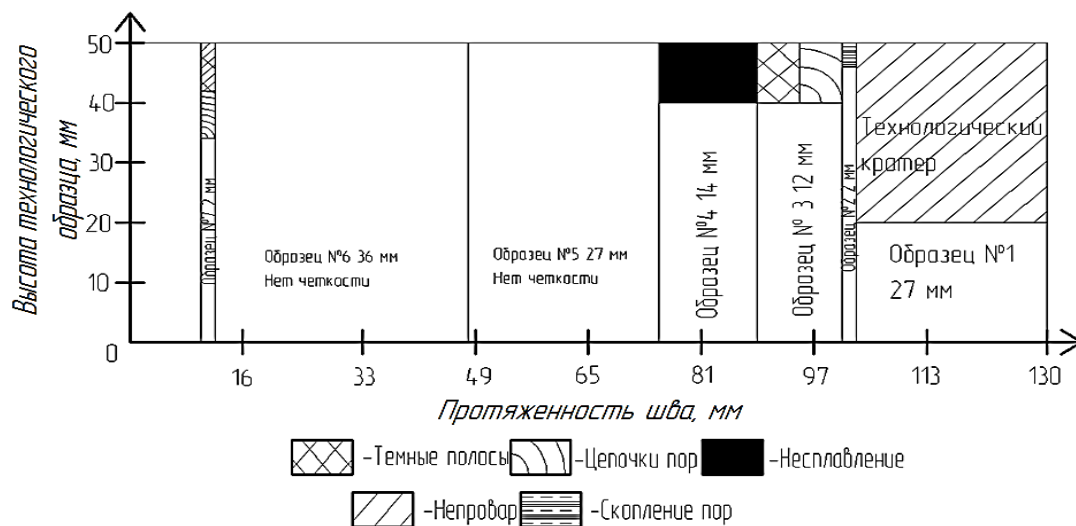


Рисунок 8 – Гистограмма залегания дефектов и явления «темные полосы» по толщине сварного соединения ($h = 50$ мм) образцов, полученная с помощью радиографического контроля

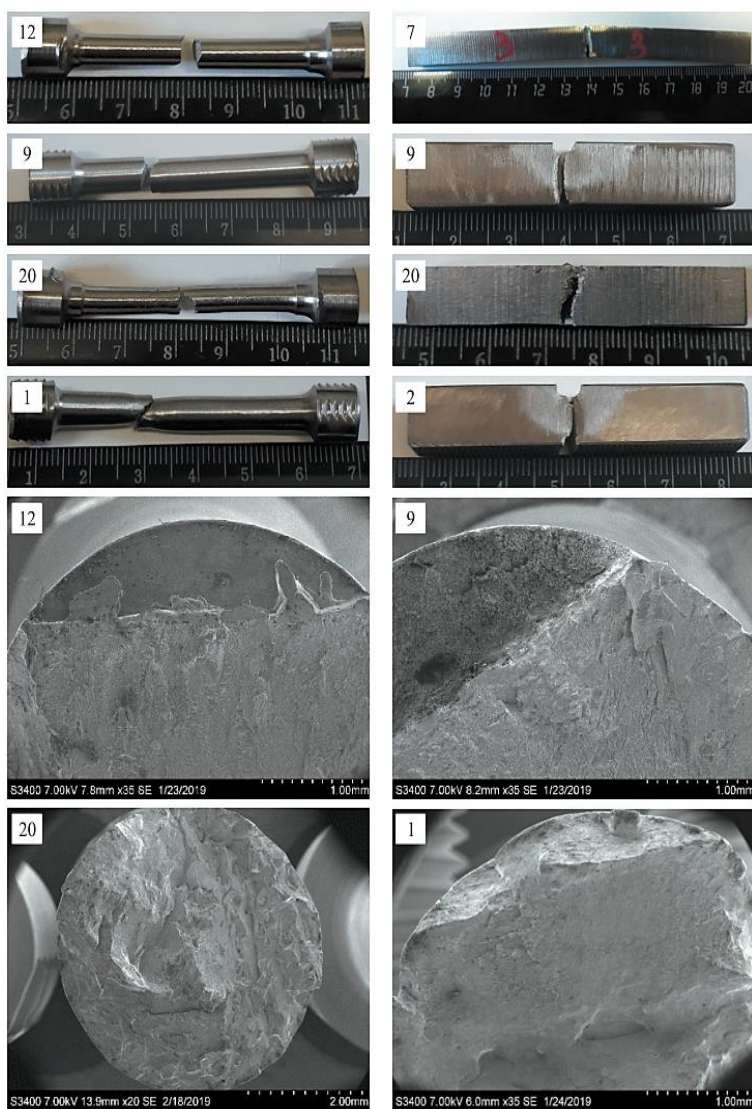


Рисунок 9 – Вид характерных разрушений образцов № 12, 7, 9, 1, 2 из сплава ВТ20 и № 20 из сплава ВТ23

На стадии упругой деформации разрушился образец № 12 (первая группа), на стадии равномерной деформации, близкой к упругой, - образцы № 6–9, 17, 20 (вторая группа), на стадии равномерной деформации, близкой к сосредоточенной, - образцы № 13–15, 19 (третья группа). Все стадии при разрушении выдержали образцы № 1–5, 10, 11, 16, 18, 21 (четвертая группа).

На стадии упругой деформации и близкой к ней разрушение начиналось от концентратора напряжений несплавления - микротрещины (у образцов № 6–9, 12, 17, 20), цепочек пор и слипания в зоне плавления (у образцов № 13–15, 19). У образцов не наблюдалось деформации в зоне начала разрушения, и плоскость разрушения перпендикулярна прилагаемой нагрузке.

В изломе фиксировались зоны несплавления, переходящие в непрерывную цепочку пор (у образца № 12) и микропор (у образца № 9), слипание выплесков (у образца № 20), участки расплавленной исходной поверхности (у образца № 7) и внутренних полостей (у образца № 17).

Наряду с указанными дефектами фиксировался ямочный излом, что характерно для вязкого разрушения. При этом пластическая деформация у образцов третьей и четвертой групп значительно выше, чем у образцов первой и второй групп.

Таблица 2 – Механические свойства сварных образцов из титановых сплавов при различных режимах электронно-лучевой сварки и технологии подготовки кромок

Номер образ-ца	Номер режима сварки по табл. 1	Свойства образца после испытаний						Обнаруженный дефект в изломе по сварному шву
		на статическое растяжение			на ударный изгиб			
		σ_B , МПа	δ , %	Место разрушения образца	КС, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²	α , град	
BT20								
Требования РТМ 1.4.1379-84		960	–	–	–	250	–	–
1	4	944	9,8	Осн. металл	–	36	15	–
2		943	8,4	Осн. металл	–	40	4	–
3 ^{1*}	5	972	5,2	Осн. металл	–	262	38	–
4 ^{1**}		923	4,0	Осн. металл	–	259	36	–
5 ^{1***}		965	6,8	Осн. металл	–	242	32	–
6 ^{2*}		888	1,4	Свар. соедин.	–	91	11	Пикообразования в корне шва
7 ^{2**}		963	3,0	Свар. соедин.	–	66	8	
8 ^{2***}		959	3,5	Свар. соедин.	–	53	8	
9	3	875	4,0	Свар. соедин.	–	26	–	Микротрещины
10		972	5,2	Осн. металл	–	–	5	–
11		965	5,5	Осн. металл	–	24	3	–
12		781	0,06	Свар. соедин.	–	–	4	Цепочки микропор, микротрещины
BT23								
Требования РТМ 1.4.1379-84		1130	–	–	–	250	–	–
13*	6	951	5	Осн. металл	–	132	20	Несплавления, цепочки пор в зоне сплавления
14**		912	1,2	Свар. соедин.	–	68	9	
15**		883	2,8	Осн. металл	–	140	25	
16	2	1186	8,07	Осн. металл	–	40	3	–
17		935	3,12	Свар. соедин.	–	32	4	Микротрещины, расплавление внутренних полостей
18		989	3,1	Осн. металл	–	17	3	–
19	1	1051	8,2	Свар. соедин.	30	–	7	Несплавления, цепочки пор в зоне сплавления
20		888	2,9	Свар. соедин.	37	–	6	
21		1071	7,9	Осн. металл	–	39	5	
Примечания: ¹ – лицевая часть шва; ² – корневая часть шва; * – $V_{рез} = 25$ м/мин; ** – $V_{рез} = 40$ м/мин; *** – $V_{рез} = 125$ м/мин;								

Элементы макрорельефа изломов практически у всех образцов наряду с дефектами (такими как зоны непроваров, поры, выплески без образования соединения, слипание, нерасплавленная исходная поверхность и др.) характеризуют смешанное строение плоскости скольжения (со сколами), присущее хрупкому разрушению, и ямочное, соответствующее вязкому разрушению.

При анализе технологии подготовки стыкуемых кромок под сварку с использованием фрезерования, наблюдается, что скорости резания сплава ВТ20 (образцы с 3 по 8, табл. 2) в интервалах от 25 м/мин до 125 м/мин привели к улучшению механических свойств, отсутствию дефектов и в целом удовлетворяют требованиям РТМ 1.4.1379-84. Наличие низких пластических свойств в корневой части шва связано с наличием дефекта в виде пикообразования, который вызван отсутствием подкладной пластины.

Повышение параметров режима резания сплава ВТ23 приводит к ухудшению механических свойств (образцы 13-15, табл. 2) со снижением до 19% предела прочности (при скорости резания 125 м/мин) и образованию цепочек пор по линиям сплавления. В целом, увеличение скорости резания сплава ВТ23 существенно повышает порообразование.

Применение традиционной технологии подготовки стыкуемых кромок под сварку с обезжириванием ацетоном, обезвоживанием спиртом без дополнительных операций (шабрение, зачистка металлическими щетками), не обеспечивает отсутствие дефектов сварных соединений: цепочки микропор (образец 12, 19-21, табл. 2), микротрещины (образец 9, 17, табл. 2) вне зависимости от режимов сварки.

Исследованиями макроструктуры сварного соединения из сплава ВТ23, полученного без подготовки стыкуемых кромок под сварку, обнаружены поры, расположенные по линии сплавления по всей глубине сварного соединения. Оптической микроскопией установлено, что поры в основном образуются по границам зерен в зоне сплавления (рис. 10). Причем размер некоторых пор составляет менее 0,1 мм, что практически невозможно выявить на рентгеновских снимках, полученных с помощью традиционно применяемого сочетания рентгеновских аппаратов и пленки. Обнаружена также незаконченная коалесценция (рис. 10, а), свидетельствующая о том, что высокая скорость сварки и особенности формирования парогазового канала не обеспечили выход зародышей пор из расплава сварочной ванны.

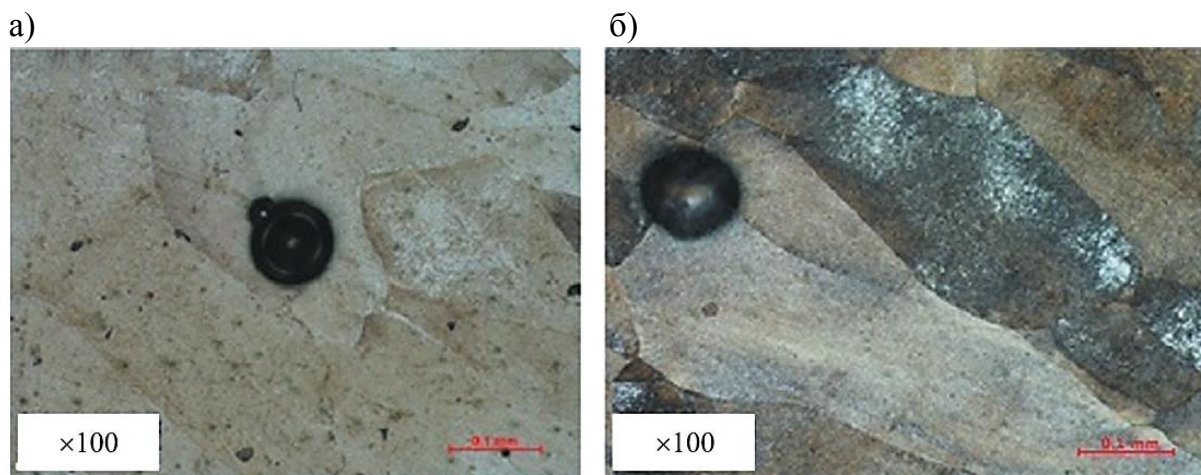


Рисунок 10 – Микроструктура зон: а, б – поры, расположенные по линии сплавления

Электронной микроскопией сварного соединения установлено наличие мелких пор, достигающих в диаметре 3 мкм, расположенных вдоль линии сплавления по направлению к корню сварного соединения (рис. 11). Размеры пор указаны на рис. 11, б.

Характер распределения пор по объему сварного соединения неодинаков, особенно в зонах с низкой температурой свариваемых кромок (в зонах усиления и корня шва). Также закономерность приводит к плавлению границ зерен и сосредоточению капиллярно-конденсированной влаги в расплаве металла и к интенсивной кристаллизации.

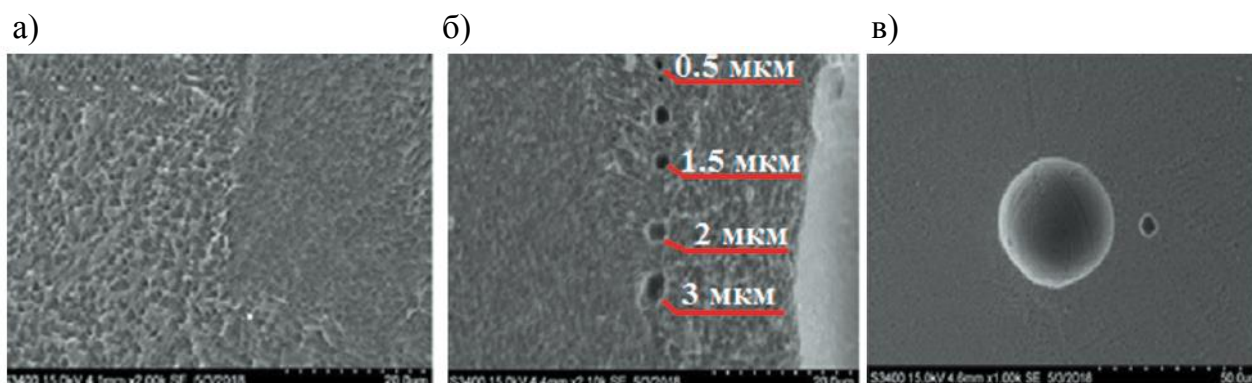


Рисунок 11 – Растровая электронная микроскопия по зонам:
а – граница сплавления в усилении; б, в – микропористость, расположенная по линии сплавления в направлении корня

Цепочки субмикропор, расположенные вдоль линий сплавления, способствуют формированию на рентгенограмме явления в виде «темных полос». Чувствительность рентгеновских аппаратов ЭКСТРАВОЛЬТ-225 и ФИЛИН составляет 0,1 мм, что не позволяет выявлять дефекты нанометрических и микронных размерностей.

В **пятой** главе определено влияние параметров режима механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой.

Обработка резанием титанового сплава ВТ20 происходила с использованием изношенной и новой фрез для сравнительной оценки, режимы резания сплава ВТ20 представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Режимы резания образцов из сплава ВТ20

Режим	Номер прохода					
	1	2	3	4	5	6
Обороты, об/мин	400	500	600	700	800	900
Подача, мм/мин	60	70	80	90	100	110
Скорость резания $V_{рез}$, м/мин	20	25	30	35	40	45

Как видно из данных рис. 12, при традиционных режимах резания сплава ВТ20 наблюдается неравномерное распределение значений шероховатости поверхности (скорости резания $V_{рез}$ 20...30 м/мин). При переходе к обработке сплава ВТ20 с $V_{рез}$ 35...45 м/мин, устанавливается практически равномерное распределение параметров шероховатости. При этом необходимо отметить, что при торцевом фрезеровании образцов из сплава ВТ20 показатели шероховатости практически на порядок меньше показателей при цилиндрическом фрезеровании.

При скоростях 35...45 м/мин и более в зоне резания достигается температура фазового предпревращения и характер отрыва стружки от детали не сопровождается образованием субмикротрещин, способных насыщаться капиллярной влагой и другими компонентами (рис. 13).

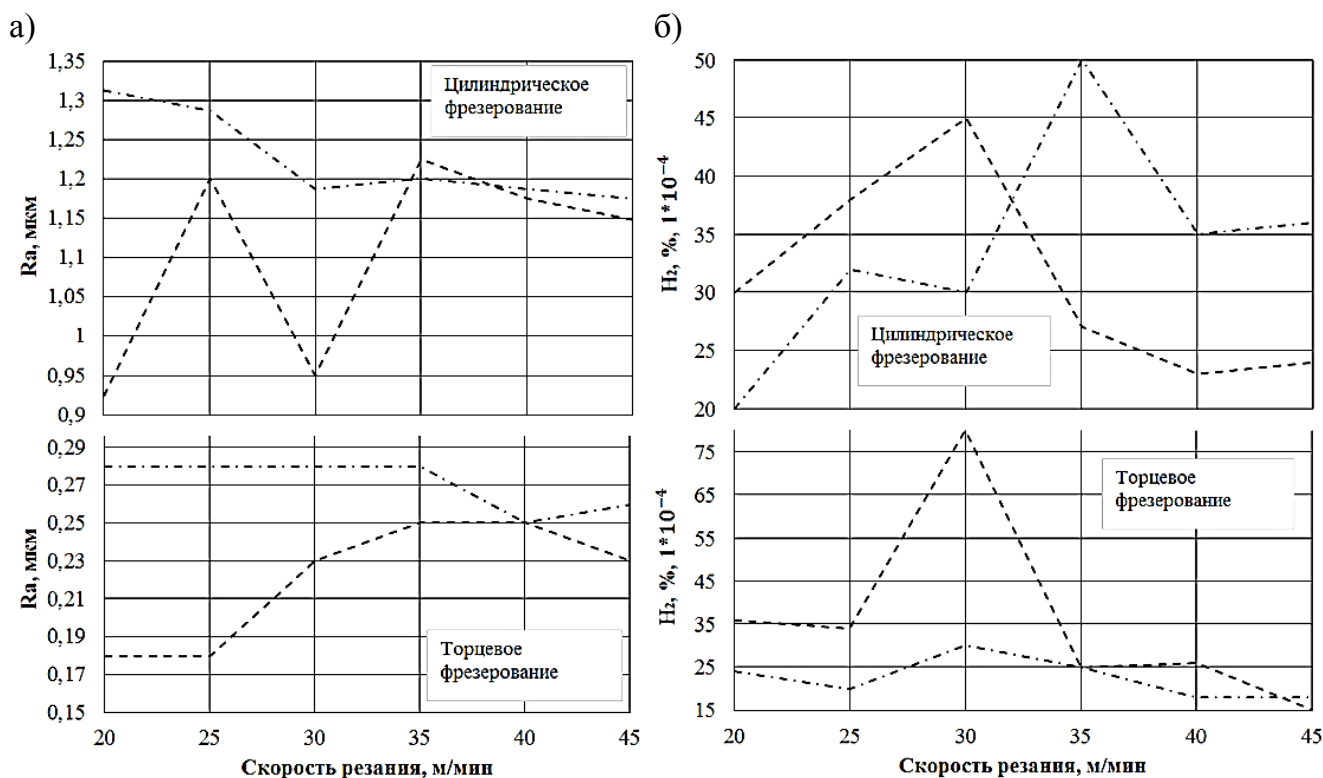


Рисунок 12 – Влияние режимов механической обработки на шероховатость поверхности (а) и изменение содержания водорода (б) образцов из сплава VT20.
 - - - - изношенная фреза; - - - - новая фреза

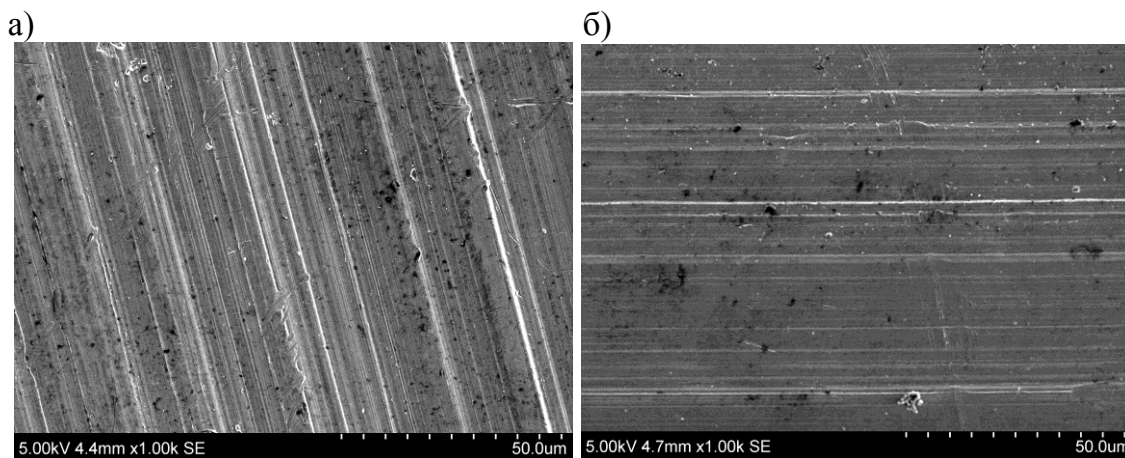


Рисунок 13 – Поверхность титанового сплава VT20:
 а – после торцевого фрезерования; б – после цилиндрического фрезерования

Исследования микроструктуры после торцевого и цилиндрического фрезерования (рис. 14, 15) показали, что процессы пластической деформации, сопровождающиеся нагревом в условиях предпревращения приводят к изменению в приповерхностном слое ориентации зерен в зону отвода тепла под углом 45° относительно основного металла, что способствует некоторому упрочнению приповерхностного слоя в пределах 296...331 HV для торцевого и 296...315 HV для цилиндрического фрезерования.

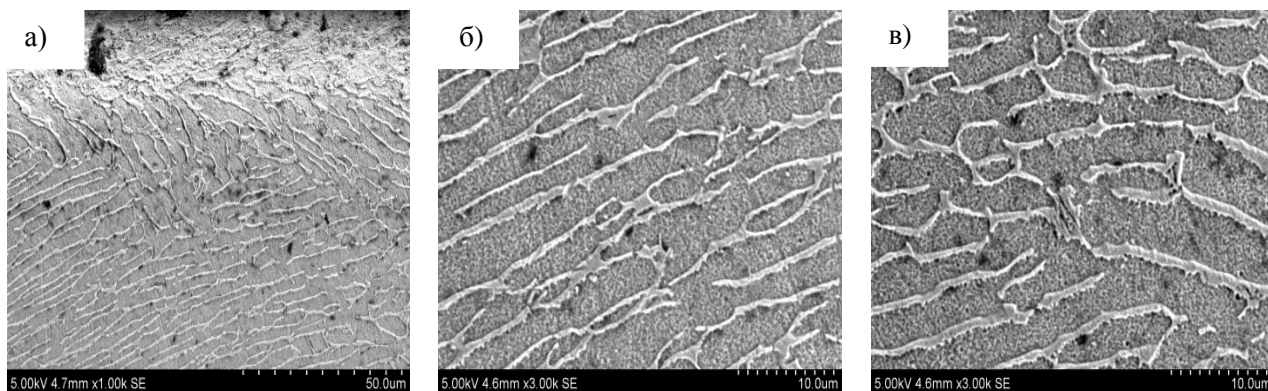


Рисунок 14 – Изображения микроструктуры при торцевом фрезеровании, косой срез:
а – приповерхностный слой; б – переход; в – основной металл

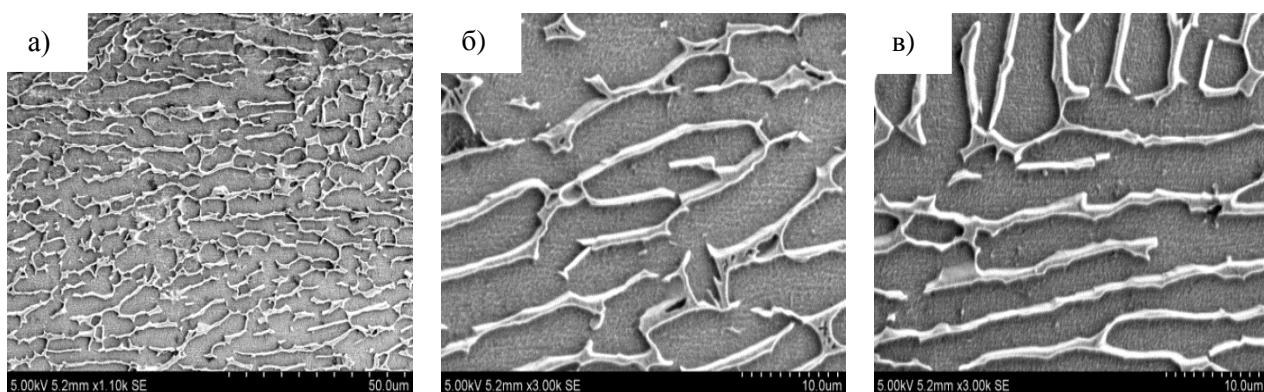


Рисунок 15 – Изображения микроструктуры при цилиндрическом фрезеровании, косой срез:
а – приповерхностный слой; б – переход; в – основной металл

Результаты влияния вида механической обработки на качество стыкуемых кромок под сварку при сборке элементов титановых конструкций и на уровень дефектности сварных соединений в условиях серийного производства приведены в табл. 4. Анализ полученных результатов показал существенное различие в показателях качества стыкуемых поверхностей и уровня дефектности сварных соединений из сплава ВТ20.

Оценка уровня дефектности и насыщенность поверхности капиллярно-конденсированной влагой по отношению поверхностного содержания водорода к содержанию в основном металле оценивали выражениями (1) и (2), предложенными В.И. Муравьевым и П.В. Бахматовым:

$$q = \frac{L_{\text{деф}}}{L_{\text{общ}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $L_{\text{деф}}$ – сумма диаметров пор на длине металла шва 100 мм; $L_{\text{общ}}$ – общая длина металла шва, 100 мм.

$$N = \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{о}}}, \quad (2)$$

где $H_{\text{п}}$ – поверхностное содержание водорода; $H_{\text{о}}$ – содержание водорода в основном металле.

Для сплава ВТ20 показатель (2) составляет 5,3, т. е. содержание водорода в капиллярах превышает таковое в основном металле более чем в 5 раз. Готовые зародыши в большом количестве приводят к высокому уровню дефектности по порам, который для электронно-лучевой сварки сплава ВТ20 составляет 25%.

Полученные результаты были апробированы в технологическом процессе электронно-лучевой сварки на установке КЛ-144 (КНААЗ им. Ю. А. Гагарина). Апробирование произведено на сплаве ВТ20 толщиной 30 мм при торцевом и цилиндрическом фре-

зеровании кромок (по режимам 5 и 6, табл. 3). После сварки произведён радиографический контроль с использованием аппарата РАП 150/300, недопустимых дефектов (в том числе «темных полос»), согласно РТМ 1.4.1379-84, не обнаружено.

Таблица 4 – Влияние вида механической обработки на качество стыкуемых кромок под сварку и на уровень дефектности металла шва при изготовлении элементов титановых конструкций

№	Вид механической обработки	Качество стыкуемых кромок элементов			Толщина h, мм	Уровень дефектности	
		Ra, мкм	H ₂ , %	N, насыщенность влагой		q1, % поры	q2, % темные полосы
1	Торцевое фрезерование по режиму 6, табл. 3	0,24	0,0013	$\frac{0,0013}{0,0016}$	30	0	0
2	Цилиндрическое фрезерование по режиму 5, табл. 3	1,18	0,0015	$\frac{0,0015}{0,0024}$		0	0
3	Рубка на гильотинных ножницах	8,2	0,018	5,3		25	-
4	Шлифование	0,82	0,008	2,53		0,023	0,015

Примечание: в числителе указано поверхностное содержание показателя водорода в обработанной поверхности; в знаменателе содержание показателя водорода в основном металле

Результаты исследований апробированы на КнААЗ им. Ю.А. Гагарина при изготовлении детали «узел навески лонжерона», получено удовлетворительное качество сварных соединений (дефектов в виде пор и явления «темные полосы» не выявлено). В настоящее время технология подготовки кромок под электронно-лучевую сварку внедрена в серийное производство ЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования усовершенствован технологический процесс изготовления силовых титановых конструкций летательных аппаратов, выполняемых электронно-лучевой сваркой, исключая образование порообразования в сварных соединениях. Расчет предполагаемого экономического эффекта за счёт использования рациональных параметров режима резания при механической обработке, обеспечивающих нулевой уровень дефектности (пор) неразъемных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой, выполнен на 1 погонный метр обрабатываемой под сварку заготовки и составил 1163,956 руб.

Перспективой дальнейших исследований является изучение процессов осцилляции электронного луча, способствующих минимизации порообразования при выполнении неразъемных соединений электронно-лучевой сваркой, а также изучение процессов фазового превращения в условиях термической обработки, способствующих повышению прочностных свойств сварных соединений.

Основные выводы по результатам работы:

1. Установлено, что для сплава ВТ20 характерными дефектами являются: цепочки пор - 2 %, непровар - 10 %, явление в виде «темных полос» фиксировалось в 88% соединений. Для сплава ВТ23: цепочки пор - 41 %, непровар - 31 %, несплавление - 19%, явление «темные полосы» - 9%.

2. Установлено, что явление «темные полосы», представляет собой цепочки субмикро- и микропор, достигающих в диаметре от 5 нм до 50 мкм, расположенных в плоскости вдоль линий сплавления в верхней части шва. Наличие данного явления приводит к снижению пластических свойств сварных соединений и необходимости классификации в нормативно-технической документации как дефект.

3. Установлена причина порообразования сварных соединений титановых силовых конструкций, выполняемых электронно-лучевой сваркой, которой является капиллярно-конденсированная влага на поверхности стыкуемых кромок. Показано, что удаление капиллярно-конденсированной влаги прогревом электронным лучом в вакуумной камере не снижает уровень дефектности сварных соединений, поэтому, учитывая габаритность (толщину) соединяемых кромок, возможно управлением параметрами режима их фрезерования.

4. Установлено влияние режимов резания на операции фрезерования, как торцевого, так и цилиндрического, поверхности стыкуемых кромок сплава ВТ20 на шероховатость, содержание капиллярно-конденсированной влаги. Рациональными режимами резания при подготовке кромок под сварку, позволившие получить минимальный уровень дефектности, в том числе и исключить «темные полосы», являются: скорость резания 40 ± 5 м/мин; подача 100 ± 10 мм/мин; обороты 800 ± 100 об/мин.

5. Установлено, что сварные швы, с наличием «темных полос» не уступают по прочностным свойствам соединений без них, но имеют более низкие пластические свойства (относительное удлинение 1-5%).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ:

1. Муравьев, В. И. Обеспечение свойств соединений титановых конструкций летательных аппаратов, полученных сваркой плавлением, одинаковых со свойствами основного металла / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В. Григорьев** // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 218-227.

2. Муравьев, В. И. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В. Григорьев** // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 4. – С. 17-27.

3. Исследование влияния электронно-лучевой сварки титановых сплавов на распределение водорода в сварном шве / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В. Григорьев** [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18. – № 4. – С. 157-168.

4. Муравьев, В. И. Влияние режимов механической обработки стыкуемых кромок на качество неразъемных соединений, выполненных сваркой плавлением, при сборке титановых конструкций летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В.**

Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 6(735). – С. 67-79.

5. **Григорьев, В. В.** Исследование влияния дефектов электронно-лучевой сварки на процессы разрушения титановых сплавов / **В. В. Григорьев**, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 3(720). – С. 23-34.

6. **Григорьев, В. В.** Изменение структуры и микротвердости неразъемных соединений силовых титановых конструкций из сплава ВТ23, выполненных электронно-лучевой сваркой / **В. В. Григорьев**, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 1(706). – С. 20-28.

В изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus:

1. Muravyev, V. I. Production process impact on permanent electron-beam weld connection characteristics for assembly of large titanium aircraft primary structural components / V. I. Muravyev, **V. V. Grigorev**, P. V. Bakhmatov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 548-557.

Монография (в соавторстве):

1. Муравьев, В. И. Обеспечение качества неразъемных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением : монография / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В. Григорьев**. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 296 с.

Статьи, опубликованные в прочих изданиях:

1. **Григорьев, В. В.** Обеспечение качества поверхности стыкуемых кромок под сварку титановых конструкций летательных аппаратов, выполняемых электронно-лучевой сваркой за счет высокоскоростной механической обработки / **В. В. Григорьев**, А. В. Солнцева // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов, Москва, 21–25 ноября 2022 года. – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 177-179.

2. **Григорьев, В. В.** Влияние подготовки стыкуемых кромок на качество сварных соединений силовых конструкций летательных аппаратов, выполненных электронно-лучевой и аргодуговой сваркой / **В. В. Григорьев**, П. В. Бахматов, В. И. Муравьев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 359-362.

3. Солнцева, А. В. Изменения качества поверхности конструкций из титанового сплава ВТ20 при высокоскоростной механической обработке / А. В. Солнцева, В. И. Муравьев, **В. В. Григорьев** // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 81-83.

4. **Григорьев, В. В.** Влияние технологических приемов исключения пор в металле шва на свойства неразъемных соединений титановых конструкций летательных аппаратов / **В. В. Григорьев**, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 226-228.

5. Особенности распределения водорода в сварном шве, выполненного электронно-лучевой сваркой титановых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, **В. В. Григорьев**, М. С. Гаврилов // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : Материалы Третьей международной конференции, Москва, 12–15 ноября 2019 года / Под редакцией В. К. Драгунова. – Москва: Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (Издательство ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ"), 2020. – С. 24-32.

Подписано в печать 16.03.2023.

Формат 60x84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф RISO EZ570E.

Усл. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ 30816.

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.