

## УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального  
директора, д.т.н., профессор

  
Плихунов В.В.

«14» апреля 20 23 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации - Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» на диссертацию Григорьева Владимира Владимировича «Разработка и исследование технологических процессов изготовления элементов силовых титановых конструкций летательных аппаратов электронно-лучевой сваркой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13 – Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов

### Актуальность работы

Применение титановых сплавов BT20, BT23 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.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Подтверждена гипотеза порообразования, утверждающая, 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 толстостенных титановых деталей при электронно-лучевой сварке. Кроме того, 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. Автором установлено, что операция контроля насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями в дополнение к контролю шероховатости поверхности, позволит минимизировать порообразование в сварных соединениях элементов силовых титановых конструкций.

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 обезводоразивания поверхностного слоя при торцевом и цилиндрическом фрезеровании, таковыми параметрами являются: скорость резания  $40 \pm 5$  м/мин; подача  $100 \pm 10$  мм/мин; обороты  $800 \pm 100$  об/мин. 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).

## **Степень обоснованности и достоверности результатов**

Научные положения и выводы, приведенные в работе, обосновываются использованием современного оборудования, стандартизированных и проверенных методик исследования, воспроизводимостью и совпадением полученных в работе данных с данными, представленными в отечественных и зарубежных открытых источниках.

## **Структура и содержание 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.

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.

По результатам анализа технологических процессов подготовки кромок под сварку, электронно-лучевой сварки изделий лонжерон и шпангоут автором установлено, что максимальное количество дефектов обнаружено в изделиях: шпангоут, толщиной  $h = 44$  мм из сплава ВТ20; лонжерон,  $h = 75$  мм из сплава ВТ23, причем доминирующим для ВТ20 является явление «темные полосы», а для ВТ23 – цепочки пор.

По результатам статистической оценки также установлено:

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  $\alpha$ -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.

Также в первой главе автором уделено внимание на способы улучшения качества сварных соединений выполняемых электронно-лучевой сваркой. Рассмотрены технологические приемы исключения пор, которыми являются: импульсная модуляция мощности электронного луча, колебательные перемещения фокальной мощности луча по вертикали и осцилляция луча по траекториям различного вида. Проанализированы способы улучшения поверхности стыкуемых кромок под сварку.

Проведенная статистическая оценка выявленных дефектов в условиях серийного производства летательных аппаратов, а также существующих работ авторов в области улучшения качества сварных соединений позволили сформулировать цель и задачи научно-квалификационной работы (диссертации).

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.

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

Автором выявлено, что 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 шва, минимумы (близкие по содержанию водорода в основном металле) по промежутку между центром сварного соединения и линией сплавления. Неравномерность распределения водорода по зонам определяется температурой соединяемых в процессе электронно-лучевой сварки кромок. Водород, растворённый в установленных 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.

Также установлено, что температурные условия разогрева свариваемых кромок в зависимости от мощности установки ЭЛС, скорости сварки, толщины свариваемых заготовок приводят к появлению существенных изменений содержания водорода от вида образованных дефектов: недостаточная температура разогрева кромок вызывает выплеск металла и несплавление; расплавление по границам зёрен и переход расплава в сварочную ванну связаны с образованием субмикропористости; плавление кромок по объёму зёрен приводит к образованию пористости за счёт попадания готовых зародышей пор (замкнутых областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой).

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

Разрушающим контролем установлено, что наличие дефектов, не выявляемых рентгенографией (в том числе явления в виде «темных полос»), оказывает существенное влияние на пластические свойства сварных соединений (относительное удлинение 1-5%), но при этом прочностные свойства не уступают бездефектным сварным соединениям.

В микроструктуре сварных соединений обнаружены цепочки пор размерностью от 50 нм до 3 мкм, а также незаконченная коалесценция, свидетельствующая о быстропротекающих процессах кристаллизации. Быстропротекающие процессы кристаллизации не позволяют готовым зародышам сформировать более крупные поры. 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.

Автором установлено, что тепловые процессы, возникающие при высокопроизводительном фрезеровании в поверхностном и приповерхностном слоях титановых сплавов, приводят независимо от шероховатости не только к минимальному параметру насыщенности капиллярно-конденсированной влагой, но и к значительному снижению показателя содержания водорода в поверхностном слое (к обезводоразиванию) по сравнению с содержанием водорода в основном металле. При этом уровень дефектности незначителен и наблюдается у

образцов с минимальной насыщенностью капиллярно-конденсированной влагой.

Установлены рациональные режимы резания для подготовки стыкуемых кромок под сварку, способствующие минимальному уровню дефектности сварных соединений при подготовке стыкуемых кромок сплава ВТ20 с использованием режимов, как при торцевом или цилиндрическом фрезеровании: скорость резания  $40 \pm 5$  м/мин; подача  $100 \pm 10$  мм/мин; обороты  $800 \pm 100$  об/мин. Указанные режимы были применены при изготовлении детали «узел навески лонжерона», получено удовлетворительное качество сварных соединений.

### **Замечания и вопросы**

1. В 1 главе на странице 25 дана ссылка на таблицу 1.8, но исходя из текста, ссылка должна быть на таблицу 1.9.

2. На странице 31 не совсем ясен смысл предложения «Место расположения, режимы ЭЛС, позволяют предполагать, что образование темных полос связано с недостаточным удалением ККВ в ходе прогрева расфокусированным лучом, а ЭЛС в начале не образует замкнутых полостей готовых зародышей, и ККВ взаимодействуя с расплавом непосредственно путем диссоциации и образования твердого раствора водорода в  $\alpha$ -титане и гидрида титана с плотностью ниже плотности металла шва».

3. В главе 2, на странице 60 при описании используемых установок для ЭЛС указана установка КЛ-138, но далее она нигде не фигурирует.

4. В главе 3 производится анализ химических элементов в зонах сварного соединения, линий сплавления и в дефектах, констатируется факт превышения легирующих элементов (Al, V, Zr) по сравнению с требованиями ОСТ 1 90013-81, но не уделяется внимание их влиянию на порообразование.

5. В главе 4 не установлено влияние режимов сварки на свойства сварных соединений. Там же в начале главы идет речь о нумерации образцов.



Нумерация образцов на рисунке 4.3, соответствует нумерации образцов, которая представлена далее?

6. Не совсем ясно, зачем выполнена сравнительная оценка изношенной и новой фрез в 5 главе?

7. Применимы ли внедренные в производство режимы подготовки стыкуемых кромок фрезерованием сплава ВТ20 к сплаву ВТ23?

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Григорьева Владимира Владимировича является законченной научно-квалификационной работой. Тема работы актуальна для авиационной промышленности, диссертация обладает научной новизной, научной и практической значимостью. Все утверждения и выводы корректны и обоснованы.

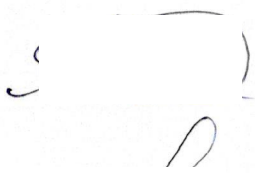
По результатам исследования усовершенствован технологический процесс изготовления силовых титановых конструкций летательных аппаратов, выполняемых электронно-лучевой сваркой, исключая порообразование в сварных соединениях.

По своей актуальности, уровню решенных задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, обоснованности научных положений и выводов, достоверности научных результатов, уровню апробации и опубликованию основных положений, диссертационная работа Григорьева Владимира Владимировича «Разработка и исследование технологических процессов изготовления элементов силовых титановых конструкций летательных аппаратов электронно-лучевой сваркой» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а также п. 9 «Положения о присвоении ученых степеней ВАК Минобразования РФ», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №

842 и паспорту специальности 2.5.13, а ее автор, Григорьев Владимир Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13 – Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов (технические науки).

Отзыв на диссертационную работу Григорьева В.В. утверждён на заседании научно-технического совета АО НИАТ, протокол № 2 от 12 апреля 2023 года.

Заместитель генерального  
директора по научно-  
исследовательской  
деятельности, к.т.н.



Коваленко А.В.

Руководитель комплекта 3



Иванов М.А.