

УТВЕРЖДАЮ

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

Плихунов В.В.

« 02 » 2025 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации – Акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» на диссертацию Бахматова Павла Вячеславовича «Научное обоснование технологических процессов, повышающих качество изготовления авиационных тонкостенных титановых конструкций», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.13 - Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов

1. Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность диссертационной работы Бахматова Павла Вячеславовича обусловлена сразу несколькими важными обстоятельствами, связанными как с развитием современного авиационного производства, так и с нерешёнными фундаментальными вопросами в области технологии сварки титановых сплавов.

В условиях растущей конкуренции в мировом авиастроении, на фоне тенденций к снижению массы летательных аппаратов и увеличению их эксплуатационного ресурса, внимание к технологичности, точности и надежности конструкционных соединений обостряется. Особое значение приобретают тонкостенные сварные конструкции из титановых сплавов, широко применяемые в элементах фюзеляжа, силовых наборах, панелях центроплана и т.д. Эти конструкции предъявляют высочайшие требования к точности геометрии, однородности механических свойств, отсутствию дефектов, прежде всего газовой пористости, возникающей в сварных швах.

Несмотря на многолетние усилия научных школ в области сварки титановых сплавов, полностью решить проблему образования пор при дуговой сварке в серийных условиях до настоящего времени не удалось. Особенно критичной остаётся ситуация при производстве тонкостенных элементов, где влияние остаточных напряжений, перегрева, неравномерности термического цикла и качества подготовки кромок проявляется в наибольшей степени. В реальной производственной практике (что обоснованно и конкретно продемонстрировано автором на примере филиала ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»») до 20% длины швов требует исправления, а это прямое увеличение затрат, снижение ресурса, отказ от полной автоматизации и главное - возможность накопления недопустимых дефектов в процессе эксплуатации.

Представленная работа выходит за рамки локальной технологической задачи: она затрагивает механизмы физико-химического взаимодействия загрязнений с поверхностью заготовок, диффузионного соединения кромок и условий зарождения пор при сварке. Автор обосновывает необходимость пересмотра ряда положений, в том числе норм ПИ 1.4.1898, и вводит новый количественный критерий - насыщенность поверхности водородом, как ключевой индикатор качества подготовки перед сваркой. Этот подход, по сути, является предпосылкой к стандартизации методов неdestructивной оценки технологической готовности заготовок - проблема, слабо проработанная даже в современных нормативных документах.

Важно подчеркнуть, что тема исследования интегрирует в себе аспекты материаловедения, физической химии, теплотехники, сварочного производства и цифровизации процессов контроля, а потому носит междисциплинарный характер, что типично и оправдано для докторского уровня исследований.

Таким образом, исследование отвечает приоритетным задачам авиационной отрасли:

- повышению ресурса летательных аппаратов за счёт исключения дефектов в виде пор в сварных соединениях;

- снижению трудоёмкости за счёт уменьшения исправлений дефектных мест после сварки;
- расширению применимости титана за счёт снижения чувствительности к технологическим ошибкам.

Предложенные автором решения (в частности, автоматизация сварки, корректировка термических режимов, физико-химическая диагностика загрязнений) не имеют прямых промышленных аналогов, подтверждены производственными испытаниями и вносят системный вклад в развитие технологий сборки тонкостенных титановых конструкций сваркой.

Исходя из вышеизложенного, следует признать, что актуальность диссертационного исследования не вызывает сомнений, полностью соответствует уровню докторской диссертации и лежит в русле приоритетных направлений развития аэрокосмической отрасли, обозначенных в государственных стратегических программах РФ и соответствующих международных научных трендов.

2. Краткий обзор содержания работы

Диссертационная работа Павла Вячеславовича Бахматова «Научное обоснование технологических процессов, повышающих качество изготовления авиационных тонкостенных титановых конструкций» представляет собой объёмное, комплексное и последовательно структурированное исследование, охватывающее как фундаментальные аспекты механизма порообразования в титановых сварных соединениях, так и прикладные задачи оптимизации технологических процессов серийного производства.

Работа включает введение, шесть глав, заключение, приложения, список использованных источников и охватывает 257 страниц основного текста. Приведено большое количество иллюстративного материала (100 рисунков, 28 таблиц), что подтверждает масштаб экспериментальной базы. Обоснования и методологические подходы изложены корректно, с соблюдением логической последовательности.

Во введении автор убедительно раскрывает мотивацию исследования, формулирует цели и задачи, подчёркивает противоречия между существующими методами сварки титановых панелей и требованиями к качеству соединений в авиационной промышленности. Чётко обозначены элементы научной новизны и практической значимости, даётся обзор степени разработанности темы.

Глава 1 представляет собой обстоятельный анализ современного состояния вопроса. Автор рассматривает свойства титановых сплавов в контексте их применения в авиации, подробно анализирует причины порообразования при сварке, включая газонасыщение, изменения структуры, термические деформации, влияние капиллярной конденсации загрязнений и физико-химических свойств кромок. Уже на этом этапе выявляются системные ограничения существующих технологий.

Глава 2 посвящена исследованию дефектов, характерных для серийного производства титановых панелей на авиапредприятиях, и разработке методов оценки качества подготовки кромок. Автор предлагает новый критерий - насыщенность капиллярно-конденсированными загрязнениями, определяемую через содержание водорода. Дана классификация дефектов и источников загрязнений, продемонстрированы различия в эффекте от разных методов обработки заготовок.

Глава 3 логично продолжает предыдущую, уточняя механизм влияния загрязнений на формирование пор. Особое внимание уделено влиянию метода механической и химической обработки торцов заготовок (фрезерование, травление, лазерный рез, шлифование) на насыщенность поверхности. Исследована микроструктура торцевых поверхностей кромок, полученная при различных вариантах подготовки, приведена количественная связь между уровнем загрязнений и дефектностью шва.

Глава 4 включает блок работ по разработке режимов сварки, обеспечивающих получение равнопрочных соединений и снижение уровня пористости. Автор проводит аналитические и экспериментальные исследования состава, микроструктуры, свойств сварных швов при разных термических циклах. Обоснованы диапазоны скоростей охлаждения, обеспечивающие равенство свойств шва и ос-

нового металла. Рассматриваются эффекты интенсификации перемешивания металла и их влияние на газонасыщение.

Глава 5 фокусируется на исследовании деформаций и короблений, возникающих вследствие сварки. Приводятся данные реального времени (ширографические наблюдения), изучаются остаточные напряжения и предложены методы их устранения. Описан технологический процесс низкотемпературного отжига с последующим опескоструиванием, позволяющий устранить остаточные напряжения и увеличить усталостную прочность конструкции.

Глава 6 посвящена надёжности сварных соединений при эксплуатации, прежде всего - усталостной прочности и вибрационной устойчивости. Приведены результаты испытаний на имитаторах реальных панелей центроплана. Доказано, что предложенные технологии повышают усталостную прочность в 2 и более раза. Исследуется характер разрушения при различных режимах сварки и подготовке кромок.

В заключении систематизированы основные результаты и выводы. Подчёркивается вклад работы в решение актуальной производственной задачи, даны практические рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы.

Приложения содержат:

- перечень конструкций и компонентов, к которым применимы разработанные процессы;
- акты внедрения и технические отчёты;
- предложения по корректировке нормативной документации (ПИ 1.4.1898);
- характеристику экспериментальной базы и схемы производственных испытаний.

Таким образом, структура и содержание диссертации соответствуют требованиям, предъявляемым к докторским работам. Исследование охватывает весь цикл формирования и верификации научной гипотезы, включая теоретическое моделирование, физико-химические и механические исследования, производственную проверку и внедрение. Материал изложен чётко, логично, с достаточным уровнем научной строгости и инженерной конкретики.

3. Научная новизна и основные результаты исследования

Диссертационная работа Павла Вячеславовича Бахматова содержит комплекс результатов, представляющих собой качественно новый вклад в науку и технологию сборки титановых конструкций авиационного назначения. Новизна заключается не только в детализации физических процессов, но и в системном подходе к модификации производственных процедур с опорой на полученные научные данные.

К числу наиболее значимых научных результатов относятся следующие положения:

1. Предложена и обоснована новая физико-химическая модель механизма порообразования, основанная на концепции диффузионного спекания кромок перед фронтом сварочной ванны и наличии замкнутых полостей, содержащих капиллярно-конденсированные загрязнения. В условиях локального перегрева и давления от усадки жидкой ванны такие полости становятся очагами зарождения газовых пор. Подобное объяснение объединяет термодинамические и кинетические аспекты порообразования, предлагая физически достоверную альтернативу существующим эмпирическим подходам.

2. Введён количественный критерий оценки качества подготовки торцов заготовок - насыщенность водородом поверхности. Это нововведение позволяет перейти от формальных требований к шероховатости или внешнему виду к объективной диагностике технологической готовности соединения. Диссертант предлагает пороговое значение критерия, при котором обеспечивается получение беспористого соединения, что даёт возможность практического применения данного показателя в серийном контроле.

3. Установлены физически обоснованные пределы режимов термического цикла сварки (ТЦС), обеспечивающие равнопрочность шва и основного металла при различных толщинах заготовок (1,2; 2,0; 2,5 мм). Предложены граничные значения скорости охлаждения в области фазовых превращений (от 150 до

750 °C/с), обеспечивающие оптимальную структуру без грубых α -колоний и снижения пластичности. Этот результат важен не только для повышения прочности, но и для предсказуемости свойств тонкостенных титановых соединений при автоматизации сварки.

4. Разработан технологический процесс низкотемпературного отжига в воздушной среде с последующим опескоструиванием, позволяющий снижать остаточные напряжения в тонкостенных титановых панелях. При этом сохраняется оксидно-нитридная пленка, препятствующая вторичному водородному насыщению. Такой подход является более экономичным и технологичным по сравнению с вакуумным или инертным отжигом, ранее применявшимся в отрасли.

5. Установлена эффективность комбинированной обработки заготовок (газолазерной резки в среде азота или аргона) как способа минимизации капиллярной загрязнённости поверхности и предотвращения пор. Обоснован выбор определённых методик раскроя, обеспечивающих практически нулевой уровень дефектности.

6. Доказана возможность полной автоматизации процесса сварки титановых тонкостенных конструкций на примере аппарата УСП-5000 при соблюдении предложенных технологических условий. Данный результат особенно важен в условиях современного серийного производства, стремящегося к цифровизации и исключению человеческого фактора.

7. Установлена зависимость усталостной прочности сварных соединений от микроструктурных особенностей шва и остаточного напряжённого состояния, вызванного режимами ТЦС. Показано, что реализация предложенных технологических решений позволяет увеличить усталостную долговечность сварных соединений в 2 и более раза, что подтверждено результатами вибрационных и циклических испытаний.

Совокупность перечисленных положений демонстрирует не отдельные локальные усовершенствования, а цельную научную концепцию, охватывающую весь технологический цикл - от подготовки поверхности и выбора режимов сварки до контроля качества и термической коррекции остаточных напряжений. Но-

визна результатов подтверждена их практической проверкой, полученными патентами, а также актами внедрения в производство на ведущем авиастроительном предприятии.

Таким образом, работа Бахматова Павла Вячеславовича соответствует критериям докторской диссертации, поскольку содержит научно обоснованные, ранее не опубликованные решения, способные оказать влияние на развитие технологии сварки авиационных конструкций, как в теоретическом, так и в прикладном аспектах.

4. Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации

Достоверность диссертационного исследования Бахматова П.В. подтверждается сочетанием трёх ключевых факторов:

- использованием современных экспериментальных методик,
- репрезентативностью объёма проведённых исследований,
- логической связностью между задачами, методами и выводами.

В первую очередь следует отметить, что в диссертации реализован полный цикл верификации научной гипотезы, начиная с теоретического анализа термодинамических и кинетических условий порообразования и заканчивая испытаниями сварных соединений в условиях, максимально приближенных к реальному производству. Это свидетельствует о фундаментальном подходе к научной достоверности.

Автором применён широкий спектр методов физико-химических и механических исследований:

- рентгенографический контроль сварных швов,
- электронная и оптическая микроскопия,
- спектральный химический анализ,
- анализ водородной насыщенности,
- статические и динамические механические испытания,

- а также экспериментально-промышленные исследования на опытных образцах.

Эксперименты проводились как на лабораторной базе, так и в условиях действующего производства на КнААЗ им. Ю.А. Гагарина, что существенно усиливает прикладную достоверность выводов. Наличие актов внедрения, технических отчётов и производственных протоколов подтверждает, что полученные результаты не являются умозрительными или гипотетическими, а прошли проверку в условиях серийной технологии.

Важно отметить корректность построения экспериментального плана:

- сравнивались различные методы подготовки заготовок (механические, физико-химические, комбинированные),
- варьировались режимы термического цикла сварки,
- оценивались свойства не только шва, но и околошовной зоны,
- проводились циклические и вибрационные испытания, имитирующие реальные нагрузки на элементы конструкций летательных аппаратов.

Автор убедительно демонстрирует причинно-следственные связи между выбранными параметрами (скорость охлаждения, насыщенность загрязненностями, тип подготовки поверхности и др.) и характеристиками сварных соединений (уровень пористости, микроструктура, предел прочности, остаточные напряжения, усталостная прочность). В выводах нет натяжек или обобщений, не подтверждённых фактами. Вся логика рассуждений выдержана в рамках строгого научного дискурса.

Следует особо отметить, что автор не ограничивается лабораторными подтверждениями, а предлагает методологию оценки технологического риска поробразования и систему контроля технологической готовности соединяемых кромок на этапе подготовки. Это указывает на высокий уровень инженерной проработки темы.

Сравнительный анализ с отечественными и международными аналогами выполнен корректно и подтверждает оригинальность ряда решений. Приводятся

ссылки на авторитетные источники, а также используются термодинамические модели, проверенные на практике.

Таким образом, результаты диссертации и сформулированные на их основе выводы можно считать научно обоснованными и экспериментально подтверждёнными. Верификация результатов проведена на высоком уровне, как с точки зрения точности измерений, так и с позиции воспроизводимости. Это соответствует требованиям, предъявляемым к научным исследованиям уровня докторской диссертации.

5. Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы Бахматова Павла Вячеславовича не вызывает сомнений и подтверждается как содержанием научных результатов, так и фактом их внедрения в производственные процессы крупного авиастроительного предприятия. В современных условиях, когда авиационная отрасль сталкивается с задачами повышения надёжности, импортонезависимости и технологической устойчивости, предложенные автором решения обладают высокой прикладной ценностью.

Наиболее значимые практико-ориентированные достижения исследования можно систематизировать следующим образом:

1. Разработан и внедрён технологический процесс сварки титановых панелей, обеспечивающий:

- устранение порообразования в шве за счёт рациональной подготовки поверхности и управления ТЦС;

- равнопрочность сварного соединения и основного металла, что ранее достигалось только при значительном переупрочнении шва с сопутствующими потерями в пластичности;

- снижение остаточных напряжений и термдеформационных искажений конструкции, что особенно критично для тонкостенных элементов.

2. Предложены технологические режимы и методы подготовки кромок (в том числе газолазерный раскрой в защитных средах), гарантирующие минимальную загрязнённость поверхности. Использование критерия насыщенности водородом как контрольного параметра позволяет внедрить экспресс-методику оценки качества разделительных операций, пригодную для условий серийного производства.

3. Разработаны граничные параметры термического цикла сварки (скорости охлаждения, допустимые интервалы температурных градиентов), которые позволяют:

- исключить образование грубых β -фаз в зоне шва;
- регулировать фазовые превращения для получения благоприятной структуры с минимальными дефектами;
- обеспечить устойчивое качество сварных соединений при переходе к автоматизированному сварочному процессу.

4. Впервые реализована на практике методика низкотемпературного отжига в воздушной среде с последующим опескоструиванием для снятия остаточных напряжений в крупногабаритных сварных конструкциях. Это значительно упрощает техпроцесс, снижает себестоимость и повышает ресурс сварных соединений, увеличивая усталостную прочность более чем в два раза - критический параметр для лётных элементов.

5. На основе проведённых исследований предложены корректировки в производственные инструкции, включая предложения по дополнению нормативного документа ПИ 1.4.1898 («Сварка дуговая сплавов титана в среде защитного газа»), что подтверждает отраслевую значимость работы.

6. Работа имеет реальное внедрение на производстве:

- проведены опытно-промышленные испытания в филиале ПАО «ОАК» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»;
- получены акты внедрения и технические отчёты;

- внедрены новые операции на автоматической сварочной установке УСП-5000, что подтверждает возможность полной автоматизации процесса без ущерба для качества.

7. Результаты исследования используются в образовательной и патентной деятельности:

- оформлены авторские свидетельства и патенты на технические решения, касающиеся подготовки поверхности и контроля загрязнений;

- материалы работы внедрены в программы подготовки специалистов по профилям «Оборудование и технологии сварочного производства» и «Авиастроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете.

Таким образом, предложенные диссертантом технологические решения являются востребованными, воспроизводимыми и масштабируемыми, что подтверждается фактами производственного внедрения, а также реакцией профессионального сообщества (доклады на ведущих отраслевых конференциях, в т.ч. МАИ, ВИАМ).

Работа Бахматова П.В. демонстрирует ярко выраженную прикладную направленность, в полной мере отвечающую задачам инновационного развития авиационной отрасли РФ, и может служить основой для тиражирования на других машиностроительных предприятиях, работающих с титаном.

6. Замечания по работе

Диссертационная работа Бахматова Павла Вячеславовича, при всей её высокой научной и прикладной значимости, не лишена отдельных недостатков и аспектов, требующих уточнения или дальнейшего развития. Ниже приводятся основные замечания, которые, не умаляя достоинств исследования, могли бы быть учтены при его продолжении или при публикации результатов в виде монографии.

1. Ограниченность применения критерия «насыщенности водородом».

Предложенный диссертантом критерий насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями, выраженный через водородную насыщенность поверхности, безусловно, представляет собой важный и оригинальный подход. Однако в работе не раскрыта чувствительность метода определения к внешним условиям (влажность, термостатирование, сорбция из атмосферы). Также отсутствует обоснование применимости метода контроля в производственных условиях, где невозможен полный лабораторный контроль. Практическое внедрение критерия требует дополнительной проработки с точки зрения метрологии.

2. Недостаточное внимание математическому моделированию процессов.

При наличии глубокого физико-химического анализа порообразования, а также детальной проработки термических режимов сварки, работа практически не использует численное моделирование (например, CFD, FEM) для прогноза температурных полей, напряжений и деформаций в сварной зоне. Это ограничивает воспроизводимость результатов в новых условиях (другие геометрии, толщины, марки сплавов) и несколько снижает универсальность предложенных подходов.

3. Не охвачен вопрос влияния легирующих элементов на устойчивость к порообразованию.

Хотя в работе основное внимание уделяется физико-механическим процессам и подготовке поверхности, остаётся за рамками диссертации вопрос о влиянии химического состава сплава (особенно легирующих примесей) на вероятность порообразования. Это особенно важно, учитывая использование различных марок титана в авиации (BT1-0, BT6, ПТ-3В и др.). Проведение сравнительного анализа могло бы расширить обоснованность и применимость выводов.

4. Формально изложены отдельные выводы в конце глав.

Некоторые промежуточные выводы в главах 3 и 5 сформулированы схематично и не всегда подчёркивают количественную значимость выявленных закономерностей. Более полное численное обобщение результатов (например, зависимости «уровень пористости - насыщенность - тип подготовки») усилило бы информативность и прикладной эффект текста.

5. Иллюстративный материал местами перегружен и не всегда самодостаточен.

Ряд графиков и микрофотографий (в частности, в главах 2 и 4) приведены без достаточного пояснения или привязки к конкретным режимам, что затрудняет интерпретацию данных без обращения к тексту. Часть таблиц перегружена необобщёнными числовыми массивами, без визуального или статистического выделения ключевых тенденций. Более избирательный подход к включению иллюстраций повысил бы читабельность и точность восприятия.

6. Недостаточная дискуссия в отношении зарубежных аналогов.

Работа содержит ссылки на известные научные труды, однако анализ зарубежных технологических решений и нормативных подходов (например, AWS, ISO, ASTM) представлен ограниченно. Для докторской диссертации, претендующей на вклад в теорию и практику, было бы уместно включить сравнение с зарубежным опытом (в частности, в аспекте автоматизации и контроля качества сварки титана).

Все приведённые замечания носят частный характер, в большинстве случаев касаются степени проработки отдельных аспектов, а не содержания основного научного вклада. Они не снижают значимости выполненного исследования и могут быть использованы как направления для дальнейшего углубления работы в рамках последующих публикаций и прикладных разработок.

7. Заключение

Диссертационная работа Бахматова Павла Вячеславовича «Научное обоснование технологических процессов, повышающих качество изготовления авиационных тонкостенных титановых конструкций» представляет собой законченный научно-технический труд, направленный на решение актуальной и сложной задачи авиационного производства - обеспечение качества сварных соединений титановых сплавов с целью повышения надёжности и ресурса конструкций.

Исследование отличается высоким уровнем методической проработки, экс-

периментальной достоверностью, научной новизной и практической применимостью. Представленные в работе положения развивают теоретическую базу процессов сборки авиационных тонкостенных титановых конструкций сваркой, предлагают инженерно реализуемые решения и подтверждаются промышленной апробацией. Результаты имеют прямую значимость для предприятий авиационной отрасли, а также создают основу для разработки новых или усовершенствования существующих стандартов, технологических регламентов, производственных инструкций и образовательных программ.

С учётом изложенного АО «Национальный институт авиационных технологий» считает, что диссертация Бахматова Павла Вячеславовича соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а также п.9 «Положения о присуждении учёных степеней ВАК Минобрнауки РФ», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 и паспорту специальности 2.5.13, а её автор, Бахматов Павел Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.13 - Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов (технические науки)

Отзыв на диссертационную работу Бахматова П.В. утвержден на заседании научно-технического совета АО НИАТ, протокол № 4 от «20» сентября 2025 года.

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



Коваленко А.В.

Директор по науке,
д.т.н., профессор




Егоров В.Н.