

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу **Бахматова Павла Вячеславовича** на тему «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**

В современных условиях авиастроительная отрасль Российской Федерации сталкивается с необходимостью углублённой локализации и технологического суверенитета при проектировании и производстве авиационной техники. Одновременно возрастает потребность в повышении ресурса, надёжности и эффективности конструкций нового поколения, особенно в классе многоцелевых, транспортных и беспилотных летательных аппаратов. В этом контексте титановые сплавы выступают в качестве одного из ключевых материалов, особенно в сегменте тонкостенных силовых элементов, работающих при значительных знакопеременных нагрузках и вибрационных воздействиях.

Однако до настоящего времени остаётся не решённым целый ряд технологических проблем, связанных со сваркой тонкостенных титановых конструкций, в первую очередь это касается - стабильности получения сварных швов, свободных от пор, микротрещин и термически обусловленных деформаций. Эти проблемы не только снижают надёжность и ресурс изделий, но и ограничивают возможности полной автоматизации производственных операций, столь необходимой в условиях осуществляющегося цифрового перехода и массового серийного выпуска продукции.

В этих условиях становится очевидным, что не просто достижение устойчивости, но уже и обеспечение воспроизводимости технологии сварки перестаёт быть частной задачей только сварочного производства - она становится системным элементом проектирования и жизненного цикла авиационного изделия в целом.

Очень важно, что представленная на рецензию работа направлена на решение именно этих стратегических задач, так как предложенный автором оригинальный научный подход позволяет не просто выявить дефекты на стадии контроля или ремонта, а предотвратить их появление ещё до начала сварки, за счет точной диагностики подготовки поверхностей, управления тепловыми циклами и

созданием условий для формирования равнопрочного соединения. Очень важно также, что автор делает акцент на производственной адаптации решений, предлагая технологии, совместимые с действующим промышленным оборудованием и способные к масштабированию.

Таким образом, рассматриваемая работа, несомненно, актуальна для отечественного самолетостроения, так как в ней автором предлагается оригинальный путь к системному улучшению качества титановых конструкций, включающих силовые панели, крепёжные узлы и элементы обшивки современных летательных аппаратов.

**2. Краткий обзор содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и выводов, изложена на 257 страницах машинописного текста, включая приложения, и содержит 100 рисунков, 28 таблиц, список литературы из 157 наименований.

**Во введении** автор обосновывает выбор научного направления, обозначая имеющееся противоречие между высокой чувствительностью титановых конструкций к технологическим нарушениям и ограниченными возможностями традиционных методов обеспечения качества сварных соединений, формулирует цели и задачи исследования.

**Первая глава** содержит подробный анализ имеющейся отечественной и зарубежной литературы, а также нормативной базы по сварке титановых сплавов. Автором грамотно сформулирована оценка текущего уровня технологической зрелости отраслевых решений, показано, что при серийно применяющихся технологиях сварки до сих пор отсутствуют надёжные методы предотвращения порообразования, особенно в условиях массового производства тонкостенных элементов. Проведенный анализ позволил автору грамотно сформулировать цель и задачи исследований.

**Во второй главе** приведены результаты исследования влияния разделительных операций и параметров образования сварных швов ребристых панелей на качество сварных соединений. Автором подробно проанализированы особенности подготовки поверхности деталей к сварке и условия формирования зоны сварного шва, выявлены причины образования дефектов, показано, что насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки капиллярно-конденсированной влагой может служить критерием для оценки качества поверхности стыкуемых кромок, вызывающих порообразование в металле шва титановых сплавов.

**В третьей главе** приведены исследования влияния технологических процессов образования поверхности соединяемых кромок на капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва тонкостенных титановых конструкций. Установлено, что доминирующими факторами образования пористости в металле шва при сварке плавлением титановых сплавов являются микро-, субмикро-трещины, несплошности и т.п.. Показана неэффективность использования параметров шероховатости для оценки качества образования поверхности раздела на уровень дефектности металла шва, предложен универсальный метод оценки качества образования поверхности раздела заготовок и присадочной проволоки под сварку.

**Четвёртая глава** посвящена разработке и верификации режимов термического цикла сварки, оптимальных для панелей различной толщины и геометрии. Подробно рассматриваются тепловые параметры, структура сварной зоны, характер фазовых превращений. Исследования охватывают наиболее используемые в авиации толщины (1,2-2,5 мм) и демонстрируют возможность достижения равнопрочности.

**В пятой главе** автор приводит данные по анализу остаточных напряжений и деформации в сварных конструкциях. В результате исследований им предложена технология отжига в воздушной среде, сочетающая эффективность и экономичность, что делает её применимой в крупносерийном авиастроении.

**Шестая глава** посвящена экспериментальной проверке выдвинутых автором гипотез, которая проводилась как на реальных конструкциях, так и на образцах путем определения эксплуатационных характеристик сварных соединений. Представлены результаты усталостных испытаний, подтверждающие повышение ресурса более чем в два раза при реализации авторских рекомендаций.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты, даны рекомендации по внедрению технологических разработок в производство.

Таким образом, диссертационная работа П.В. Бахматова обладает целостностью, глубиной проработки и методологической строгостью. Структура и логика изложения соответствуют критериям, предъявляемым к докторским исследованиям в области проектирования и технологии летательных аппаратов.

### **3. Научная новизна и основные результаты исследования**

Научная значимость диссертационного исследования Бахматова Павла Вячеславовича не вызывает сомнений, заключается в формировании нового инже-

мерно-научного подхода к обеспечению качества сварных соединений титановых конструкций и включает в себя:

- разработку оригинальной модели порообразования, в которой решающим фактором признаётся наличие капиллярно-конденсированных загрязнений, замыкающихся в зоне будущего шва и активирующихся при сварочном нагреве;
- создание критерия водородной насыщенности как количественного показателя технологической готовности заготовок, который не имеет аналогов в отрасли и может стать основой разработки новых стандартов контроля качества при производстве авиационных конструкций;
- обоснование температурных диапазонов и скоростей охлаждения, обеспечивающих получение равнопрочных сварных соединений, включая критические параметры для фазовых превращений. Это особенно важно для интеграции технологии в системы автоматизированного проектирования и цифрового двойника изделий.

С точки зрения прикладной ценности, диссертация Бахматова Павла Вячеславовича представляет собой исчерпывающее технологическое руководство по сварке титановых панелей авиационного назначения, сочетающее инженерную реализуемость, экономическую обоснованность и научную строгость. Результаты внедрены на филиале ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», что подтверждает их воспроизводимость и промышленную применимость.

Особое значение имеет то, что предложенные решения встраиваются в контекст проектирования конструкции в целом, а не рассматриваются как изолированный технологический процесс. Это позволяет учесть влияние выбора технологии сварки на геометрию, расчётную прочность, усталостный ресурс и компоновочные особенности конструкции самолёта - то есть фактически делает технолога полноправным участником процесса проектирования летальных аппаратов.

Таким образом, совокупность полученных научных и прикладных результатов даёт все основания расценивать диссертацию как весомый вклад в развитие технологий авиационного производства, полностью соответствующий уровню докторского исследования.

#### **4. Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации**

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием базовых теоретических положений теории сварочных процессов и материаловедения, современных сертифицированных методик и оборудования при проведении экспериментальных исследований, включающих методы математического и физиче-

ского моделирования, корректным использованием методов статистической обработки экспериментальных данных и подтверждается положительным результатом при экспериментальной проверке и практическом опробовании разработок в условиях производства.

Личный вклад автора не вызывает сомнения и состоит в выполнении патентно-аналитических исследований, в научной постановке цели и задач исследования, анализе литературных данных и результатов исследований, проведении основной доли экспериментов, статистической обработке экспериментальных результатов, опробовании разработанных предложений в производственных условиях.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. Оформление диссертационной работы отвечает установленным требованиям. Диссертация написана грамотным, доступным техническим языком, что подтверждает высокую эрудицию и квалификацию автора.

## **5. Практическая значимость работы**

Практическая значимость диссертационной работы П.В. Бахматова заключается в разработке и внедрении технологических решений, направленных на устранение пористости и повышение ресурса сварных соединений титановых конструкций, применяемых в авиации.

Предложенные методы оценки качества подготовки кромок, оптимизации термического цикла сварки и устранения остаточных напряжений позволяют повысить стабильность и воспроизводимость сварочного процесса, обеспечить равнопрочность шва и основного металла, а также увеличить усталостную прочность конструкций в 1,8-2,2 раза.

Полученные результаты внедрены в серийное производство на «КнААЗ», адаптированы под автоматическую сварку, сопровождаются нормативными и техническими рекомендациями. Работа представляет собой методологическую и технологическую основу для совершенствования сварочных процессов в отечественном авиационном производстве.

## **6. Замечания по работе**

При всей высокой научной и практической значимости диссертационной работы Бахматова П.В., можно отметить ряд замечаний, которые заслуживают обсуждения, уточнения и могли бы быть предметом дальнейшего развития представленной работы:

1. В диссертации автор подробно анализирует процесс возникновения остаточных напряжений, сопровождающийся короблением панелей, однако этот анализ проводится преимущественно с позиций технолога. В то же время, для целей системной интеграции в авиастроении, полезным было бы включение проектных расчётов по допустимым искажениям геометрии элементов (в контексте аэродинамики, сборки, стыковки). Это позволило бы расширить сферу применимости результатов до этапа конструктивного проектирования.

2. Работа сконцентрирована в основном на  $\alpha$  титановом сплаве BT20, однако в самолетостроении широко применяются и другие сплавы, в частности  $\alpha+\beta$ -сплавы, которые обладают иными технологическими и эксплуатационными свойствами (BT6, BT16). Поэтому расширение диапазона изученных материалов повысило бы универсальность технологических рекомендаций.

3. Несмотря на глубокое экспериментальное обоснование причин порообразования, в работе отсутствует численная модель, позволяющая прогнозировать риск возникновения дефектов в зависимости от параметров сварки и состояния поверхности. С точки зрения современной цифровой инженерии, такая модель могла бы быть востребована для интеграции в САПР/PLM-среды авиазаводов.

4. При разработке критерия оценки качества подготовки поверхности стыкуемых кромок заготовок - «насыщенность водородом», автор не учитывает влияние на порообразование чистоты (влажности) аргона применяемого в производстве, а так же влияние таких параметров, как температура и влажность в помещении в котором выполняются сварочные работы, характер движения газа. Как известно применяемая при ААДС оснастка обеспечивает условия подачи аргона гарантирующие качественную защиту сварочной ванны, однако требуется обеспечение ламинарного потока, так как при турбулентном потоке будет происходить замешивание воздуха из атмосферы в защитный газ.

5. Не совсем понятно утверждение автора в главе 5 *«чем меньше скорость сварки, тем меньше коробление»*. При меньшей скорости увеличивается объём сварочной ванны (об этом говорят данные приведенные автором в таб.№5 автореферата) и тем больше объём затвердевающего металла, а значит и склонность к короблению конструкции должна быть выше;

6. Не понятно утверждение автора в главе 5, что применение вакуумного отжига для ребристых панелей ограничивается из-за того, что *«скорость натекания существенно влияет на отжигаемых деталей и изменение их механических свойств и неприемлемо из-за отсутствия вакуумных печей таких размеров»*. При работающих вакуумных насосах натекание в **герметичных** вакуумных печах не

оказывает влияние на газонасыщение поверхностных слоёв, а применение не герметичных вакуумных печей недопустимо. (В частности, вакуумные печи для термообработки крупногабаритных сварных титановых конструкции, производства ОАО «Электромеханика» г. Ржев, имеются на КАЗ «им. С.П. Горбунова – филиал ПАО «Туполев»» г. Казань и обеспечивают высокое качество изделий;

7. В главе №6 приведены результаты влияния технологических операций на усталостную прочность, при этом отсутствует информация по зазорам в свариваемых стыках, превышения свариваемых кромок (если были), по применяемой оснастке для защиты аргоном наружной и обратной стороны сварного шва;

8. Автор ограничивает исследование причин порообразования только методом ААДС, не рассматривая такие виды сварки, как плазменную, лазерную и электронно-лучевую, которые получили широкое распространение в авиастроении при изготовлении конструкций из титановых сплавов.

Все указанные замечания носят дискуссионный и уточняющий характер. Они не снижают ценности выполненной научной работы и не влияют на общую позитивную оценку её качества, значимости и соответствия требованиям, предъявляемым к докторской диссертации.

## 7. Выводы

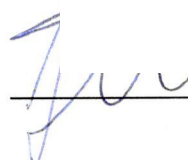
Диссертация Бахматова Павла Вячеславовича «Научное обоснование технологических процессов, повышающих качество изготовления авиационных тонкостенных титановых конструкций» представляет собой завершённое научное исследование, отличающееся высокой степенью методологической строгости, инженерной применимости и научной глубины.

Автором решена актуальная и практически значимая задача обеспечения качества сварных соединений из титановых сплавов в авиационном производстве. Предложена научно обоснованная концепция устранения пористости, разработан количественный критерий технологической готовности соединяемых кромок, определены параметры термического цикла, обеспечивающие равнопрочность, и внедрены методы снижения остаточных напряжений.

Результаты работы апробированы, внедрены на серийном производстве и имеют потенциал для масштабирования в смежных секторах машиностроения. По совокупности научных и прикладных характеристик диссертация П.В. Бахматова соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 2.5.13 –

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов», а её автор, Бахматов Павел Вячеславович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой  
Материаловедения, литья и сварки,  
профессор, докт. техн. наук  
по специальности 05.16.04.  
«Литейное производство», профессор

 Шатульский  
Александр  
Анатольевич  
24.09.2025

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

152934, РФ, Ярославская область,

г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

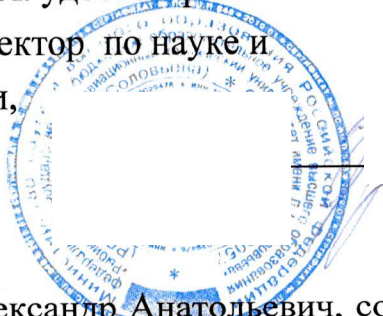
тел. 8(4855) 280470

факс. 8(4855) 213964

E-mail: [shatulsky@rsatu.ru](mailto:shatulsky@rsatu.ru)

Подпись Шатульского А.А. удостоверяю:

Первый проректор - проректор по науке и  
цифровой трансформации,  
канд. техн. наук, доцент



 Сутягин  
Александр  
Николаевич

Я, Шатульский Александр Анатольевич, согласен на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Бахматова Павла Вячеславовича и их дальнейшую обработку.