

На правах рукописи



Бахматов Павел Вячеславович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ,
ПОВЫШАЮЩИХ КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Работа выполнена на кафедре «Технологии сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Официальные оппоненты:

Люшинский Анатолий Владимирович,
доктор технических наук, заместитель главного технолога – начальник научно-исследовательской лаборатории сварочных технологий АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (АО РПКБ) г. Раменское

Овчинников Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва

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

Ведущая организация

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

Защита состоится «24» октября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.316.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, корпус 3, аудитория 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «КнАГУ», https://sovet.knastu.ru/diss_defense

Автореферат разослан « » июня 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.316.02, канд. физ.-мат. наук



Потяхин Дмитрий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Авиастроение – самая динамично развивающаяся отрасль, требующая от создаваемых конструкций летательных аппаратов (ЛА) малого веса, большого эксплуатационного ресурса, высокой размерной точности, способности выдерживать колоссальные нагрузки, обеспечения качества и надежности изделий, что связано с внедрением новых специфичных дорогостоящих труднообрабатываемых материалов и разработкой технологий изготовления деталей.

К таким материалам относятся титановые сплавы, уникальные свойства которых (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, удовлетворительная свариваемость, жаропрочность и др.) позволяют получать сварные тонколистовые конструкции со сложной пространственной формой для хвостовой части фюзеляжа (боковых панелей, балок крепления, окантовок, лючков и др.), несущей части топливного бака (панель центроплана), воздухозаборника (защитное устройство) и др.

Из-за низкой теплопроводности титановых сплавов технологические процессы изготовления сварных авиационных тонкостенных конструкций приводят к значительным остаточным напряжениям и короблению. При этом в металле сварного шва образуются поры (до 56% из общего числа дефектов), превышающие допустимые нормы, установленные в авиастроении. Особую опасность представляют поры, располагающиеся близко к поверхности, способные вызвать как образование трещин при изготовлении, так и усталостные разрушения при эксплуатации, приводящие к снижению жизненного цикла ЛА и даже к авиакатастрофам.

В авиастроении РФ все процедуры изготовления сварных титановых конструкций регламентированы производственной инструкцией ПИ 1.4.1898, разработанной ОАО НИАТ, определяющей виды и режимы технологических операций и норму дефектов, в том числе пор. В практике серийного производства сварных тонкостенных титановых конструкций наблюдаются следующие дефекты: поры, непровары, подрезы, коробление, изменение физических свойств, что свидетельствует о несовершенстве существующего технологического процесса их изготовления.

При изготовлении тонкостенных титановых конструкций аргонодуговой сваркой снижение пористости возможно при непосредственном наблюдении оператором за сварочной ванной и оперативным управлением термическим циклом сварки для увеличения выдержки жидкометаллической сварочной ванны. Это не позволяет полностью автоматизировать процесс сварки, исключить влияние человеческого фактора на качество сварных соединений, добиться равнопрочности сварного соединения по всей протяженности шва (на 8...12 % снижается прочность металла шва, а в некоторых случаях ниже допустимых значений). Использование флюсов для дегазации сварочной ванны экологически небезопасно. Исправление пористости металла шва (устранение дефекта и последующая ручная подварка) приводит к снижению механических свойств, к существенному увеличению цикла изготовления конструкции, трудозатрат (до 30%), расхода электроэнергии и материалов.

Например, анализ состояния проблемы изготовления тонкостенных титановых конструкций на филиале ПАО «ОАК» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» со стороны службы главного сварщика показывает:

- сварные соединения тонкостенных титановых конструкций, выполненных ААрДЭС (автоматическая аргонодуговая электросварка), по результатам рентгенографического контроля имеют как допустимые участки с порами (единичные, цепочки, скопления), так и недопустимыми без исправления;

- исправление дефекта включает вскрытие участка шва шарошками, аргонодуговую наплавку, рентгенографический контроль, что повышает трудоемкость изготовления ребристых панелей;

- условно можно считать, что на одном метре сварного соединения выявляется 20 сантиметров шва с порами, требующими исправления.

Анализ состояния проблемы со стороны службы главного технолога этого же авиапредприятия показывает:

- по причине порообразования дорабатывается каждое сварное соединение тонкостенных титановых конструкций, в некоторых местах неоднократно. Сложные случаи требуют согласования и принятия решения с ОКБ «Сухого», что увеличивает технологический цикл производства.

В этих условиях повышение эффективности технологических процессов изготовления тонкостенных титановых конструкций путем исключения пористости в металле шва с обеспечением размерной точности и равнопрочности конструкции, является актуальной научной и одной из важнейших задач в авиастроении.

Степень разработанности темы. Проблемой исключения дефектности, повышения точности изготовления, улучшения качества авиационных сварных тонкостенных титановых конструкций занимались многие исследователи и разработчики: В.В. Фролов, А.А. Ерохин, Б.Е. Патон, Ф.Е. Третьяков, А.И. Горшков, Г. Д. Никифоров, В.А. Казаков, В.И. Лукин, В.В. Редчиц, В.Н. Замков С.М. Гуревич, Г.Л. Петров, А.Н. Хатунцев, А.И. Хорев, В.В. Овчинников, С. Ralsley, D. Mitchell, M. Andrea, M. Nishinara, S. Jamamoto, а так же НИАТ, ВИАМ, центр LaRC of NASA Langley, ВИАМ-Пекин, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ Украины и другие.

В проблеме механизма порообразования в сварных соединениях титановых сплавов, выполненных сваркой плавлением, выделим теорию Г.Д. Никифорова, В.В. Редчица и В.А. Фролова, согласно которой в расплаве химически активных тугоплавких металлов гидрогрупп титана и ванадия отсутствуют газовые флуктуации критического размера, что снижает вероятность возникновения пузырьков, выделяющихся из раствора водорода в объеме ванны, т.е. необходимы готовые зародыши газовой фазы. Такими зародышами являются заваренные дефекты торцов кромок перед сварочной ванной, попадающие в расплавленную ванну и формирующие поры в металле шва. При этом исследования влияния качества поверхности стыкуемых кромок заготовок из титановых сплавов при различных видах их обработки для образования сварного шва ограничивались традиционными методами измерения шероховатости, без оценки изменения приповерхностного слоя, образования в нем микродефектов.

Для косвенной оценки геометрических размеров сварного шва и анализа деформаций сварных титановых панелей используют электронную широкую диафрагму в режиме реального времени (Л.М. Лабанов, В.А. Пивторак и др. ИЭС им. Е.О. Патона, Украина; Rastagi P.K. Амстердам, Голландия; Hung Y.Y., Ho H.P., Китай). При этом как при аргонодуговой сварке, так и при сварке погруженным вольфрамовым электродом по слою активирующего флюса, обнаружены участки резких изменений, при рентгеновском контроле которых выявились скопления пор.

Совершенствованием прогнозирования остаточного напряженно - деформированного состояния сварных соединений тонколистовых конструкций и их термической правкой занимаются ученые многих стран - F.Boilot (ESI Group, Франция), D. Camilleri и T.Gray (Universiti of Strathclyde, Glasgow, Великобритания), H. Murakawa (JWRI, Япония), P. Michaleris (Pennsylvania State University, США) и др. При этом наряду с традиционной термической правкой в вакууме Б.Е. Патон, Л.М. Лабановым и др.

(ИЭС им. Е.О. Патона, Украина) и Гуань Цяо (ИАТ г. Пекин, Китай) предложен метод исправления деформаций и коробления предварительным упругим деформированием и высокочастотной механической проковкой сварного шва. Указанные методы сложные, дорогостоящие, что требует изыскания других, более совершенных, методов.

Для снижения деформаций, повышения трещиностойкости и сохранения легкоиспаряющихся элементов В.М. Нестеренко, Л.А. Кравчуком и др. (ИЭС им. Е.О. Патона, Украина) предложено применять повышенную скорость сварки, при этом отсутствуют критерии подбора технологических режимов сварки.

Положительное влияние низкотемпературного отжига в воздушной среде на свойства сварных листовых конструкций титановых сплавов отмечается в работах Шахова С.В. (ПАО Воронежское акционерное самолетостроительное общество), Коломенского Б.А. (ГОУВПО «Воронежский ГТУ»), при этом наблюдается некоторое газонасыщение поверхности, особенно водородом, что связано с определением его без учета вида адсорбированных загрязнений, кроме того, отсутствуют исследования защитных свойств оксидно-нитридных пленок при повышенных температурах, а также методов удаления этих пленок с поверхности сварных титановых конструкций.

Таким образом, известные в настоящее время результаты исследования по повышению качества титановых сварных тонкостенных конструкций, не гарантируют полного исключения дефектов при их изготовлении. Например, методы увеличения времени существования расплавленной ванны при полном исключении пористости не гарантируют требуемых механических свойств и, кроме того, не позволяют управлять режимами термического цикла сварки (ТЦС), обеспечивающих требуемые условия фазовых превращений, позволяющих улучшить структуру и свойства тонкостенных титановых конструкций.

Цель работы: совершенствование технологического процесса изготовления авиационных сварных тонколистовых ребристых титановых конструкций.

Задачи исследования

1. Провести анализ дефектов при изготовлении сварных тонколистовых титановых конструкций в серийном производстве ЛА.
2. Расширить знания о механизме порообразования сварных швов тонколистовых титановых конструкций ЛА.
3. Предложить критерий оценки качества поверхности стыкуемых кромок заготовок при различных операциях обработки, способствующий исключению порообразования в металле шва при изготовлении тонколистовых титановых конструкций ЛА
4. Используя предложенный критерий оценки качества поверхности стыкуемых кромок заготовок, установить закономерности влияния доминирующих факторов технологических операций на порообразование в металле шва при изготовлении тонколистовых титановых конструкций ЛА.
5. Установить режимы аргонодуговой сварки тонкостенных титановых деталей, обеспечивающих снижение коробления конструкции.
6. Произвести производственные усталостные и вибрационные испытания на образцах - имитаторах титановой тонколистовой панели центроплана, полученных аргонодуговой сваркой.
7. Провести оценку экономической эффективности изготовления беспористых сварных тонколистовых ребристых титановых конструкций ЛА.

Методология и методы исследования. В основе комплекса исследования лежат физические эксперименты, при выполнении которых использованы методы: спектрального химического анализа, рентгеновской дифрактографии, рентгенографии,

электронного и оптического микроструктурного анализа, статических и динамических испытаний, теории сварочных процессов. Применена разработанная методология изучения образования диффузионно-замкнутых полостей перед фронтом расплавленной ванны как источника зародышей пор в металле шва.

Научная новизна

1. Установлено, что в процессе сварки перед фронтом расплавленной ванны возникают условия для диффузионного соединения торцов кромок (достаточная температура от действия сварочной дуги, а также давление от усадки формирующегося шва), с несплошностями (замкнутыми полостями), заполненными капиллярно-конденсированными загрязнениями, попадающими в сварочную ванну и приводящие к образованию пор в металле шва при изготовлении сварной конструкции.

2. Выявлена зависимость уровня дефектности сварных соединений от применяемых методов подготовки стыкуемых кромок титановых конструкций. Для оценки качества поверхности стыкуемых кромок предложен новый критерий - насыщенность поверхности капиллярно-конденсированными загрязнениями, определяемый по содержанию водорода. Обоснованы значения этого критерия, благоприятные для получения бездефектных сварных соединений. Это позволяет выбирать рациональные разделительно-подготовительные операции подготовки соединяемых кромок.

3. Установлена зависимость свойств сварных соединений от скорости охлаждения околошовной зоны с позиций обеспечения идентичности свойств неразъемных соединений свойствам основного металла конструкций.

4. Установлены температурно-временные параметры сохранения защитных свойств оксидной пленки при проведении высокоскоростной термообработки в атмосфере воздуха тонкостенных сварных титановых конструкций для снятия внутренних напряжений и снижения коробления.

Практическая значимость работы

1. Разработан технологический процесс позволяющий повысить качество сварных тонкостенных титановых конструкций летательных аппаратов.

2. Предложены технологические процессы подготовки кромок под сварку (газолазерный раскрой в среде азота и аргона, комбинации газолазерного раскроя с любым видом раскроя), обеспечивающие нулевой уровень дефектности при критерии насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями равным $N=1$,

3. Сформулированы рекомендации по граничным условиям режимов термического цикла сварки с обеспечением пределов скорости охлаждения в области превращения для толщин заготовок 1,2 мм; 2,0 мм; 2,5 мм соответственно 650...750, 550...600, 150...175 °C/с, обеспечивающих свойства неразъемных соединений титановых тонкостенных ребристых панелей идентичные свойствам основного металла.

4. Предложен технологический процесс отжига в воздушной среде с последующим опескоструиванием для снятия остаточных сварочных напряжений, особенно для крупногабаритных тонкостенных ребристых титановых панелей, позволяющий увеличить усталостную прочность в 2 раза.

5. Предложен технологический процесс холодной пластической деформации, и последующих либо горячей деформации, либо термообработки при температурах, близких к температуре аллотропического превращения, с обеспечением скоростного нагрева и охлаждения, связанным с процессами упорядочения в зонах структурных концентраторов напряжений.

6. Выявлены условия автоматизации сварочного процесса изготовления титановых конструкций, обеспечивающие увеличение степени технологичности сварных тонкостенных титановых конструкций при гарантированном исключении пористости в металле шва. На основе производственных испытаний показана возможность полной автоматизации изготовления сварных тонкостенных титановых ребристых панелей на автомате УСП-5000.

Достоверность результатов работы подтверждается тем, что комплекс экспериментальных исследований выполнен на основе современных, преимущественно стандартизованных и взаимодополняющих друг друга методов испытаний с использованием сертифицированных приборов и оборудования. При обработке результатов физических наблюдений использованы широко известные и апробированные на практике методики, применяемые при исследовании технологических операций изготовления ребристых титановых панелей.

Положения, выносимые на защиту:

- критерий оценки качества подготовки поверхности стыкуемых кромок заготовок - «насыщенность водородом», определяющий зависимость пористости в металле шва от условий образования капиллярно-конденсированных загрязнений на поверхности стыкуемых кромок (готовые зародыши пор, попадающие в жидкометаллическую ванну металла шва) при реализации технологических операций образования кромок заготовок, доступных в серийном производстве изготовления тонкостенных титановых конструкций ЛА,

- область режимов термического цикла сварки с обеспечением пределов скорости охлаждения в области превращения для толщин заготовок 1,2 мм; 2,0 мм; 2,5 мм соответственно 650...750, 550...600, 150...175 °C/с, обеспечивающих свойства сварных соединений тонкостенных титановых конструкций идентичные свойствам основного металла.

- методика прогнозирования уровня дефектности при выборе к применению технологических операций изготовления сварных тонкостенных титановых конструкций, включая механическую обработку (фрезерование и др.), плавление (газолазерный раскрой и др.), физико-химическую обработку (травление, электроэрозионный раскрой и др.);

- условия снятия остаточных напряжений сварных соединений тонкостенных титановых конструкций с улучшением механических свойств (статическая и усталостная прочность, пластичность) после холодной пластической деформации, и последующих операций либо горячей деформации, либо термообработки при температурах, близких к температуре аллотропического превращения, с обеспечением скоростного нагрева и охлаждения, связанным с процессами упорядочения в зонах структурных концентраторов напряжений;

- повышение технологичности изделий за счет автоматизированного управления режимом ТЦС в процессе изготовления тонкостенных титановых конструкций с улучшением свойств сварных соединений при гарантированном исключении пористости в металле шва.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в подготовке плана исследований, постановке цели и задач, положений, составляющих его новизну и практическую значимость, формулировки темы диссертационной работы, выборе экспериментальных и теоретических методов исследования, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов. В экспериментальной части диссертационной работы автор самостоятельно выполнил подготовку

экспериментальных образцов, провел исследование структуры и свойств сварных тонкостенных титановых конструкций и сопоставил их с литературными данными, организовал сбор, обработку информации и анализ полученных результатов. Автор произвел апробацию результатов исследования, подготовку докладов и публикаций по теме диссертации, обеспечил патентную защиту новых технологий контроля качества поверхности после разделительных операций. Вся обработка и интерпретация полученных результатов выполнена лично автором.

Апробация результатов работы. Результаты исследований доложены и обсуждены на научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: XVI Международной научно-практической конференции «International Conference on Aviation Engineering» («Современные авиационные технологии») (ИРНТУ, Иркутск, 2023), XXI Международной конференции «Авиация и космонавтика», (МАИ, Москва, 2022), Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2013, 2014), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы в технологии машиностроения» (Новосибирск, 2009), XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2017), Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008-2009), Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» (Москва, 2010), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2009), Международной научно-технической конференции ВИАМ (Москва, 2012), III Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (Москва, 2019), Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении» (Пенза, 2001), VIII Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» (Барнаул, 2011), Российской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения» (Комсомольск-на-Амуре, 2011), Международной научно-технической конференции «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения» (Комсомольск-на-Амуре, 2015), Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2018), Школе-семинаре по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий «Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения» (Комсомольск-на-Амуре, 2013), Международном российско-китайском симпозиуме «Современные материалы и технологии 2011» (Хабаровск, 2011), V Международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013)» (Курск, 2013), Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» (Владивосток, 2014), Международной конференции «Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies» (2021),

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 42 работах, включающих 13 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, 2 коллективные монографии, 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 257 страницах основного текста, содержит 28 таблиц, 100 рисунков и 6 приложений.

Работа выполнялась в соответствии с научным направлением ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» «Теоретические и технологические исследования управления структурными изменениями в металлах, сталях и сплавах в процессе технологического цикла изготовления высоконадежных конструкций» и планом совместных работ о взаимном сотрудничестве от 03.03.2007 № 101 между ОАО «КнААПО» и ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» «Обеспечение надежности сварных конструкций из титановых сплавов». НИР «Разработка термических и деформационных технологий создания и обработки гетерогенных материалов на основе динамики структурных превращений и компьютерного моделирования» в рамках гранта по программе «Стратегическое развитие ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» на 2012-2016 гг.», 2011-ПР054, приказ № 2280 от 27.07.2012. НИР «Исследование процессов формирования диффузионных соединений из конструкционных материалов, обеспечивающих эксплуатационную надежность конструкций» в рамках гранта РФФИ на 2014-2016 гг. Государственный регистрационный номер ЦИТиС:01201453032.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, представлены цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов работы, методологиях и методах исследования, используемых для решения поставленных задач.

В первой главе приведен анализ современного состояния технологических процессов производственного изготовления сварных титановых ребристых панелей ЛА.

Обоснован выбор титановых сплавов в качестве конструкционного материала для изготовления ребристых панелей летательных аппаратов. Показано, что титан и титановые сплавы, несмотря на важные преимущества перед другими конструкционными материалами, обладают целым рядом специфических технологических свойств по сравнению с технологическими свойствами сталей и сплавов, что значительно повышает затраты на производство деталей и требует совершенствования технологии их изготовления для снижения общей стоимости ЛА. Подавляющее преимущество сварных конструкций перед литыми, штампованными, клепанными и, особенно, перед изготовленными механической обработкой ограничивается целым рядом как металлургических, так и технологических недостатков сварных соединений титана и его сплавов.

Снижение эксплуатационных характеристик титановых конструкций из-за образования химической и физической неоднородности зоны сопряжения вызвано высокой химической активностью, требующей вакуумных технологий и защитных газов; повышенной трудоемкостью механической обработки, приводящей к неоднородности поверхности стыкуемых кромок раскройными операциями; газонасыщением и образованием пор в металле шва, снижающих механические свойства и живучесть деталей; остаточными сварочными напряжениями, способствующими короблению деталей и образованию холодных трещин.

Несовершенство подхода к проблеме порообразования в сварных швах титановых конструкций отражается в отраслевой нормативной документации (ПИ 1.4.1898) регламентирующей разработку технологических процессов сварки в серийном производстве летательных аппаратов, не исключая образование дефектов. Поэтому решение проблемы порообразования требует новой концепции и доработки нормативной документации.

Во второй главе исследовано влияния разделительных операций и параметров технологических процессов образования сварных швов ребристых панелей на качество сварных соединений. Описан предлагаемый критерий оценки качества поверхности кромок соединяемых заготовок и присадочной проволоки.

Анализ механических свойств и дефектов сварных титановых конструкций, выявленных в производственных условиях филиала ПАО «ОАК» «КнААЗ» показал, что прочность сварных ребристых панелей на 8...12% меньше прочности основного металла. Рентгенографический анализ 57242 мест сварных соединений деталей выявил 1250 дефектов (2,2 %).

Установлено, что чем сложнее конструкция, тем больше внутренних дефектов, независимо от типа соединения (стыковое или тавровое). Из внутренних дефектов наибольшее количество составляют поры – 43 %, вольфрамовые включения – 9 %, несплавления – 12 %, трещины – 6 %. Диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Встречаются цепочки пор, образующие почти сплошную линию. Размер несплавлений 0,8...10 мм. Отдельные дефекты имеют размер от 38 до 80 мм. Несплавления, как правило, располагаются в конце сварных швов. Диаметр вольфрамовых включений 1,1...4,5 мм. Глубина трещин 1,5...1,7 мм. Холодные трещины возникают в основном в тавровых соединениях в зоне окончания сварного шва и составляют 2...4 % от общего числа дефектов. Длина трещины колеблется от 0,5 до 10 мм. Этому способствуют сварочные напряжения, возникающие из-за локального нагрева и неравномерного распределения температуры металла при сварке. Дефекты, по причине человеческого фактора составляют 57%, не зависящие от оператора (поры) – 43%.

Наиболее трудоемкими операциями изготовления ребристой панели являются: механическая обработка (фрезерование 39%, зачистка металлическими щетками 15%, шабрение и др.) и полуавтоматическая АрДЭС 5%. Следует отметить, что сварочные процессы проводятся на автоматическом оборудовании, но при постоянном наблюдении оператора за сварочной ванной и ручном управлении режимами сварки. Операции исправления дефектов, несмотря на малую трудоемкость (1% от общей трудоемкости сборочных операций), приводят к существенному увеличению цикла изготовления тонкостенных титановых деталей ЛА.

Как показывает анализ существующих технологических процессов, образование дефектов сварных швов ребристых панелей связано с неэффективностью оценки качества поверхности кромок заготовок и присадочной проволоки по стандартным параметрам шероховатости (табл. 1). Так, резкое изменение поверхностного содержания водорода после выдержки холодных образцов при комнатной температуре свидетельствует об испарении с поверхности поверхностно-адсорбированной влаги. Исходя из гипотезы Редчица В.В. и Никифорова Г.Д., заключающейся в том, что важнейшую роль зарождения пузырьков при порообразовании в процессе сварки титановых сплавов играет влага, находящаяся в объеме дефектов торцевой поверхности, можно предположить возможность контроля качества поверхности количеством адсорбированной влаги.

Влага в зоне плазмы электрической дуги, по расчетам И.И. Фрумина, диссоциирует по следующей реакции: $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$, т.е. атмосфера плазмы обогащается кислородом и водородом, что позволяет количественно определить последний спектральным методом в соответствии с ОСТ I90034-81.

Установлено, что спектральный анализ содержания водорода на поверхности заготовок титановых сплавов позволяет оценить количество и вид адсорбированной влаги (поверхностно-конденсированная влага (ПКВ), или капиллярно-конденсированная

влага (ККВ)), поэтому он предложен в качестве методики оценки загрязнений поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки непосредственно перед сваркой (Патент РФ 2491159).

Таблица 1 - Изменение содержания водорода в поверхностном слое образцов из сплава ВТ20 в зависимости от методов раскроя и последующей обработки

№п/п	Вид формирования	Дефектность поверхности			Содержание Н ₂ (%) в сплаве ВТ20			
		Глубина разрыхленного слоя Нм, мкм	Глубина дефектного слоя h, мм	Шероховатость Ra, мкм	После внесения из холода в тепло	С поверхности после 2 ч. после внесения из холода	С поверхности после обезжиривания в спирте	Содержание водорода в основном металле
1	Грубое фрезерование	8,0	0,8	6,3	> 0,05	0,021	0,0065	0,0015
2	Травление	0,03	0	0,4		0,020	0,011	0,0015
3	Электроэрозионная обработка	0,025	0,01-0,06	0,1		0,038	0,0275	0,0015
4	Оплавление электронным лучом	0	0	1,25		0,009	0,0016	0,0015
5	Оплавление лазерным лучом	0	0	2,5		0,008	0,0016	0,0015

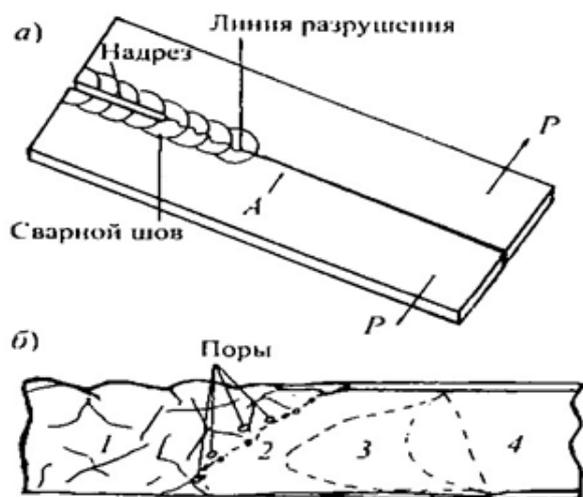


Рис. 1 - Схема методики изучения твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны (а) и расположения зон сварного соединения (б) (продольное сечение образца по шву в участке А):

1 – зона расплава; 2 – зона диффузионной сварки; 3 – зона контактирования; 4 – исходная поверхность заготовки

кромок перед фронтом расплавленной ванны, а именно:

- Высококонцентрированный источник электродугового разряда в доли секунды приводит к разогреву кромок до температуры, намного превышающей плавление

Поскольку удаление ККВ с дефектной поверхности представляет определенные сложности, с достаточной степенью точности можно утверждать, что разница в значениях содержания водорода в основном металле и в поверхностном слое объясняется наличием ККВ в дефектном слое (см. табл. 1), причем, чем дефектность слоя выше, тем больше в нем содержания водорода.

Учитывая вышеизложенное, разработана специальная методика изучения твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны и проведены исследования особенностей металлургического процесса образования пор в сварочной ванне и пористости в процессе кристаллизации при сварке образцов встык из титанового сплава ВТ20 (рис. 1). Выявлен сложный многоступенчатый характер взаимодействия соединяемых

металла. При этом совершается мгновенное тепловое расширение газов и металла, вызывающее перед фронтом расплавленной ванны поперечные сжимающие напряжения, превышающие предел текучести металла. Происходит термически активируемый процесс микропластической деформации металла, интенсифицирующий образование физического контакта, и выброс из зоны взаимодействия расширяющихся газов, в том числе поверхностно конденсированной влаги (зона автономной очистки), продуктов диссоциации оксидно-нитридных пленок и загрязнений (рис. 2, а), т.е. наблюдается процесс самоочистки стыкуемых поверхностей.

- В дальнейшем развивается объемное взаимодействие как в плоскости контакта (образование прочных химических связей), так и в объеме зоны контакта. Несомненно, рельеф поверхности, особенно высота выступов, будет влиять на формирование твердофазного соединения, т.е. на наличие возможного числа активных центров или их площади и, в конечном счете, на формирование замкнутых полостей, заполненных ККВ.

- Замкнутые полости, заполненные ККВ, попадают в расплавленный металл, где происходит мгновенное испарение влаги и расширение газов, что вызывает формирование газовых пузырьков - пор (рис. 2 б, в), удаление которых зависит от их количества, размеров, времени всплытия и удаления из расплава, т.е. времени существования расплавленной ванны или пузырьковой дегазации ванны.

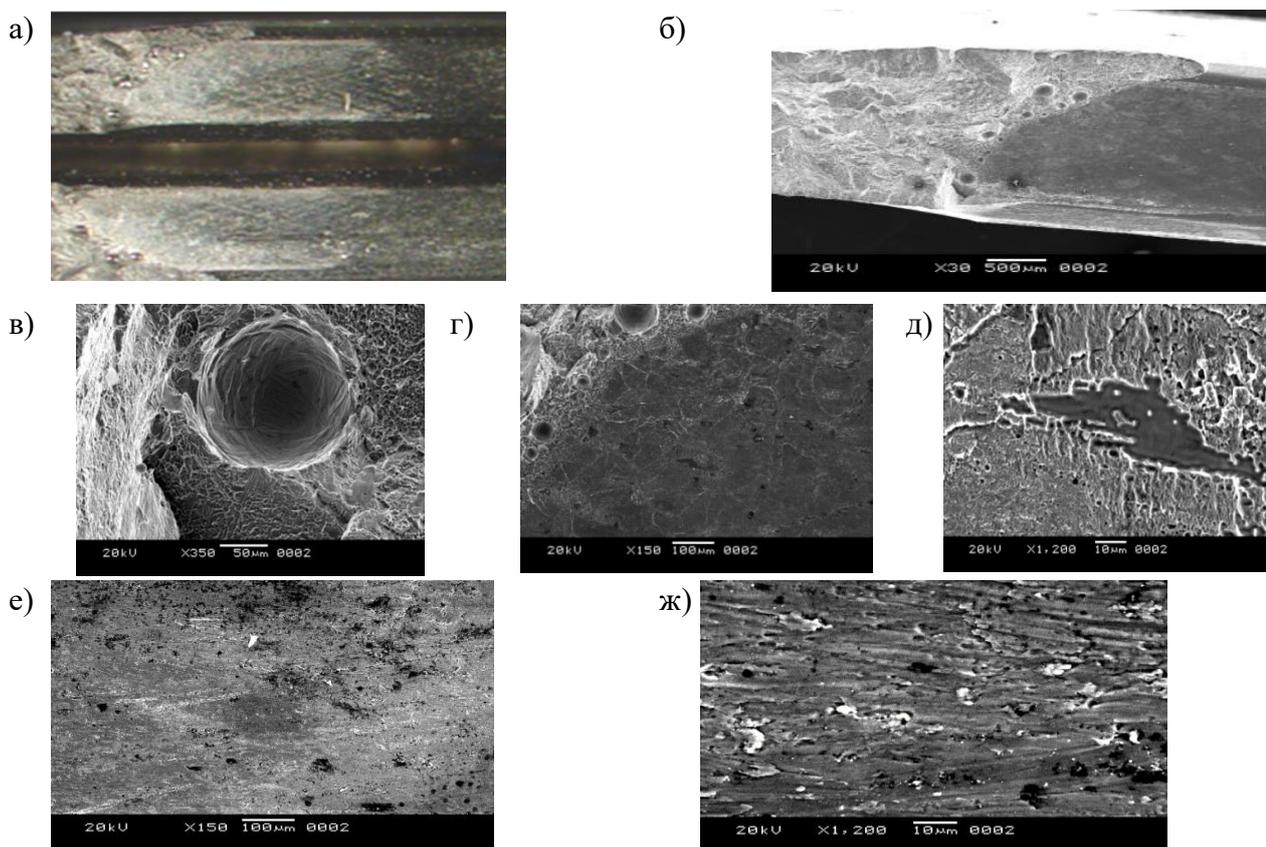


Рис. 2- Фрактограммы поверхности вскрытого излома перед фронтом расплавленной ванны сварного образца из сплава ВТ20 после раскроя фрезерованием, обезвоживания спиртом, ААрДЭС: а – общий вид, б, в – зона образования пор при переходе твердофазного соединения в расплав; г, д – образование замкнутых полостей, зона твердофазного соединения; е, ж – исходная фрезерованная поверхность

Таким образом, наиболее приемлемым критерием оценки порообразования в металле шва титановых сплавов является насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки ККВ, а ее оценку целесообразно вести по условной величине N отношения содержания водорода в поверхностном слое после

обезжиривания и обезвоживания $H_{2нов}$ к содержанию водорода в основном металле, соответствующему требованиям стандарта на данный вид полуфабриката $H_{2м}$: $N = H_{2пов} / H_{2м}$. Величина N указывает, во сколько раз содержание водорода из капиллярно конденсированных загрязнений превышает или находится на уровне содержания водорода в основном металле.

Применение разработанной методики изучения твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны и критерия оценки вероятности порообразования в металле шва титановых сплавов - насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки ККВ в исследовательских и производственных целях позволяет ускорить процесс прогнозирования и визуализации порообразования.

В третьей главе приведены исследования влияния технологических процессов образования поверхности соединяемых кромок на капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва тонкостенных титановых конструкций.

Исследования проводились на заготовках из среднепрочного титанового сплава ВТ20. Заготовки раскраивались различными методами. Автоматическую аргонодуговую сварку листовых заготовок размерами 600×100×2 мм выполняли на спецстапеле (УСП-2,6) автоматом АДСВ-6 с применением в качестве защиты аргона высшей очистки.

Формирование кромок заготовок разрушением (все виды механической обработки) приводят к нарушению целостности волокон металла, разрыхлению поверхностного слоя, созданию хаотичной, неоднородной микрогеометрии без изменения химического состава и газонасыщения, с максимальной глубиной дефектного слоя при раскрое на гильотинных ножницах и минимальном изменении поверхностного слоя при пластической деформации (рис. 3, табл. 2, 3).

Таблица 2 - Химический состав поверхности свариваемых образцов после различных видов раскроя

Вид раскроя	Легирующие элементы, %				Газовые примеси, %		
	Al	Mo	V	Zr	H ₂	O ₂	N ₂
Гильотинные ножницы	6,6	0,78	1,08	1,72	0,0072	0,086	0,019
Чистовое фрезерование	6,4	0,79	1,1	1,7	0,0083	0,083	0,017
Электроэрозионная обработка	<u>6,8</u>	<u>0,77</u>	<u>1,07</u>	<u>1,70</u>	<u>0,01</u>	<u>0,16</u>	<u>0,017</u>
	6,3	0,73	1,1	1,71	0,0079	0,082	0,018
Газокислородная резка	<u>1,30</u>	<u>1,89</u>	<u>2,46</u>	<u>3,23</u>	<u>0,02</u>	<u>3,80</u>	<u>1,50</u>
	6,20	1,63	2,34	2,18	0,01	0,16	0,02
Плазменная резка	<u>7,00</u>	<u>1,42</u>	<u>1,80</u>	<u>2,40</u>	<u>0,022</u>	<u>0,12</u>	<u>0,28</u>
	6,40	1,68	2,33	2,19	0,0046	0,073	0,036
ГЛР в азоте	<u>7,1-5,6</u>	<u>0,58-0,71</u>	<u>0,96-1,1</u>	<u>1,55-1,9</u>	<u>0,0053</u>	<u>0,073</u>	<u>0,013</u>
	6,6	0,74	1,08	1,72	0,0073	0,088	0,016
ГЛР в аргоне	<u>6,8-6,0</u>	<u>0,63-0,75</u>	<u>0,98-1,08</u>	<u>1,87-1,64</u>	<u>0,0067</u>	<u>0,075</u>	<u>0,013</u>
	6,5	0,76	1,71	1,71	0,0089	0,075	0,010
Гидроабразивная резка	<u>5,23</u>	<u>2,03</u>	<u>2,68</u>	<u>2,30</u>	<u>> 0,015</u>	<u>0,23</u>	<u>0,08</u>
	6,54	1,60	2,39	2,21	0,0032	0,05	0,027
Основной металл	6,32	1,65	2,30	2,21	0,0047	0,079	0,031

Примечание: В числителе указаны значения с поверхности образцов, в знаменателе - после удаления измененного слоя

Как видно из данных табл. 3, параметр шероховатости (Ra , Rz) не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела, необходимо учитывать глубину разрыхленного слоя с образованием в нем макро-, микро- и субмикротрещин и глубину растравливания, особенно по границам зерен. Исследованиями установлено (рис. 3), что максимальный уровень дефектности металла шва сплава ВТ20 при механообработке вызывает процессы опескоструивания (1), резки на гильотинных ножницах (2) и зачистки металлической щёткой (3). Отсутствует порообразование в

металле шва при сварке заготовок после подготовки поверхности полированием (6) или пластическим деформированием (7).

Уровень дефектности оценивался по формуле: $q_{\text{деф}} = L_{\text{деф}}/L_{\text{общ}} \cdot 100\%$,

где $L_{\text{деф}}$ – сумма диаметров пор на длине металла шва 100 мм;

$L_{\text{общ}}$ – длина металла шва 100 мм.

Изменение химического состава (см. табл. 2, 3 и рис. 4) поверхности свариваемых образцов после травления практически мало изменяется, но при этом наблюдается максимальное газонасыщение (H_2 , O_2 , N_2), шероховатость в пределах $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм для проволоки глубина риска $h = 0,07$ мм. Электроэрозионная размерная обработка основана на удалении материала заготовки электрическими импульсными разрядами, возникающими при пробое диэлектрических или слабопроводящих сред. Выделяющаяся при этом тепловая энергия производит локальное плавление и испарение материалов электродов. Параметр шероховатости при максимальной производительности: $Ra \approx 2,5$ мкм (в воде), $Ra \approx 1,25$ мкм (в масле); минимальная величина дефектного слоя: 3...10 мкм (в воде), 1...2 мкм (в масле). При этом наблюдается максимум насыщенности поверхности капиллярно-конденсированными загрязнениями (табл. 3).

Таблица 3 - Насыщенность поверхности загрязнениями, шероховатость и глубина разрыхленного слоя поверхности образцов после различных видов обработки ($H_{2\text{нов}}/H_{2\text{м}}=N$ после обезвоживания в спирте)

Номер	Группы видов обработки	Вид обработки	Глубина разрыхленного слоя Нм, мкм	Шероховатость Ra, мкм	Глубина дефектного слоя h, мм	$H_{2\text{н}}/H_{2\text{м}}$	
						*	**
1	Разрушение	Полирование	0,15	0,1	0,01	2,2	1,0
2		Чистовое шлифование	1,0	0,8	0,03	2,3	1,03
3		Шабрение	3,0	1,25	0,3	3,0	1,2
4		Чистовое фрезерование	6,0	3,2	0,5	4,6	1,8
5		Грубое фрезерование	8,0	6,3	0,8	5,7	2,6
6		Рубка на ножницах гильотинного типа	15	320 (Rz)	1...3	7,1	3,2
7		Ультразвуковая пластическая деформация	0	<0,05	0	1,9	1,0
8	Травление	Травление	0,03	0,4	0	6,1	1,5
9		Электроэрозионная обработка	0,025	0,1	0,01...0,06	8,0	5,4
10	Плавление	Электронно-лучевое оплавление	0	1,25	0	1,7	1,0
11		Газолазерная резка в азоте	0	3,2	0,5	1,5	1,0
12		Газолазерная резка в аргоне	0	2,5	0,3	1,9	1,0
13		Гидроабразивная резка	0	3,8	0,1	3,3	1,7
14		Плазменная резка в азоте	0	6,3	0,5	6,5	3,0
15	Газопламенная резка	0	>320 (Rz)	3-5	11,8	5,1	

Примечания. Значения $H_{2\text{н}}/H_{2\text{м}}$ в колонках показывают превышение содержания водорода в поверхностном слое над содержанием водорода в металле: * после длительной (месяц) выдержки в атмосферных условиях; ** после длительной (месяц) выдержки в атмосферных условиях и обезвоживания спиртом

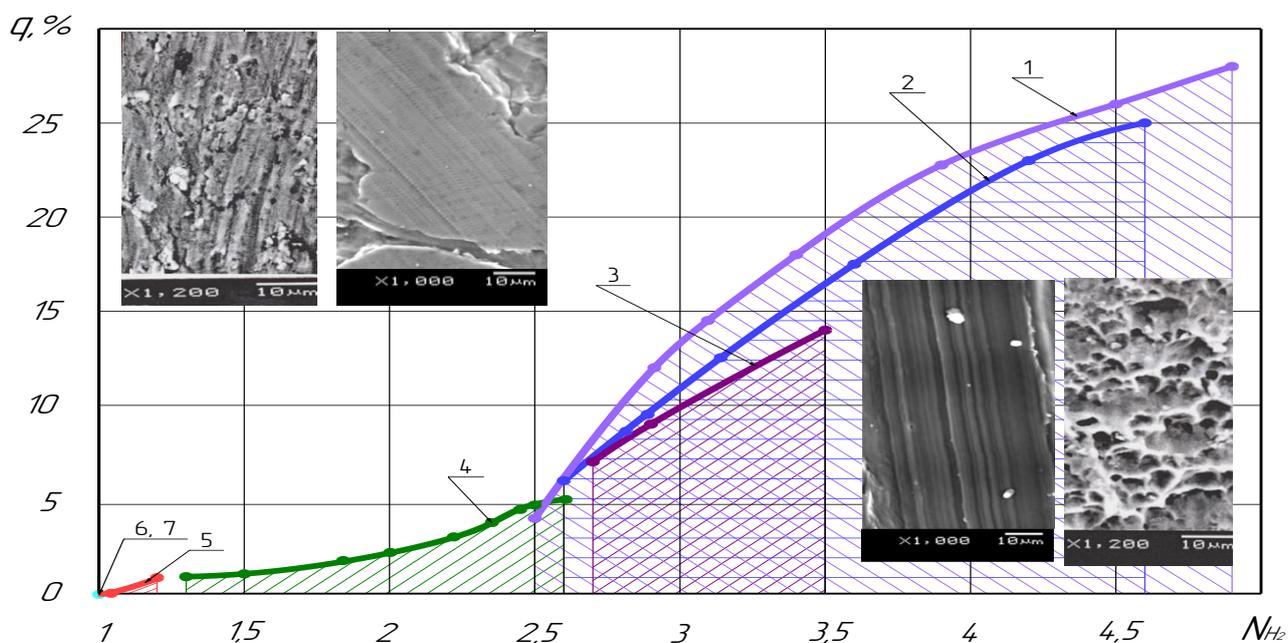


Рис. 3 - Изменение уровня дефектности металла шва сплава ВТ20 в зависимости от насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности свариваемых заготовок, вызванных различными методами механообработки:

1- опескоструиванием; 2 – резкой на гильотинных ножницах; 3- зачисткой металлической щеткой;
4 – фрезерованием; 5 – шабрением, шлифованием; 6 – полированием;
7 – ультразвуковой пластической деформацией

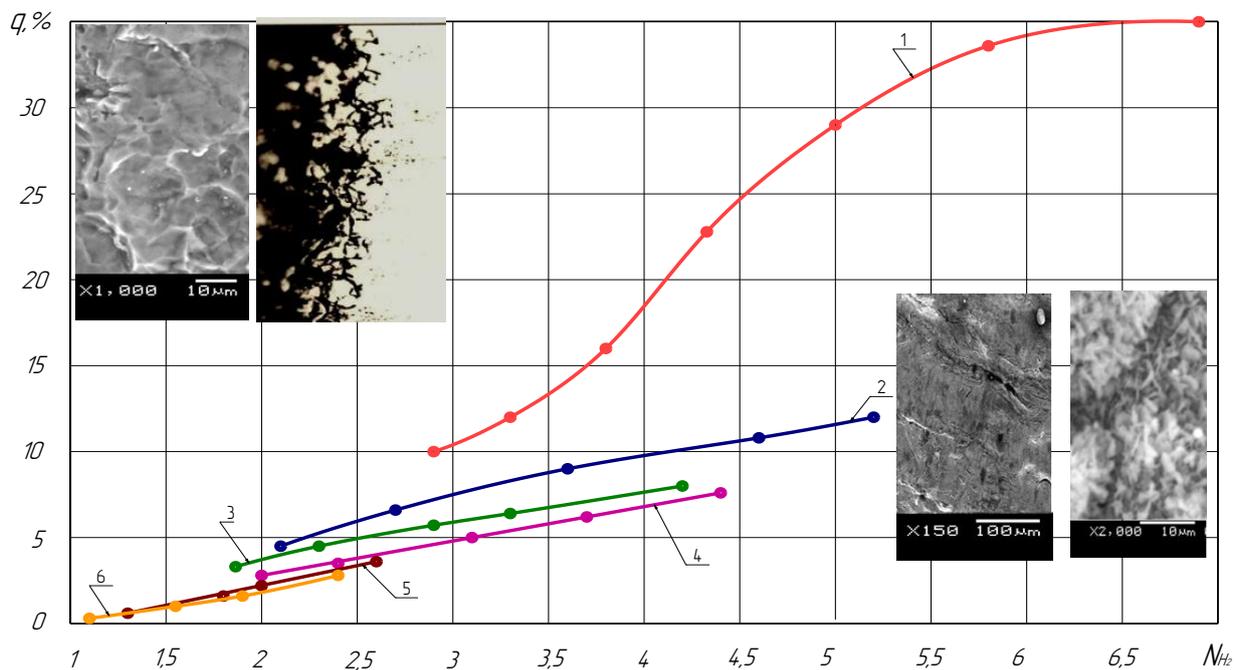


Рис. 4. -Изменение уровня дефектности металла шва сплава ВТ20 в зависимости от насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности свариваемых заготовок и присадочной проволоки, вызванных различными методами обработки травлением: 1 – электроэрозионный раскрой; 2-6 –химическое травление.

Дефектной присадочной проволокой с микротрещинами: 2 – при сварке проплавлением; 3 – при стыковой сварке;

Присадочной проволокой без микротрещин: 4 – при сварке по цельной пластине; 5 – при сварке проплавлением; 6 – при стыковой сварке

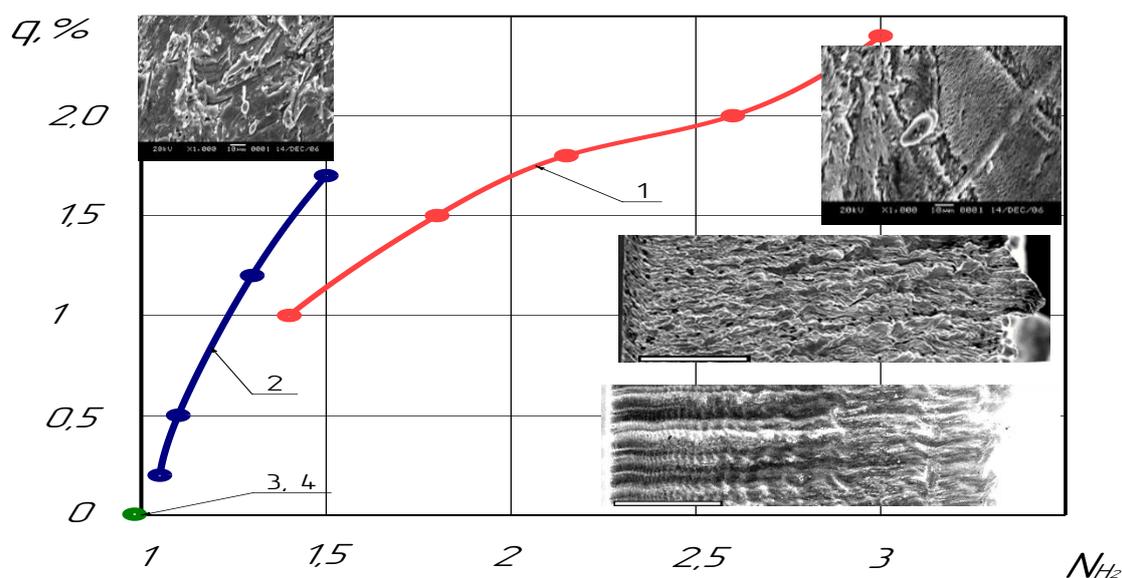


Рис. 5 - Изменение уровня дефектности металла шва сплава ВТ20 в зависимости от насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности свариваемых заготовок, вызванных различными методами обработки плавлением: 1 – плазменный раскрой; 2 – гидроабразивный раскрой; 3 - газолазерный раскрой в среде азота; 4 – газолазерный раскрой в среде аргона

Особенностью формирования рельефа поверхности заготовок технологическими операциями химической, электрохимической, электроэрозионной обработкой является избирательность процессов травления и испарения (рис. 4).

Из методов формирования кромок заготовок плавлением максимальную глубину измененного поверхностного слоя не только по шероховатости, но и по химическому составу и структуре вызывает газокислородная резка 3...5 мм (особенно на выходе факела). Минимальные изменения наблюдаются при ГЛР заготовок в среде азота и аргона (допустимые требованиям ТУ) и гидроабразивной резке (не допустимые требованиям ТУ по содержанию кислорода и азота в поверхностном слое).

Разделительные операции, основанные на использовании высококонцентрированных источников энергии: газолазерный раскрой в азоте и в аргоне, приводят к оплавлению поверхности кромок, не способствуют конденсации капиллярно-конденсированных загрязнений и приводят к нулевому уровню дефектности (рис. 5, (3,4)).

Минимум уровня дефектности наблюдается в металле шва, образованного сваркой, после гидроабразивной резки (рис. 5 (2)). Повышенный уровень дефектности у конструкций, собранных сваркой, после плазменной резки (рис. 5 (1)) из-за насыщенности поверхности капиллярно-конденсированными загрязнениями.

Максимальной активационной способностью к ККВ обладает поверхность образцов, образованная разрушением – рубкой на гильотинных ножницах (см. табл. 3 поз. 6); травлением – электроэрозионной обработкой (см. табл. 3 поз. 9); плавлением – газопламенной резкой (см. табл. 3 поз. 15).

Исследованиями установлено, что уровень дефектности металла шва определяется не величиной шероховатости, а насыщенностью поверхности свариваемых заготовок капиллярно-конденсированными загрязнениями.

Из данных табл. 3 и рис. 3-5 следует, что параметр шероховатости не может характеризовать уровень дефектности металла шва при сварке титановых сплавов. Так, полирование и электроэрозионная обработка (ЭЭО) заготовок обеспечивают

шероховатость образованной поверхности раздела $Ra = 0,1$ мкм, а уровень дефектности и насыщенность загрязнениями составляют $q_n = 0$, $N = 1$ в первом случае и $q_n = 10 \dots 40\%$, $N = 2,8 \dots 6,9$ во втором. Фрезерование и газолазерная резка в азоте заготовок обеспечивают $Ra = 3,2$ мкм и уровень дефектности в первом случае составляет $q_{\phi} = 0,9 \dots 5\%$, $N = 1,2 \dots 2,6$, во втором случае - $q_{\phi} = 0\%$, $N = 1$.

При рассмотрении вопроса попадания ККВ с поверхности присадочной проволоки в сварочную ванну выполнен расчет распределения температур в проволоке в момент ее подачи в сварочную ванну с использованием выражения, приведённого в работе В.Н. Замкова, С.М. Гуревича. Установлено, что при скорости подачи проволоки $0,0093$ м/с для стыковой сварки и $0,0073$ м/с при сварке сквозным проплавлением наиболее удаленная часть проволоки, прогреваемая до 350 °С, находится соответственно на расстоянии $2,6$ и $2,8$ мм, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Как уже отмечалось в ходе удаления с поверхности металлов и ПКВ, и ККВ температурно-временные условия различаются на несколько порядков. Поэтому времени $0,3$ с недостаточно для удаления ККВ с поверхности присадочной проволоки, что приводит к попаданию этой влаги в виде готовых зародышей из капилляров, насыщенных влагой, в расплавленную ванну и образованию пор (табл. 4).

Таблица 4 - Количество пор на 100 мм шва в зависимости от допустимой шероховатости присадочной проволоки двух бухт, различающихся дефектностью

Вид соединения	Проволока с шероховатостью $Ra=1,6$ мкм (без дефектов)		Проволока с шероховатостью $Ra=3,2$ мкм (дефектная)	
	Количество пор диаметром $\geq 0,5$ мм	Общее количество пор	Количество пор диаметром $\geq 0,5$ мм	Общее количество пор
Встык	0	8	15	24
Тавровое	0	2	37	72
По цельной пластине	0	3	7	24

Комплексный анализ уровня дефектности металла шва и насыщенности поверхности капиллярно-конденсированными загрязнениями позволяет определять эффективность использования разделительно-подготовительных технологических операций, оказывающих влияние на формирование поверхности заготовок и сварочной проволоки под сварку титановых сплавов. В результате анализа выявлены технологические процессы (пластическая деформация обкаткой фрезерованной поверхности, газолазерный раскрой в среде азота и аргона, комбинации газолазерного раскроя с любым видом раскроя), обеспечивающие нулевой уровень дефектности при минимальной насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями. Недопустимый уровень дефектности при высокой насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями оказывают процессы опескоструивания и зачистки металлическими щетками.

Достижение нулевого уровня дефектности по порообразованию делает возможным обеспечение идентичности механических свойств сварных титановых конструкций основному металлу управлением термическим циклом сварки.

В четвертой главе приведены исследования влияния термического цикла сварки тонколистовых титановых конструкций на возможность образования сварного шва с заданными свойствами и автоматизации процедуры сварки.

Величина погонной энергии, вводимой в сварочную ванну электрической дугой и время существования сварочной ванны (скорость сварки) во многом определяют

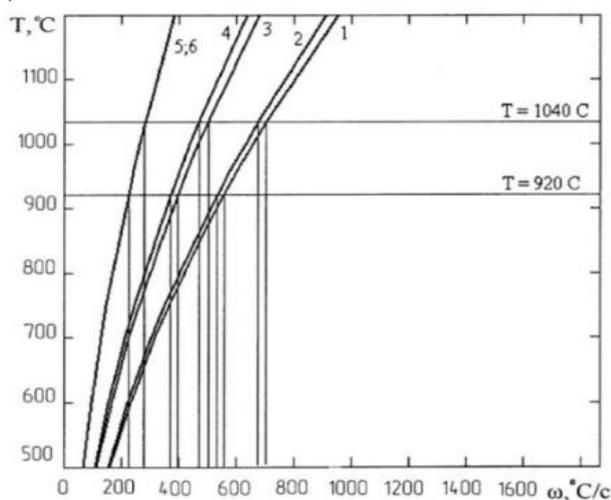
скорость охлаждения расплавленного металла, его структуру и свойства. Чем больше значение погонной энергии и меньше времени импульса, тем выше скорость охлаждения в интервале фазовых превращений, а соответственно выше значение временного сопротивления разрыву и угла загиба, меньше величина изменения содержания легирующих элементов. Такой термический цикл характерен импульсной сварке или сварке пульсирующей дугой.

Мягкий режим термического цикла сварки приводит к формированию микроструктуры металла более грубой игольчатой структуры α -фазы и наиболее широких образований α' -пластин внутри зерна по сравнению с формированием микроструктуры по жесткому режиму термического цикла сварки.

Аналитической оценкой свойств соединений, полученных сваркой по традиционным режимам по сравнению с основным металлом, установлено, что на различие в свойствах существенное влияние оказывают режимы сварки и практически не зависит от химического состава исходного металла. Для сварных соединений из листов толщиной 1,2 и 2,0 мм наблюдается сходимость свойств с основным металлом, а для образцов из листов толщиной 2,5 мм предел прочности снижается по сравнению с основным металлом, причем со значениями, близкими к нижней границе допуска (см. рис. 7).

Теоретические расчеты традиционных режимов термического цикла сварки (длина расплавленной ванны L , время t_6 пребывания металла в расплавленном состоянии, мгновенная скорость охлаждения ω_0 в точке околошовной зоны) показали, что некоторые из них не обеспечивают оптимальных скоростей охлаждения в области $\beta \rightarrow \alpha$ - превращения при сопоставлении с данными М.Х. Шоршорова: либо меньше 113...198 °C/c, либо больше 552...1419 °C/c (рис. 6).

а)



б)

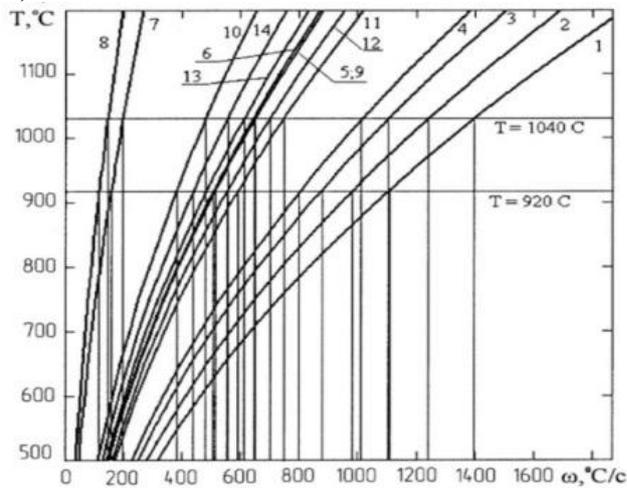
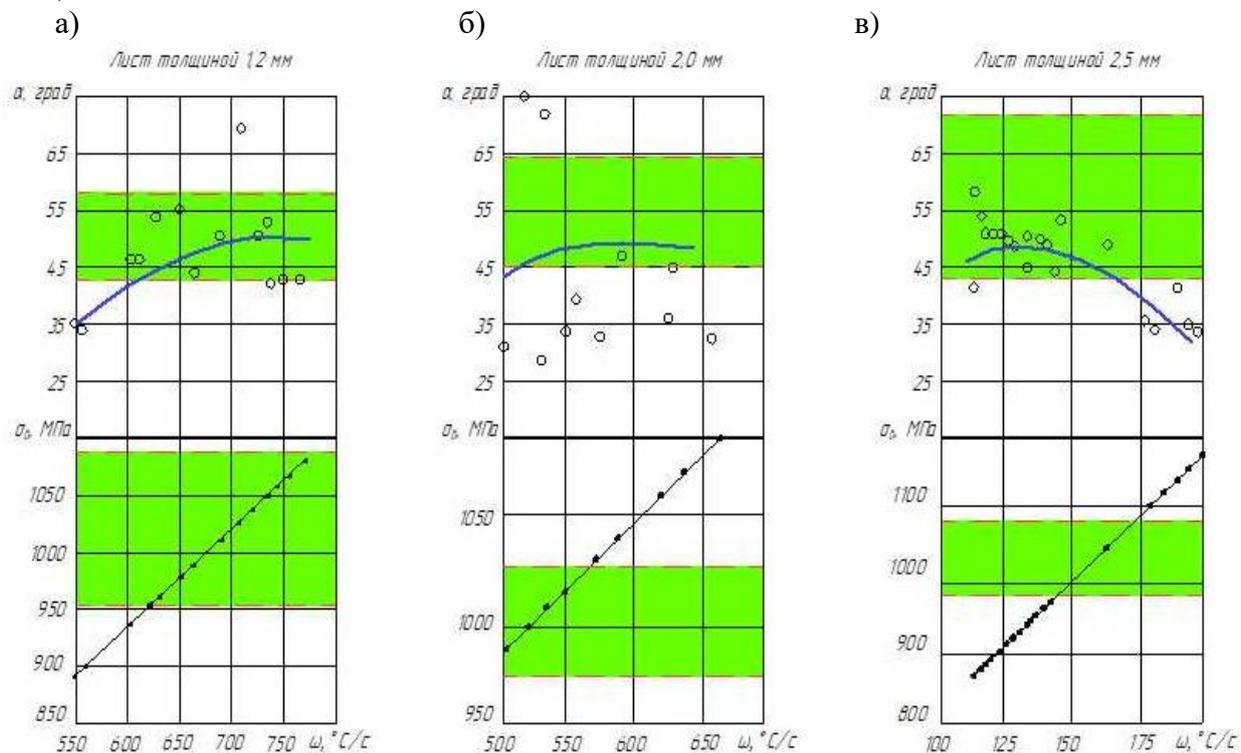


Рис. 6- Изменение скорости охлаждения в зависимости от режимов сварки при температуре полиморфного превращения ($\alpha \rightarrow \beta$) в околошовной зоне сплава ВТ20 (расчетные данные):
 а - сварка пульсирующей дугой; б - сварка непрерывной дугой; 1, 2, 11, 12 - 1,2 мм; 3, 4, 13, 14 - 1,5 мм; 5, 6 - 2,0 мм; 7, 8 - 2,5 мм; 9, 10 - 3,0 мм; 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 - сварка на жестких режимах; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14 - сварка на мягких режимах

Исходя из условия, что при сварке плавлением псевдо- α титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения происходит непрерывное увеличение прочности, построены зависимости изменения угла загиба и временного сопротивления разрыву от мгновенной скорости охлаждения, позволяющие оценить закономерности между скоростью охлаждения и механическими

свойствами традиционных режимов термического цикла сварки, исходя из которой можно оптимизировать режимы ТЦС, получать сварные конструкции из титановых сплавов с механическими свойствами, не отличающимися от свойств основного металла (рис. 7).



— - среднее значение, полученное методом наименьших квадратов

■ - область допустимых значений по нормативной документации для основного металла

Рис. 7 - Изменение угла загиба и предела прочности сварного шва (данные технологического контроля за трехлетний период) сплава VT20 в зависимости от скорости охлаждения:; а - для листов толщиной 1,2 мм; б - для листов толщиной 2,0 мм; в - для листов толщиной 2,5 мм

Исследования сварки образцов конкретной плавки из сплава VT20 с температурой фазового превращения $T_{fn} = 960$ °C показали, что режимы термического цикла сварки оказывают существенное влияние на временное сопротивление разрыву при статических испытаниях, что связано не только с увеличением размеров металла шва и околошовной зоны, но и с изменением химического состава по основным легирующим элементам. Чем меньше скорость охлаждения, тем больше изменение содержания легирующих элементов, тем выше значение угла загиба и меньше временное сопротивление разрыву. Такая закономерность связана, во-первых, с увеличением существования сварочной ванны для удаления пор из расплавленной ванны и, во-вторых, с увеличенным количеством доли присадочной проволоки для обеспечения необходимых размеров проплава и усиления сварного шва.

При оптимальной скорости охлаждения в процессе ТЦС свойства металла шва идентичны свойствам основного металла (см. рис. 7). Характер разрушения образцов при этом мало отличается от характера разрушения образцов основного материала. Исследованиями микроструктуры было установлено существенное различие в размерах зерна величина α' и β - пластин в зерне.

Свойства сварных соединений из псевдо- α сплавов титана одной и той же плавки имеют широкий разброс значений по сравнению с основным металлом при сварке по

традиционным режимам ТЦС, что связано с допустимым разбросом значений как химсостава в плавке, так и величины погонной энергии при сварке.

Определены конкретные условия термического цикла сварки для получения удовлетворительных свойств сварных соединений из сплава ВТ20, идентичных со свойствами основного металла. Для заготовок толщинами 1,2 мм; 2,0 мм; 2,5 мм скорости охлаждения в области превращения соответственно должны лежать в пределах 650...750, 550...600, 150...175 °С/с.

Конкретизация температуры полиморфного превращения плавки основного металла (должна быть указана в сертификате на полуфабрикат), предназначенного для изготовления сварных ребристых панелей, позволит более точно устанавливать диапазон скорости охлаждения при назначении ТЦС и обеспечении автоматизации процедуры сварки.

В пятой главе приведены исследования влияния тепловых процессов в ходе ТЦС на деформацию и механические свойства тонколистовых ребристых титановых панелей, оценена эффективность технологий устранения короблений.

Режимы ТЦС для титанового сплава ВТ20 влияют на конечную стадию коробления, чем меньше скорость сварки, тем меньше коробление, но при этом значительно меняются геометрические размеры сварного шва и ЗТВ: увеличиваются ширина и усиление сварного шва (табл. 5).

Прогнозируя момент возникновения и динамику изменения пластических деформаций, можно назначать различные методы, направленные на уменьшение или исключение коробления сварных конструкций.

Таблица 5 – Изменение геометрических параметров поперечного сечения шва в зависимости от скорости сварки

№	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Ширина шва, мм	Высота усиления, мм	Ширина корневого валика, мм	Высота корневого валика, мм	Ширина ЗТВ с изменением микроструктуры основного металла, мм	Внешний вид поперечного сечения шва
1	15	7,5/7,3	12,7	0,36	9,5	0,125	18,5	
2	20	7,5/4,5	8,6	0,15	5,5	0,075	15	
3	25	9/4,5	6,8	0,05	4,5	0,075	13,6	

Примечание: толщина свариваемых образцов – 2 мм, сварочный ток $I_{св} = 90$ А, напряжение $U_d = 10$ В, расход газа: в числите – в горелку, в знаменателе – поддув корня

Из всего многообразия известных методов снятия сварочных напряжений заслуживает внимание вакуумный отжиг. Применение последнего для ребристых панелей ограничивается из-за того, что скорость натекаания существенно влияет на газонасыщение поверхностных слоев отжигаемых деталей и изменение их механических свойств и неприемлемо из-за отсутствия вакуумных печей таких размеров.

В обычных атмосферных условиях (рис. 8) на поверхности титановых сплавов окисленная пленка практически мало изменяется при температуре окружающего воздуха, толщина этой пленки за пятилетний период не превышает 0,3 мкм, что и обеспечивает титановым сплавам высокие антикоррозионные свойства. Существенный рост оксидной пленки наблюдается при нагреве в воздушной атмосфере в электропечи с температуры 650 °С при выдержке 1 час, с температуры 900 °С при выдержке 30 мин; при электроконтактном нагреве с температуры 1000 °С при выдержке 5 минут.

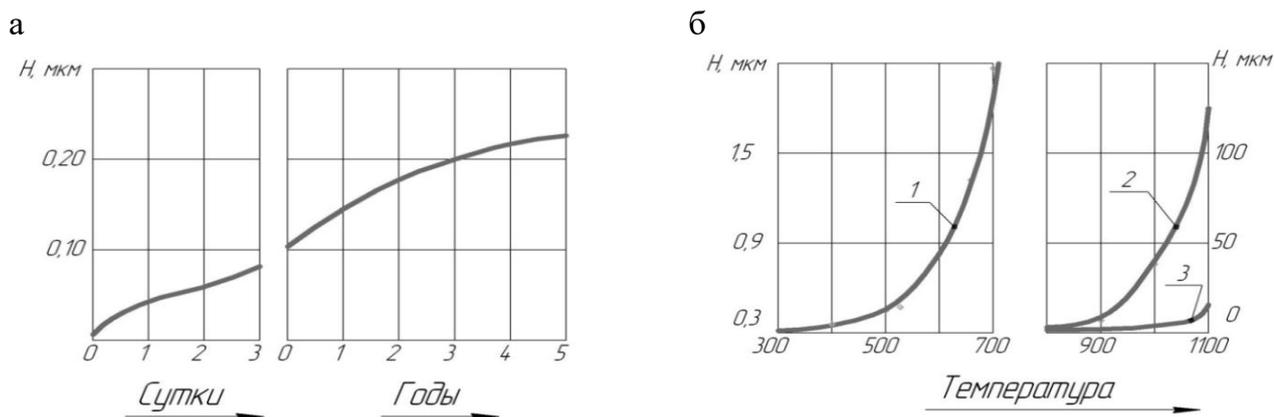


Рис. 8– Рост толщины оксидной пленки на поверхности титана:
 а - при температуре окружающего воздуха 25°C; б – при выдержке:
 1 - 60 мин.; 2 - 30 мин.; 3 - 5 мин.; для соответствующей температуры:
 1 - 2 - при нагреве в электропечи; 3 - при электроконтактном нагреве

Учитывая тот факт, что плотная оксидная пленка на поверхности титановых сплавов защищает их от наводораживания, можно утверждать о возможности использования указанных температурно-временных условий для проведения различных технологических операций при изготовлении деталей. Проведенные исследования защитных свойств оксидной плёнки на поверхности титановых сплавов от наводораживания при нагреве в воздушной среде показали, что для получения требуемой формы и исключения коробления сложной, объемной сварной конструкции из титанового сплава ВТ20 достаточно произвести заневоливание ее в приспособление и отжечь при температуре не менее 600...650 °С и выдержке не менее 2...0,5 часа соответственно.

В некоторых случаях габариты сварных тонкостенных конструкций не позволяют провести термообработку в печах. Для решения задачи устранения коробления таких деталей исследовались методики обработки сварных заготовок холодной пластической деформацией и горячей пластической деформацией в температурно-временном интервале фазового предпревращения, отжигом в воздушной среде.

Исследование влияния пластической деформации производилось на сварных заготовках из листа толщиной 1,5 мм сплава ВТ20. Заготовки сваривались встык на автомате АДСВ-6 в среде аргона. Сварной шов и околошовная зона подвергались холодной пластической деформации, прокатке на роликовой машине ЛРС-10 до толщины основного металла (рис.9).

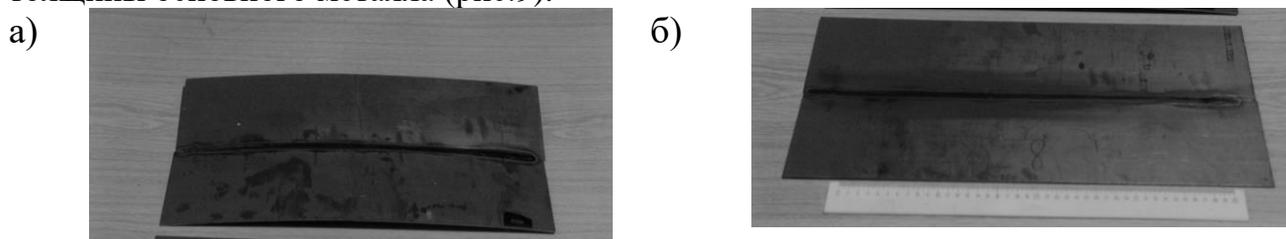


Рис. 9 - Внешний сварного образца до и после прокатки (а) и изменение прогиба (б)

Холодная прокатка металла шва практически полностью исключает коробление заготовки. При этом рентгенодифрактометрическим методом выявлены значительные остаточные напряжения: сварной шов и ЗТВ после сварки 117,57 и 232,1 МПа, после холодной прокатки 375,5 и 479,1 МПа соответственно.

В результате исследований макро- и микроструктуры установлено измельчение литой структуры шва крупнозернистой околошовной зоны (ОШЗ), которая после высокотемпературной обработки холоднокатаных сварных швов и ЗТВ представляет собой измельченную α' -фазу.

Микроструктура основного металла сплава ВТ20 в исходном состоянии имеет равноосную слабоволокнистую структуру с округлыми частицами α' -фазы. Существенного различия в микроструктуре образцов сплава ВТ20, отожженных по разным режимам, не наблюдается. В отличие от исходного состояния после высокотемпературного формообразования и отжига структура раздробленная, равноосная, явных границ зерен не наблюдается, частицы α' -фазы имеют более мелкую округлую форму (рис. 10). При этом быстрое охлаждение сразу после окончания процесса пластической деформации предотвращает собирательную рекристаллизацию, что обеспечивает получение весьма мелкозернистой микроструктуры и в результате повышенный предел выносливости и хорошие показатели пластичности.

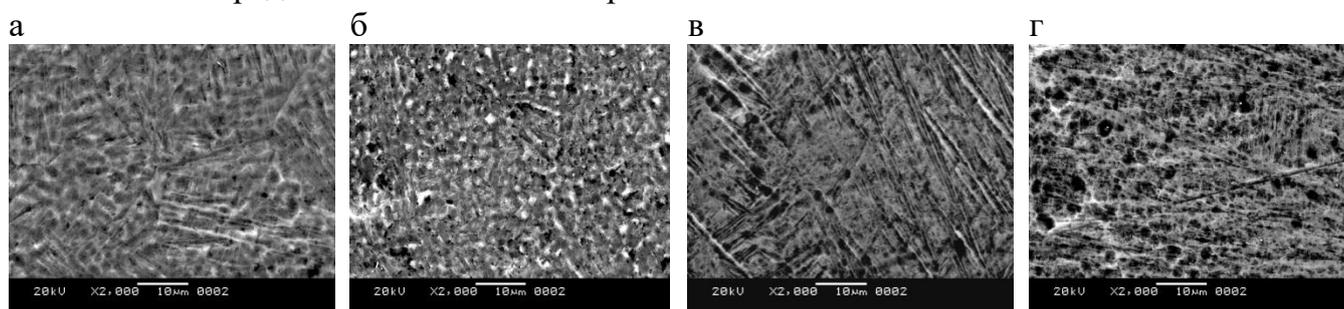


Рис. 10 - Фрагменты микроструктуры металла шва сплава ВТ20 после холодной пластической деформации (а, б) и последующего отжига (в, г)

Наибольший эффект улучшения механических свойств (статическая и усталостная прочность, пластичность) появляется и после холодной пластической деформации, и последующих либо горячей деформации, либо термообработки при температурах, близких к температуре аллотропического превращения, с обеспечением скоростного нагрева и охлаждения и связан с синергетическими процессами упорядочения в зонах структурных концентраторов напряжений.

В шестой главе приведены результаты исследования влияния технологических операций изготовления ребристых титановых панелей ЛА, на усталостную прочность материала панелей, лимитирующую работоспособность ЛА. Исследования проводились на заготовках из среднепрочного титанового сплава ВТ20. Заготовки раскраивались различными методами. Автоматическую аргонодуговую сварку листовых заготовок размерами 600x100x2 мм выполняли на спецстапеле (УСПО-2,6) автоматом АДСВ-6 с применением в качестве защиты аргона высшей очистки.

Исследование влияния традиционных режимов образования сварных соединений ребристых панелей из сплава ВТ20 на порообразование и их свойства проводили исходя из требований к сварным швам деталей ответственного назначения. Изготовление образцов производили из листовых заготовок ВТ20, лист 2,5 мм размером 150x450x50мм сваркой встык и в тавр сквозным проплавлением на автоматической установке АДСВ-6 с поддувом аргона на режимах сварки стыковых и тавровых соединений панели имитатора по существующей технологии. Образцы подвергали рентгеновскому контролю и отжигу в вакууме в печи типа УВН-1500 при температуре 650 °С в заневоленном состоянии. После отжига изготовленные образцы подвергались пескоструйной обработке корундовым песком, рентгенографическому контролю с целью определения расположения и характера допустимых дефектов и производили

статические и повторно-статические испытания.

Повторно-статические испытания до разрушения производили на нагрузках из расчета $\sigma_{\max} = 600$ МПа; $\sigma_{\min} = 200$ МПа при частоте нагружений 520 циклов/мин на испытательной машине «LOSENCHAUSEN» (ФРГ) и установке, разработанной в КНАГУ. Рабочий режим испытаний: симметричный изгиб с амплитудой 12 мм, частота 24 Гц, максимальное напряжение на поверхности ± 600 МПа.

Таблица 7 – Изменение механических свойств сварных образцов из имитатора ребристой панели в зависимости от наличия пор в металле шва

Состояние материала	№ п/п	Наличие пор в сечении образца			Механические свойства			
		Количество, шт	Суммарная площадь, мм ²	Место расположения	σ_b , МПа	δ , %	Угол загиба, градус	Число циклов до разрушения N_u при $\sigma_\alpha^{\text{cp}} = \frac{600-200}{2}$, МПа
Основной металл	1	-	-	-	1140	10	37	115000
	2	-	-	-	1140	10	40	121000
	3	-	-	-	1150	10	35	148000
	4	-	-	-	1150	11	35	136000
	Среднее арифметическое				1145	10,3	36	130000
Сварные образцы	1	-	-	Без дефектов	975	-	45	118000
	2	-	-		945	-	45	144300
	3	-	-		950	-	32	119000
	4	8	1,63	Ближе к поверхности	925	-	30	65700
	5	9	1,43		910	-	37	48100
	6	10	1,24		935	-	33	52400
	7	7	1,16	Ближе к центру	928	-	31	70000
	8	9	0,70		950	-	40	94000
	9	6	0,85		940	-	33	81000
	10	5	0,37		945	-	35	94000
	Общее среднее арифметическое				940	-	36	88620
	Среднеарифметическое для дефектных образцов				933		34	72172

Основное влияние на свойства сварных соединений титановых сплавов оказывают технологические операции раскроя, последующей обработки перед сваркой и режимы сварки, вызывающие образование пор в металле шва. Наибольшее количество пор и величина их общей площади на 100 мм сварного шва, независимо от просушки, обезжиривания и обезвоживания, наблюдается при раскрое на гильотинных ножницах, фрезерованием с последующим опескоструиванием кварцевым песком либо зачисткой металлическими щетками. Это приводит к снижению показателей прочности и угла загиба, расширению диапазона разброса значений (σ_b от 730 до 1010 МПа, угол загиба от 23 до 62°, количество разрушений образцов по сварному шву колеблется от 25 до 100 %). Операции газолазерного раскроя в среде азота, а также комбинированные заготовки ГЛР в азоте с раскроем на гильотинных ножницах полностью исключают образование пор в сварном шве титановых сплавов, при этом свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Исследования влияния традиционных режимов образования сварных соединений ребристых панелей из сплава ВТ20 на порообразование и свойства сварных соединений показали (табл. 7), что, исходя из требований к сварным швам деталей ответственного

назначения для листового материала толщиной 2,5 мм, выявленные дефекты – поры (по количеству и размерам) и установленные свойства являются допустимыми. Суммарная площадь пор на 100 мм шва не превышает допустимой площади 2,5 мм²; предел прочности сварных швов без дефектов отличается от нижнего предела допуска всего на 2,3%, а дефектных – на 3,2 %; малоцикловая усталость бездефектных сварных образцов отличается от малоцикловой усталости основного металла на 6 %.

Четко выявилась закономерность: снижение прочности пропорционально увеличению суммарной площади пор (см. табл. 7). Малоцикловая усталость сварных образцов в значительной степени зависит не только от суммарной площади пор в металле шва, но и от их расположения (см. табл. 7, рис. 11). Самыми опасными оказались поры, располагающиеся близко к поверхности.

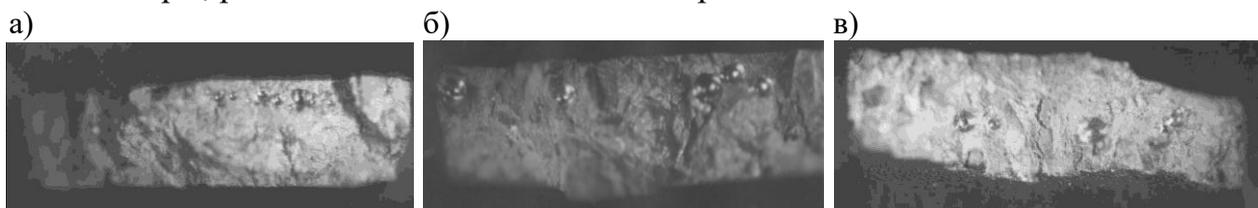


Рис.11 - Вид излома сварных образцов с характерным расположением пор:
а – ближе к поверхности; б – смешанные и с поверхности и ближе к центру; в – в центре

Усталостная прочность таких образцов уменьшилась на 44 % по сравнению с бездефектными образцами. Среднее значение прочности сварных соединений хоть и допустима для сварных конструкций, но более чем на 18 % ниже прочности основного металла. Основной причиной такого снижения, как было показано ранее, являются условия проведения термического цикла сварки, а именно недостаточная скорость охлаждения в интервале температур фазового превращения.

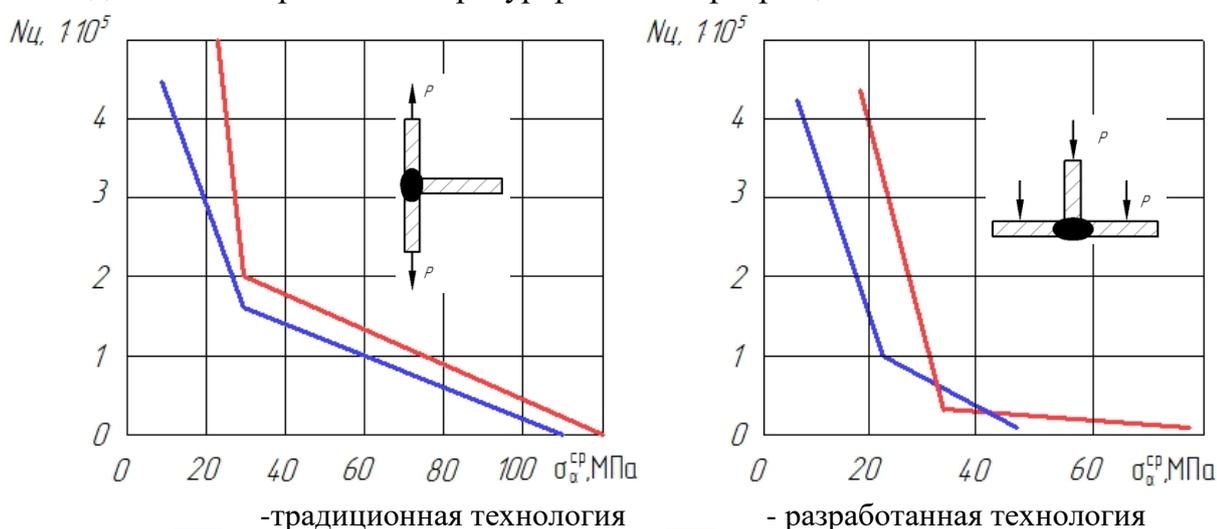


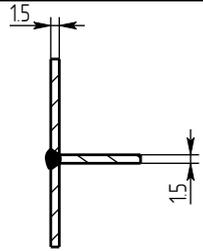
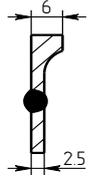
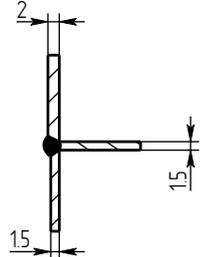
Рис. 12 – Влияние диапазона нагружения сварных соединений из сплава ВТ20 на число циклов до разрушения при циклических испытаниях

Как видно из данных табл. 8 и рис. 12, малоцикловая усталость образцов сварных стыковых и тавровых соединений, выполненных сквозным проплавлением по традиционным режимам для ребристых панелей, существенно зависит от режимов отжига независимо от формы и методов испытания спецобразцов.

Исследования изменения малоцикловой усталости основного металла в зависимости от вида раскрытия и последующей обработки позволили установить следующие закономерности. Чистовое фрезерование кромок образцов по сравнению с

ГЛР в азоте и аргоне повышает малоцикловую усталость соответственно более чем на 70 и 60 % из-за высоких остаточных напряжений в образцах, вызванных газолазерным раскромом. Последующий вакуумный отжиг повышает малоцикловую усталость, особенно у образцов после ГЛР в азоте и аргоне соответственно на 67 и 54 %. Отжиг в воздушной атмосфере повышает малоцикловую усталость у всех видов раскроя по сравнению с отжигом в вакууме для ГЛР в азоте – на 20 %, ГЛР в аргоне – на 45 %. Опескоструивание поверхности образцов всех видов раскроя после отжига в воздушной атмосфере позволяет существенно повысить малоцикловую усталость (рис. 13). Рабочий режим испытания: амплитуда 14,8 мм; частота 24 Гц. Расчетные напряжения по поверхности образца составляют 710 МПа. Сварка образцов производилась по режимам ТЦС, обеспечивающих оптимальную скорость охлаждения в температурном интервале фазового превращения.

Таблица 8 - Изменение механических свойств сварных тонкостенных конструкций из сплава ВТ20 в зависимости от режима термообработки

Вид соединения	Режим термообработки	Статические испытания	Повторно-статические испытания		
		σ_b , МПа	σ_{α}^{cp} , МПа	Число циклов до разрушения Nц, шт	Примечание
	Без обработки	1033	104,4	21000	Разрушение в ОШЗ
	Без обработки	1040	52,1	157000	То же
	Без обработки	1058	31,3	250000	Не разрушился
	Полный вакуумный отжиг	1083	104	11000	Разрушение в ОШЗ
	Полный вакуумный отжиг	1000	61,8	115000	Разрушение в ОШЗ
	Полный вакуумный отжиг	1025	31,1	186000	Разрушение в ОШЗ
	Отжиг в воздушной печи 650 ± 10 °С	1100	110	105400	Разрушение по радиусу перехода
	Отжиг в воздушной печи 650 ± 10 °С	1090	165	23700	То же
	То же	1130	165	131000	Без разрушения
	То же	1080	220	27800	Разрушение по сварному шву
	То же	1080	220	33000	То же
	То же	1100	220	28000	То же

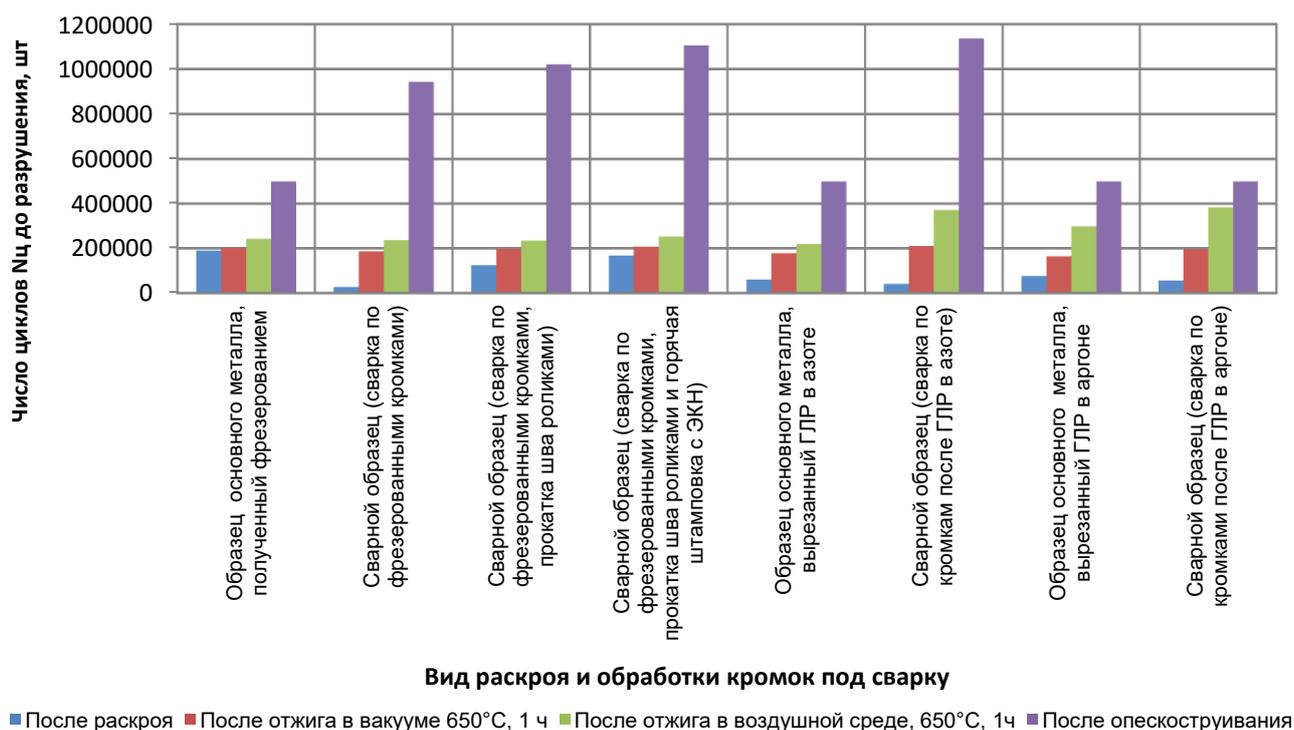


Рис. 13 - Изменение усталостной прочности (малоциклового усталости) образцов основного металла и сварного шва из сплава ВТ20 в зависимости от вида раскроя, подготовки под сварку и после сварки

Использование газолазерного раскроя, как в среде азота, так и в среде аргона, особенно в комбинации с другими видами раскроя, открывает возможность автоматизации процесса ТЦС, поскольку в процессе сварки плавлением исключается порообразование в металле шва. При этом варьируя режимами ТЦС, можно прогнозировать свойства сварных конструкций.

Реальные конструкции (в особенности конструкции авиационной и ракетной техники) часто эксплуатируются в условиях значительных вибрационных нагрузок. Исследование разрушения реальных авиационных ребристых конструкций в условиях вибрационных нагрузок представляет не только научный интерес, но и практическую значимость. С этой целью были разработаны и изготовлены натурные образцы из сплава ВТ20 толщиной 1,2 мм (рис. 14).

Конструкция опытного образца представляла собой характерный участок силовой панели летательного аппарата. Образцы состоят из четырех сварных заготовок и двух стрингеров высотой 20 и 10 мм, раскроенных на лазерной установке BYSTRONIC-BYSTAR-3015 с использованием технического азота класса 4,5. Общий размер сварного образца 300×600 мм.

Испытания проводились на вибраторе V954МКII. Образец крепился к столу виброустановки с помощью втулок Ø 20 мм и высотой 40 мм. При испытаниях для увеличения динамических нагрузок применялся груз массой 250 г.

В результате испытаний разрушение образцов произошло в зонах их крепления, при этом в образцах, закреплённых по схеме 1, трещины образовались вблизи 1-й и 4-й точек крепления, а в образцах, закреплённых по схеме 2, трещины появились вблизи 5-й и 8-й точек крепления.

Анализ места и характера разрушения свидетельствует о том, что у всех образцов-имитаторов разрушение начинается в зоне максимальных напряжений: у мест жесткого

крепления груза к образцу. Распространение разрушения происходит по большому кругу, точки крепления как бы ограничивают этот круг. Резонансная частота колебаний образца-имитатора к моменту остановки волны одного знака и появления новой волны другого знака у зоны крепления, т.е. в этом месте происходит возвратно-поступательная смена знака напряжений при переходе «хлопуна» из выпуклого состояния в вогнутое, вызывает максимум растягивающих напряжений. В точке крепления груза (8) также наблюдается максимум амплитуды колебаний (рис. 15).

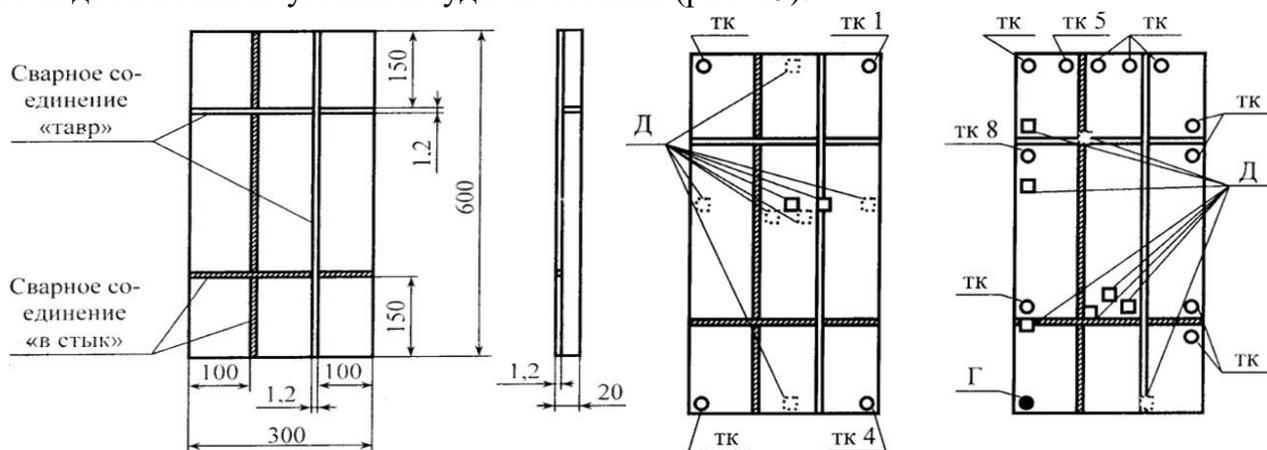


Рис. 14 - Эскиз экспериментальных образцов и схемы испытания образцов (Д - тензодатчик, тк - точка крепления образца, Г - груз 250 и 420 г)

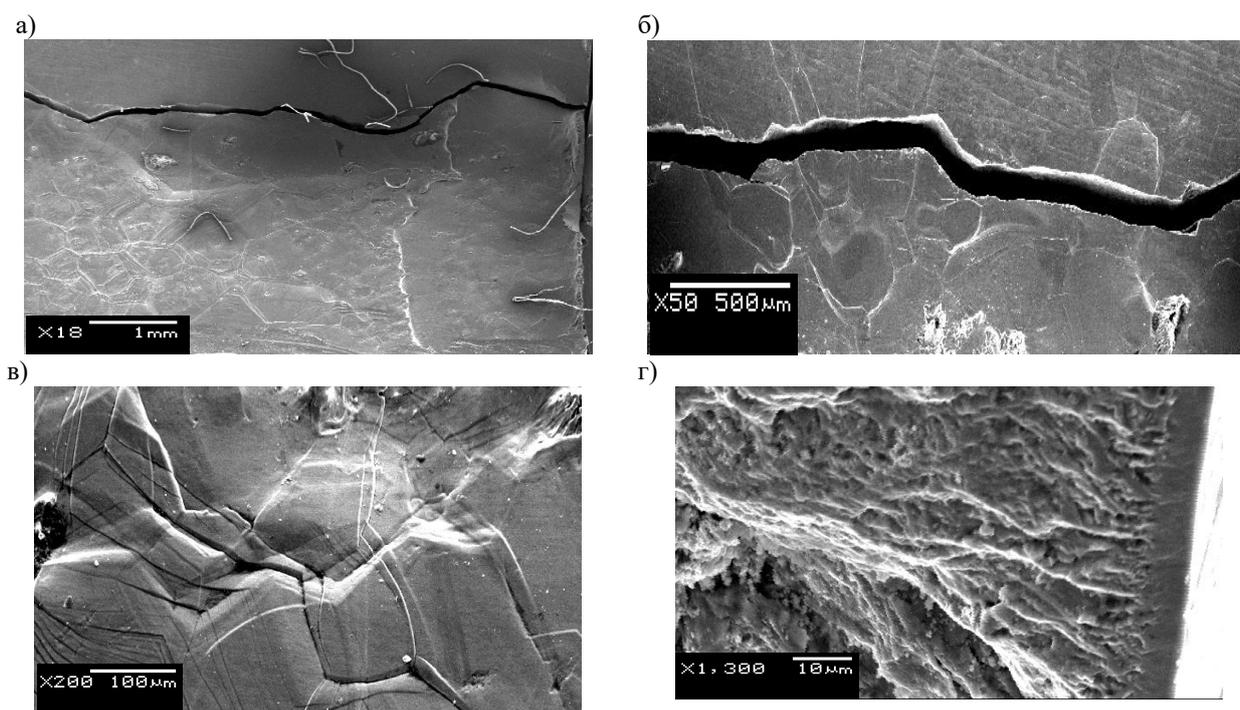


Рис. 15 - Макроструктура зоны разрушения сварного шва в процессе виброиспытаний в точке крепления (8): а – начало разрушения от фрезерованной кромки с распространением по радиусу галтели; б – разрушение как по границам зерна, так и по зерну – транскристаллитное; в – двойникование в зерне и формирование микротрещин на стыке зерен; г – фрактограмма излома по месту разрушения: ступенчатый характер разрушения остановки и развитие разрушения

Таким образом, в зонах крепления образцов к вибростенду наблюдаются повышенные динамические знакопеременные напряжения, которые в сочетании с «жестким» креплением образца создают благоприятные условия для зарождения и

развития усталостных трещин. Присутствие в указанных зонах поверхностных дефектов и других концентраторов напряжений значительно сокращает время до образования очага разрушения.

Приведенные исследования показали, что конструкции из титановых сплавов, изготовленные при применении эффективных режимов газолазерного раскроя заготовок в среде технического азота и последующей термической обработке, по виброненадежности превосходят конструкции, изготовленные по традиционной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена проблема обеспечения бездефектного и малодефектного изготовления деталей авиационных титановых конструкций летательных аппаратов с применением сварки. Это является важным решением для отрасли как с позиций безопасности военных и гражданских самолётов, так и с позиций экономической эффективности. Так, например, экономическая эффективность изготовления одной незначительной по размерам титановой нижней панели центроплана составляет 352 нормо-часа или в денежном эквиваленте составляет более 2,5 млн. руб.

На основе разработанных в диссертации решений получены следующие выводы.

1. Бездефектные и малодефектные сварные титановые авиационные конструкции можно обеспечить за счёт управления дефектностью материала сварного шва. Дефектность связана с формированием при сварке газовых пузырьков и пор из-за мгновенного испарения капиллярно-конденсированной влаги и расширения газов, с пузырьковой дегазацией сварочной ванны, с порообразованием в закристаллизовавшемся металле шва.

2. Управление дефектностью обеспечивается комплексом технологических мер по снижению насыщенности свариваемых поверхностей капиллярно-конденсированными загрязнениями. Необходимый уровень снижения наиболее просто достигается такими технологическими операциями подготовки контактных поверхностей заготовок деталей под сварку, как фрезерование контактных поверхностей с полированием, либо фрезерование с ультразвуковой пластической обработкой фрезерованной поверхности (уровень $q = 0 \dots 2$ % дефектности при насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями, равной $N = 1 \dots 1,2$). Меньший (нулевой уровень $q = 0$ % дефектности при насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями, равной $N = 1$). уровень снижения насыщенности достигается при газолазерном формировании контактных поверхностей.

3. Доминирующими факторами образования пористости в металле сварного шва являются микро-, субмикротрещины, несплошности, насыщенные капиллярно-конденсированными загрязнениями. Разрушения (микро-, субмикротрещины, несплошности) формируются во время механической подготовки стыкуемых поверхностей при всех видах механической обработки. При разрушении превалируют механизмы разрыхления поверхностного слоя, избирательного травления, плавления. Каждый из этих механизмов приводит к различной степени насыщенности капиллярно-конденсированными загрязнениями поверхности титановых заготовок и присадочной проволоки, что в итоге приводит к различному уровню дефектности металла шва при сварке.

4. Металлургический процесс образования пор (43% от общего числа дефектов) в сварочной ванне и пористости в металле шва в процессе кристаллизации имеет сложный многоступенчатый характер и связан с образованием водорода при конденсации влаги.

Содержание водорода в плазме искрового разряда при сварке находится в прямой зависимости от количества конденсированной влаги (загрязнений) на поверхности на поверхности титановых сплавов и зависит от условий предварительной обработки. При фрезеровании условное содержание водорода 0,021%, при химическом травлении – 0,020%, при ЭЭО – 0,038%, при обработке электронным лучом – 0,008%.

5. Для оценки качества поверхности стыкуемых кромок по насыщенности водородом (капиллярно-конденсированными загрязнениями) разработан критерий, который с достаточной точностью позволяет классифицировать виды подготовки стыкуемых поверхностей по их рациональности. Критерий носит сравнительный характер содержания водорода на поверхности кромки с содержанием водорода в заготовке. Содержание водорода регистрируется при спектральном химического анализе.

6. Установлено существенное ($N=1...4,5$) влияние капиллярно-конденсированных загрязнений на поверхности присадочной проволоки на уровень дефектности металла шва при сварке тавровых соединений сквозным проплавлением и стыковых соединений ребристых панелей из титановых сплавов. Управлять уровнем этого влияния можно режимом сварки. Например для исключения этого влияния сварку необходимо реализовать так, чтобы на расстоянии 3 мм от шва разогрев титанового сплава до температуры 350 °С происходил не быстрее 0,3 секунд. Это способствует удалению с поверхности капиллярно-конденсированных загрязнений, которые попадают в расплавленную ванну и образуют поры.

7. Установлено влияние скорости охлаждения материала сварочного шва на физико-механические характеристики титанового сплава. Для обеспечения идентичности физико-механических характеристик материала сварочного шва с физико-механическими характеристиками титанового сплава установлены условия термического цикла сварки. Например, для титанового сплава марки ВТ 20 для свариваемых заготовок толщиной 1,2 мм скорость охлаждения должна находиться пределах 650-750 °С в секунду, что обеспечивает необходимые полиморфные превращения в зоне сварки. При толщине заготовок 2,5 мм скорость охлаждения составляет 150-175 °С в секунду. Установлено, что чем меньше скорость охлаждения, тем больше величина изменения содержания легирующих элементов и меньше временное сопротивление разрыву.

8. Установлено гарантированное исключение пористости в металле сварочного шва, что улучшает свойства неразъёмного соединения титановых заготовок деталей, за счёт автоматизации управления режимом сварки на примере применения установки модели УСП-5000.

9. Установлен эффект улучшения механических свойств сварных тонкостенных соединений из сплава ВТ20 (статическая и усталостная прочность, пластичность), подвергнутых отпуску при температуре полиморфного превращения холоднокатаных образцов, что связано с процессами упорядочения структурной неоднородности в зонах концентрации напряжений с достижением структуры измельченной α' -фазы. Вместе с этим обкаткой роликами достигается полное устранение коробления сварной конструкции, снятие усиления шва.

10. Электроконтактный нагрев при горячей пластической деформации сварных тонкостенных образцов из сплава ВТ20 связан с высокими скоростями охлаждения металла, что обеспечивает мелкозернистую структуру зоны термического влияния, отсутствие собирательной рекристаллизации, а следовательно и повышенные показатели предела прочности и пластичности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

1. Влияние режимов термического цикла сварки на структуру и свойства металла шва титановых сплавов / В. И. Муравьев, О. Н. Клешина, А. А. Кузнецов, П. В. Бахматов // Сварочное производство. – 2010. – № 8. – С. 3-9.

Effect of the conditions of the welding thermal cycle on the structure and properties of weld metal in titanium alloys / V. I. Murav'ev, O. N. Kleshnina, A. A. Kuznetsov, P. V. Bakhmatov // Welding International. – 2012. – Vol. 26, No. 1. – P. 22-29. – DOI 10.1080/09507116.2011.592708.

2. Муравьев, В. И. Расчет остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 9-12.

Muravev, V. I. Calculation of residual stresses on the basis of thermal fields in butt welding of thin sheets / V. I. Muravev, P. V. Bakhmatov, A. A. Debelyak // Welding International. – 2013. – Vol. 27, No. 5. – P. 358-361. – DOI 10.1080/09507116.2012.715917.

3. Влияние активации свариваемых кромок на порообразование при сварке плавлением титановых заготовок / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, О. П. Логвинов, К. А. Мелкоступов // Сварочное производство. – 2012. – № 6. – С. 11-16.

Effect of activation of weld edges on the formation of pores in fusion welding of titanium components / V. I. Murav'ev, P. V. Bakhmatov, O. P. Logvinov, K. A. Melkostupov // Welding International. – 2013. – Vol. 27, No. 7. – P. 548-552. – DOI 10.1080/09507116.2012.715947.

4. Влияние напряженного состояния на структуру и свойства при сварке конструкций из сталей и сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Н. О. Плетнев, А. А. Дебеляк // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 4. – С. 251-255. – DOI 10.17073/0368-0797-2016-4-251-255.

Influence of the stress state on the structure and properties of welded steel and alloy structures / V. I. Murav'ev, P. V. Bakhmatov, N. O. Pletnev, A. A. Debelyak // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, No. 4. – P. 256-259. – DOI 10.3103/S0967091216040070.

5. Бахматов, П. В. Исследование технологических операций изготовления лимитирующих надежность (усталостную прочность) ребристых титановых панелей / П. В. Бахматов, В. И. Муравьев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 99-108. – DOI 10.17073/0368-0797-2017-2-99-108.

Bakhmatov, P. V. Manufacture of high-quality ribbed titanium panels / P. V. Bakhmatov, V. I. Murav'ev // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, No. 2. – P. 91-98. – DOI 10.3103/S0967091217020036.

6. 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. – DOI 10.34759/vst-2021-2-218-227.

7. Григорьев, В. В. Применение установки УСП-5000 для сварки крупногабаритных оребренных титановых панелей / В. В. Григорьев, П. В. Бахматов, С. П. Мазур // *Авиационная промышленность*. – 2018. – № 1. – С. 44-46.

8. Бахматов, П. В. Исследование влияния методов обработки на содержание водорода в поверхностном дефектном слое заготовок из титановых сплавов / П. В. Бахматов // *Авиационная промышленность*. – 2014. – № 3. – С. 28-34.

9. Активация и дезактивация конденсации загрязнений на поверхности свариваемых заготовок из титановых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З. Лончаков, О. П. Логвинов // *Контроль. Диагностика*. – 2012. – № 3. – С. 26-30.

10. Лончаков, С. З. Исследования изменения содержания водорода в поверхностном слое титановых заготовок в зависимости от природы ее формирования / С. З. Лончаков, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // *Сварка и диагностика*. – 2014. – № 5. – С. 33-36.

11. Определение содержания водорода в титановых сплавах в ходе технологического цикла / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З. Лончаков, В. В. Григорьев // *Сварочное производство*. – 2018. – № 3. – С. 14-20.

12. Муравьев, В. И. Влияние разделительных операций на дефектность поверхности кромок заготовок из титановых сплавов под сварку / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З. Лончаков, О. П. Логвинов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2012. – № 3. – С. 7-16.

13. Влияние интенсификации процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне на газонасыщение и свойства титановых конструкций / С. З. Лончаков, В. И. Муравьев, Б. И. Долотов, Бахматов П.В. [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2013. – № 8. – С. 3–7.

Монографии

1. Муравьев, В. И. Активация процессов формирования соединений из металлов и сплавов : монография / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, П. А. Саблин ; В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, П. А. Саблин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т". – Владивосток : Дальнаука, 2012. – 366 с. – ISBN 978-5-8044-1262-4.

2. Перспективные металлургические и технологические процессы производства, повышающие надежность изделий из конструкционных материалов: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. В. Фролов. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 330 с. – ISBN 978-5-7765-1187-5.

Патенты

1. Пат. 2491159 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 К 31/12 // В 23 К 103/14 Способ оценки перед сваркой качества сварочной проволоки и заготовок сварной конструкции из титановых сплавов В.И. Муравьев, П.В. Бахматов С.З. Лончаков, А.А. Кузнецов, К.А. Мелкоступов, А.А. Дебеляк, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ».- № 2011149420/02, заявл. 05.12.2011, опубл. 27.08.2013. Бюл. № 24

2. Патент № 2793282 С1 Российская Федерация, МПК В23К 33/00, В23К 9/235, В23С 3/00. Способ подготовки кромок титанового сплава под сварку : № 2022128801 : заявл. 07.11.2022 : опубл. 30.03.2023 / В. В. Григорьев, П. В. Бахматов, А. В. Солнцева, Н. А. Стробыкин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет".

Публикации в других изданиях

1. Бахматов, П. В. Особенности оценки влияния термического цикла сварки титановых сплавов на остаточные напряжения и коробление сварных изделий / П. В. Бахматов, В. И. Муравьев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 2. – С. 55-59.

2. Муравьев, В. И. Исследование влияния режимов термического цикла сварки (ТЦС) титановых сплавов в условиях отсутствия порообразования на свойства сварных соединений / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 3(240). – С. 3-10. – DOI 10.14489/hb.2017.03.pp.003-010.

3. Муравьев, В. И. Доминирующие факторы образования поверхности раздела, вызывающие капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва титановых конструкций / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Сварка и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 11-16.

4. Муравьев, В. И. Влияние режимов холодной пластической деформации и последующей термообработки на структуру и свойства твердофазного диффузионного соединения титановых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. С. Пицык // Сварка и диагностика. – 2017. – № 1. – С. 17-22.

5. Бахматов, П. В. Аналитическая оценка технологических процессов формирования неразъемных соединений из конструкционных материалов / П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 12. – С. 70-74.

6. Бахматов, П. В. Влияние природы формирования поверхности стыкуемых кромок на механизм порообразования и свойства металла шва при сварке плавлением титановых сплавов / П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 12. – С. 75-81.

7. Бахматов, П. В. Особенности разрушения элементов сварных титановых конструкций (ребристых панелей) в условиях вибрационных нагрузок / П. В. Бахматов, В. И. Муравьев, Р. А. Физулаков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – Т. 1, № 4(28). – С. 104-109.

8. Процессы упорядочения структурной неоднородности конструкционных материалов при изготовлении изделий / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – Т. 1, № 5. – С. 43-54.

9. Муравьев, В. И. Определение возможности расчета остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 68-80.

10. Ensuring the load-carrying capacity of welded titanium structures / V. I. Muravev, P. V. Bakhmatov, R. A. Fizulakov, O. P. Logvinov / Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Symposium. Proceedings. – Khabarovsk: Pacific National University, 2011. – P. 179-186.

11. Production Process Specifics for Permanent Fusion Weld Connections When Assembling Aircraft Titanium Ribbed Panels. / Muravyev V.Y., Bakhmatov P.V., Grigorev

V.V., Kiselev H.V. (2021) In: Shakirova O.G., Bashkov O.V., Khusainov A.A. (eds) Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 200. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_59 pp 558-566

12. Bakhmatov, P. V. Influence of traditional and perspective modes of heating in the air environment on properties of alloys on the basis of iron and titanium / P. V. Bakhmatov, A. A. Yevstigneyev, A. F. Melyshchuk, V. I. Muravyev, A. A. Debeljak // International Xth Russian-Chinese symposium. Proceedings. «Modern materials and technologies» 5-9 October, 2009. Khabarovsk Pacific national university. – P. 505-509.

13. Влияние термического цикла электронно-лучевой сварки на формирование металла шва конструкций из титановых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, П. Г. Дёмышев, А. А. Кузнецов // Вестник ГОУВПО «КнАГТУ». – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – С. 90-97.

14. Бахматов, П. В. Свойства сплавов на основе железа и титана после традиционных и перспективных режимов нагрева в воздушной среде / П. В. Бахматов, А. Ф. Мельничук, А. А. Дебеляк // Современные техника и технологии: XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. тр.: в 3 т. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 80-82.

15. Усталостные свойства титановых конструкций в зависимости от технологических операций раскроя и последующей обработки / В. И. Муравьев, Р. А. Физулаков, П. В. Бахматов, О. Н. Клешнина // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора И.И. Муханова: сб. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 108-112.

16. Долотов, Б. И. Поведение вольфрамовых электродов при сварке на форсированных режимах / Б. И. Долотов, П. В. Бахматов, А. А. Дебеляк // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прикладные технологии в машиностроении: сб. тр. ИМиМ ДВО РАН. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – С. 102-107.

17. Расчет остаточной деформации при сварке тонких пластин встык / А. А. Дебеляк, О. Н. Клешнина, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – С. 506-510.

18. Управление структурой и свойствами металла шва при СПВЭ и ЭЛС титановых конструкций летательных аппаратов / А. А. Кузнецов, В. И. Муравьев, Б. И. Долотов, П. В. Бахматов // Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы Международной научно-технической конференции. Т. 2. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – С. 402-407.

19. Дебеляк, А. А. Разработка методики расчета остаточных деформаций при сварке тонких пластин встык / А. А. Дебеляк, П. В. Бахматов, В. И. Муравьев // Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении: научные

труды Международной научно-практической конференции. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 297-300.

20. Бахматов, П. В. Накопление водорода в поверхностном слое титановых заготовок в процессе изготовления конструкций / П. В. Бахматов, О. Н. Клешина, А. А. Кузнецов / Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (г. Москва, 22-25 сентября 2010 г.) / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

21. Влияние процессов формирования макро-, микроструктуры поверхности стыкуемых кромок на механизм порообразования и свойства металла шва сварных титановых конструкций / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, К. А. Мелкоступов, А. А. Дебеляк / Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения: материалы Российской научно-технической конференции (г. Комсомольск-на-Амуре, 21-24 ноября 2011 г.) / Редкол.: А. М. Шпилев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2011. – С. 302-304.

22. Влияние на механизм порообразования и свойства металла шва сварных титановых конструкций процессов формирования макро-, микроструктуры поверхности стыкуемых кромок / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, О. П. Логвинов, К. А. Мелкоступов / Фундаментальное и прикладное материаловедение: труды VIII Международной научной школы-конференции / под ред. В. Б. Маркина. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 287-293.

23. Бахматов, П. В. Перспективы создания беспористых сварных соединений тонкостенных ребристых панелей из титановых сплавов / П. В. Бахматов // Авиация и космонавтика : тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 447-449.

24. Стробыкин, Н. А. Условия создания бездефектных сварных соединений тонкостенных титановых авиационных конструкций / Н. А. Стробыкин, П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 5(77). – С. 98-107.