

На правах рукописи

Степанова

СТЕПАНОВА КСЕНИЯ АНДРЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО
КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ
ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ
С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Научный руководитель: **Кинжагулов Игорь Юрьевич**
кандидат технических наук,
старший преподаватель факультета систем
управления и робототехники Университета ИТМО

**Официальные
оппоненты:** **Бехер Сергей Алексеевич**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Электротехника, диагностика
и сертификация» ФГБОУ ВО СГУПС

Нефедьев Евгений Юрьевич
кандидат физико-математических наук,
ведущий инженер ФГУП «Крыловский
государственный научный центр»

Ведущая организация: федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-производственное
объединение «Техномаш»

Защита состоится «02» декабря 2020 г. в 14 часов 00 мин. на заседании
диссертационного совета МЭИ.001 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу:
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 17, ауд.В - 310.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « ____ » 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
МЭИ.001

В.А. Барат

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Перспективная технология сварки трением с перемешиванием (СТП) находит широкое применение в судостроении, при производстве авиационной и ракетно-космической техники, благодаря возможности получения более прочных, в сравнении со сваркой плавлением, соединений без использования присадочных материалов.

В настоящее время в Российской Федерации данная технология активно внедряется при создании нового поколения перспективных корпусных конструкций – топливных баков ракет-носителей (РН) из алюминиевых сплавов, надежность функционирования которых напрямую определяет работоспособность РН в целом.

Процесс изготовления сварных соединений высокой прочности по технологии СТП сопряжен с необходимостью выполнения многопараметрического контроля технологического процесса сварки. Это обусловлено спецификой формирования сварного соединения в твердой фазе посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями за счет их нагревания трением, пластического деформирования и перемешивания вращающимся сварочным инструментом.

В настоящее время не решена проблема обеспечения качества соединений СТП, связанная с вероятностью образования трудно выявляемых традиционными методами неразрушающего контроля (НК) микродефектов сложной морфологии. Данное обстоятельство ограничивает сферу применимости и внедрения технологии СТП при производстве изделий ответственного назначения.

Особенность технологии СТП тонкостенных оболочечных конструкций приводит к невозможности исправления дефектных участков сварных соединений после завершения сварочного процесса. В соответствии с требованиями технологических указаний на СТП топливных баков РН семейства «Ангара» формирование соединения и, при необходимости, принятие решения о его переварке должны осуществляться за один проход без демонтажа сварочной оснастки. В связи с чем было предложено осуществлять неразрушающий контроль дефектов в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием методом акустической эмиссии (АЭ), чувствительным к локальной динамической перестройке структуры материала шва при дефектообразовании.

Отсутствие моделей, методов и методик контроля, учитывающих особенности технологии СТП и специфику образования дефектов малого раскрытия, обуславливает актуальность темы диссертационных исследований.

Таким образом, имеет место проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между необходимостью выполнения достоверного контроля качества формирования соединений СТП в реальном времени – с одной стороны, и отсутствием моделей, методов и методик контроля для решения подобных

задач – с другой. **Научная задача**, решаемая в диссертационной работе, может быть сформулирована следующим образом – разработка комплексной методики неразрушающего контроля дефектообразования в процессе сварки трением с перемешиванием при изготовлении изделий ракетно-космической техники (РКТ) на основе метода акустической эмиссии.

Степень разработанности

Развитию метода АЭ контроля качества сварных соединений в процессе сварки в настоящее время уделяется большое внимание такими авторами, как: Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И., Нефедьев Е.Ю., Гуменюк В.А., Казаков Н.А., Сульженко В.А. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие применимость данного метода для контроля дефектообразования в процессе СТП, приведены в работах авторов Rajaprakash B.M., Suresha C.N., Soundararajan V., Atharifar H., Дмитриева А.А., Полякова В.В. Большинство авторов отмечают в качестве ключевой проблемы, ограничивающей применимость метода АЭ, выделение полезных сигналов АЭ, связанных с процессами дефектообразования на фоне шума, вызванного сварочным процессом.

Предметом исследования являются метод, модели и методики акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в ходе формирования соединений СТП.

Объектом исследования является процесс образования дефектов малого раскрытия при формировании соединений СТП.

Целью исследования является повышение достоверности результатов контроля и качества изготовления соединений, выполняемых СТП, на основе применения комплексной методики АЭ контроля дефектообразования.

Задачами исследования являются:

1. Анализ особенностей контроля дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием.
2. Разработка модели образования и развития источников акустической эмиссии при дефектообразовании в процессе сварки трением с перемешиванием.
3. Разработка алгоритма обработки результатов акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединений сваркой трением с перемешиванием.
4. Разработка и практическая апробация комплексной методики акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП топливных баков РН «Ангара» из алюминиевых сплавов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Корректно обоснована применимость метода акустико-эмиссионного контроля образования дефектов в процессе СТП.
2. Разработана новая модель формирования источников акустической эмиссии при дефектообразовании, учитывающая значения действующих напряжений в сварном соединении в процессе СТП и преобразование акустических волн в подкрепленных оболочках вафельного типа. Характерной особенностью данной модели является объединение в ней частных моделей

образования и развития источников АЭ при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе сварки и модели процесса распространения упругих волн деформации, описывающей преобразование нормальных волн в тонкой цилиндрической оболочке, подкрепленной системой ребер жесткости, с помощью матриц преобразования прошедшего \mathbf{T} и отраженного \mathbf{R} полей.

3. Разработана схема локации, позволяющая повысить точность обнаружения источников АЭ при дефектообразовании в процессе формирования продольных и кольцевых соединений СТП, учитывающая влияние факторов, связанных с геометрическими параметрами, акустическими свойствами свариваемых заготовок и конструктивными особенностями сварочного оборудования.

4. Разработан новый алгоритм обработки результатов АЭ контроля дефектообразования в процессе СТП, основанный на выявлении АЭ активных областей, расчёте комплексного параметра АЭ и построении функции распределения данного параметра с целью идентификации процесса дефектообразования.

Теоретическая значимость работы

1. Разработана модель образования и развития источников акустической эмиссии при дефектообразовании в процессе СТП, позволившая аналитическим методом установить частотные зависимости долей упругой энергии, переносимых прошедшими и отраженными акустическими волнами в цилиндрической оболочке вафельного типа.

2. Эмпирическим методом установлено, что при формировании бездефектного соединения СТП параметры АЭ сигналов (N_{Σ} , \dot{N}_{Σ} , U_m , f_m) находятся в установленном диапазоне. Распределение данных параметров определяется работой источников АЭ при пластической деформации пластифицированного материала в зоне сварки, которые локализуются в области сварочного инструмента; при образовании дефекта в процессе сварки образуются области с максимальной концентрацией АЭ излучения.

3. Разработан алгоритм обработки результатов акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП, основанный на расчете комплексного параметра АЭ и построении функции распределения данного параметра с целью идентификации процесса дефектообразования. Предложен универсальный способ выбора оптимального положения преобразователей АЭ на объекте контроля.

Практическая значимость работы состоит в доведении результатов исследования до уровня инженерной методики, использование которой в прикладных задачах контроля позволяет выявлять дефекты типа «непровар в корне шва» высотой более 100 мкм в процессе формирования продольных и кольцевых соединений СТП и существенно повысить достоверность и информативность результатов контроля качества изготовления топливных баков РН «Ангара». Разработанный алгоритм обработки акусто-эмиссионных

данных может быть реализован при разработке методик АЭ контроля в процессе СТП конструкций различного назначения.

Методология и методы исследования

Для решения научно-технических задач используются экспериментальные и теоретические методы, в том числе методы теории пластичности, акустоупругости и прочности. При проведении исследований использовались методы цифровой обработки сигналов АЭ, математического моделирования и статистические методы обработки информации. Результаты, полученные при экспериментальных исследованиях, подтверждались результатами ультразвукового контроля и металлографического анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель формирования источников акустической эмиссии при дефектообразовании в процессе сварки трением с перемешиванием, объединяющая частные модели образования и развития источников АЭ при изменении НДС в процессе сварки и описывающая преобразование нормальных волн в подкрепленных оболочках вафельного с использованием матриц импедансов системы ребер жесткости и матриц собственных волновых сопротивлений несущей оболочки.

2. Алгоритм обработки результатов акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе сварки трением с перемешиванием, основанный на локализации областей с максимальной концентрацией АЭ излучения, расчете комплексного параметра АЭ для локализованных областей с целью идентификации процесса дефектообразования.

3. Комплексная методика акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе сварки трением с перемешиванием топливных баков РН «Ангара» из алюминиевых сплавов, регламентирующая процедуры контроля продольных и кольцевых сварных соединений.

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в работе, подтверждаются их согласованностью и соответствием законам теории пластичности, теории акустики и теории прочности, а также практической апробацией разработанной методики на предприятиях ракетно-космической отрасли, принятием в ходе исследования научно обоснованных допущений, непротиворечивостью результатов, получаемых с использованием разработанных моделей и методики, и результатов, полученных авторами с использованием других апробированных подходов, использованием при решении частных задач диссертационных исследований известных апробированных моделей и методов, широкой апробацией основных результатов, полученных в ходе исследования, на научно-практических конференциях, семинарах, а также на межведомственных и отраслевых совещаниях.

Реализация результатов работы

Основные результаты исследований реализованы в Учреждении науки ИКЦ СЭКТ, в ПО «Полет» - филиале АО «ГКНПЦ им. Хруничева» и отражены в Акте о внедрении результатов диссертационных исследований.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 19 конференциях, основными из которых являются II Международная научно-техническая конференция «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов», Санкт-Петербург, 2016; 22 Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 2017; IV Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, Новосибирск, 2017; 10 Международная научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP-2017, Сузdalь, 2017; X Всероссийская конференция «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли», Москва, 2018; 12th European Conference on Non-destructive Testing, Гетеборг, 2018; 6th International conference on NDT of HSNT & the 1st International conference on welding of WGI, Афины, 2018; 33-rd European Conference on Acoustic Emission Testing, Санлис, 2018; 11 Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP-2018, Сузdalь, 2018; NMTME -2019: International Scientific Conference «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering», Санкт-Петербург, 2019.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, в том числе в периодических изданиях из списка ВАК – 5 публикаций, из базы цитирования Web of Science, Scopus – 3 печатных работы, 2 научно-технических отчета о СЧ ОКР, 1 научно-технический отчет о СЧ НИР.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований, трех приложений. Содержит 156 страниц текста (без учета приложений), 61 рисунок и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, анализируется степень ее разработанности, формулируется научная задача, решаемая в диссертационной работе, определяются цель и задачи исследования, характеризуются теоретические и методологические основы диссертационной работы, аргументируются научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, приводится информация о результатах апробации предложений и выводов, содержащихся в работе.

В первой главе рассмотрены особенности реализации технологии СТП при создании крупногабаритных корпусных изделий РН.

Неразъёмное соединение методом СТП формируется за счет фрикционного взаимодействия сварочного инструмента (опорного бурта и рабочего стержня) с кромками свариваемых заготовок, вследствие которого

металл нагревается, переходит в состояние повышенной пластичности и перемешивается рабочим стержнем сварочного инструмента по всей глубине свариваемых заготовок.

Основными параметрами сварки трением с перемешиванием являются скорость вращения сварочного инструмента (рабочего стержня) ω , линейная скорость сварки (скорость подачи) v , угол наклона сварочного инструмента α , вылет рабочего стержня сварочного инструмента h , осевое усилие на опорном бурте сварочного инструмента при погружении и после выхода на режим, температура сварки T (рисунок 1).

В сравнении с методами сварки плавлением, макроструктура соединений, выполненных СТП, имеет ряд особенностей, одной из которых является образование структурных зон (рисунок 2): в центре – соединения ядра кольцеобразного строения, структурных зон термического (ЗТВ) и термомеханического влияния (ЗТМВ).

В ходе анализа особенностей реализации технологии СТП при создании крупногабаритных корпусных изделий РН – топливных баков выявлены основные факторы процесса СТП, приводящие к дефектообразованию.



Рис. 1 Схема положения сварочного инструмента при СТП

При формировании кольцевых сварных соединений тонкостенных оболочечных конструкций топливного бака РН семейства «Ангара» противодавление осуществляется с помощью кольца расширения, размещаемого внутри свариваемых обечаек. Кольцо расширения, оказывающее противодавление опорному бурту сварочного инструмента, состоит из шести круговых секторов с конечной клиновидной частью, соединенных с центральной частью через систему рычагов. Данная конструкция приводит к нарушению равной жесткости подкладной линейки, что является одной из ключевых причин, приводящих к возникновению наиболее вероятного и трудно выявляемого дефекта типа «непровар в корне шва» (incomplete penetration, «kissing bonds») (рисунок 3).



Рис. 2 Схема расположения структурных зон стыкового соединения СТП

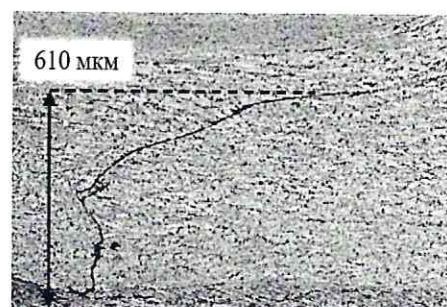


Рис. 3 Микроструктура корневой зоны соединения с дефектом типа «непровар в корне шва»

С целью расширения границ выявляемости дефектов методами рентгенографического и ультразвукового контроля обоснована применимость метода акустической эмиссии для контроля образования дефектов малого раскрытия в процессе СТП, как метода чувствительного к локальной динамической перестройке структуры материала на микроуровне. Определены основные источники АЭ, возникающие при образовании дефектов малого раскрытия типа «непровар в корне шва», что позволило получить необходимые исходные данные для разработки модели формирования источников акустической эмиссии в процессе СТП.

Во второй главе разработана модель формирования источников АЭ при дефектообразовании в процессе СТП. В предложенной модели объединены частные модели образования и развития источников АЭ при изменении НДС в процессе сварки и модели процесса распространения упругих волн деформации в подкрепленных оболочках ваффельного типа.

При разработке математической модели было предложено на первом этапе ввести некоторые допущения:

- динамический процесс сварки представлен в виде квазистатического последовательного «набора» схем нагружения сосредоточенной нагрузкой с изменением положения опорного бурта и прижимного устройства (ролика);
- при учете отклонения от цилиндричности (овальности) свариваемых кромок обечаек использовалось максимально допустимое значение по конструкторской документации;
- в качестве модели дефекта использовалась трещина в условиях упругопластического разрушения;
- данные о нагрузках взяты из документации на сварочные установки для формирования продольных и кольцевых сварных соединений топливных баков РН «Ангара».

Установлено, что в материале сварного соединения происходит изменение НДС, которое обусловлено комплексным действием механического и теплового нагружения в процессе сварки. Выполнены расчеты действующих напряжений и напряжений, возникающих у поверхности дефекта раскрытием от 5 мкм, высотой от 100 мкм. Результаты расчета позволили определить условия: размер дефекта, напряжение (при заданном положении опорного бурта и роликовых

прижимов относительно дефекта), величину отклонения от овальности обечайки, при которых возникают критические напряжения (превышающие $\sigma_{0,2}$) в зоне вершины дефекта (рисунок 4).

В результате расчета максимальных напряжений образцов сварных соединений в условиях одноосного нагружения получено, что при наличии дефекта типа «непровар в корне шва» раскрытием 5 мкм высотой более 100 мкм максимальные напряжения при вершине дефекта возрастают более чем в 10 раз.

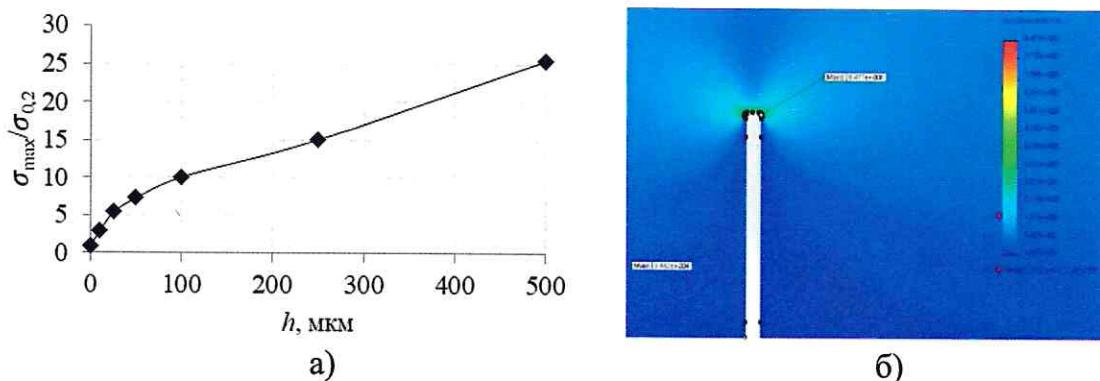


Рис. 4 Результаты расчета максимальных напряжений образцов с дефектом типа «непровар в корне шва» (а), эпюры распределения напряжений в области дефекта высотой 100 мкм (б)

Физические процессы, характеризующие стадии формирования сварных соединений, сопровождаются явлениями трения, зернограничного скольжения, образования и движения дислокационных скоплений, фазовых переходов. Данные явления, являясь основными источниками АЭ, сопровождаются излучением в объем материала свариваемых заготовок акустических волн.

В ходе анализа литературных источников выявлено, что в процессе пластификации материала сварочным инструментом при формировании соединения СТП основными источниками АЭ являются миграции дислокационных скоплений и двойникование при температуре сварки ($\sim 400^\circ$).

На основе эмпирических моделей АЭ при пластической деформации материалов и образовании микротрещин из дислокационных скоплений, предложенных Бойко В.С., Нациком В.Д., была разработана модель генерации АЭ сигналов при образовании дефектов в тонкостенных оболочечных конструкциях, в которой энергия $E_{\text{AЭ}}$ и длительность τ АЭ импульсов определены функцией от действующих напряжений при вершине дефекта.

Разрыв атомных связей происходит в момент, когда действующее напряжение достигает теоретической прочности для данного материала. Накопленная энергия деформации E_y при образовании разрыва распределяется между энергией γ , необходимой для образования поверхности микротрещины, энергией акустического излучения $E_{\text{AЭ}}$ и тепловой энергией E_t , генерируемой процессами движения и аннигиляции дефектов различных структурных уровней:

$$E_{\text{AЭ}} = E_y - \gamma - E_t. \quad (1)$$

При разработке модели распространения упругих волн деформаций задача о преобразовании нормальных волн в тонкой цилиндрической оболочке, подкрепленной системой ребер жесткости, решалась с помощью векторно-матричного подхода, предложенного Т.С. Кравцовой.

Использование данного подхода при решении задачи распространения нормальных волн позволило оценить частотные зависимости долей энергии, переносимых прошедшими и отраженными акустическими волнами при заданной геометрии ребра подкрепленной оболочки (рисунок 5).

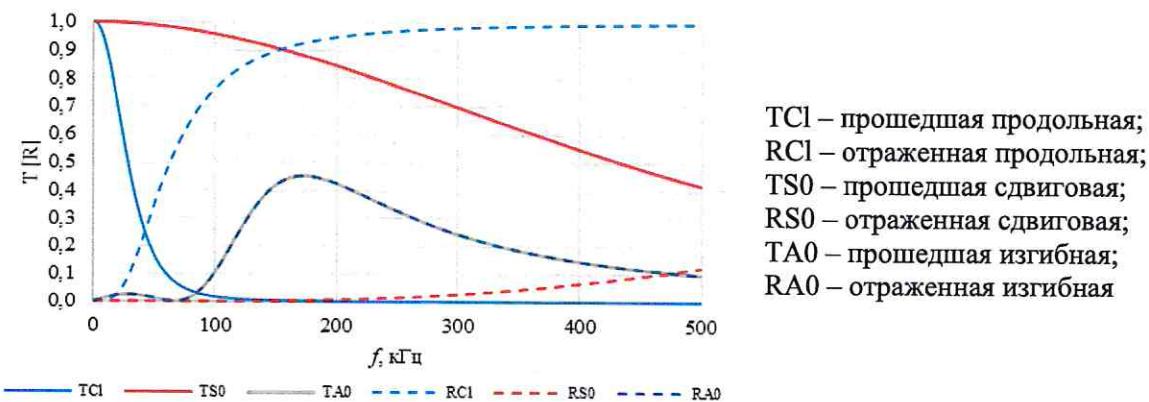


Рис. 5 Частотные зависимости долей энергии, переносимых акустическими волнами

Полученные аналитические зависимости при задании численных значений известных величин позволили дать объяснение эффекту ослабления асимметричной моды нулевого порядка нормальной волны Лэмба (A0) в подкреплённой оболочке вафельного типа, связанному с взаимной трансформацией волн Лэмба различного типа, а также с трансформацией в волну Рэлея. Результаты оценки фазовых скоростей нормальных волн Лэмба были учтены при разработке локационной схемы АЭ контроля и интерпретации энергетических параметров АЭ сигналов.

Решение частных задач, поставленных при разработке модели формирования источников АЭ при дефектообразовании в процессе СТП, позволило перейти к созданию алгоритма обработки информативных АЭ сигналов при контроле дефектообразования в процессе СТП.

В третьей главе разработан алгоритм обработки результатов акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе сварки трением с перемешиванием.

В результате статистической обработки АЭ данных, полученных при одноосном нагружении образцов сварных соединений, сформированы акустические образы (АЭ-портреты) стадий упругопластической деформации, предразрушения и развития трещины в сварных соединениях, позволяющие установить характерные особенности в распределении параметров АЭ при нагружении сварных соединений с дефектом типа «непровар в корне шва» и без дефектов (рисунок 6).

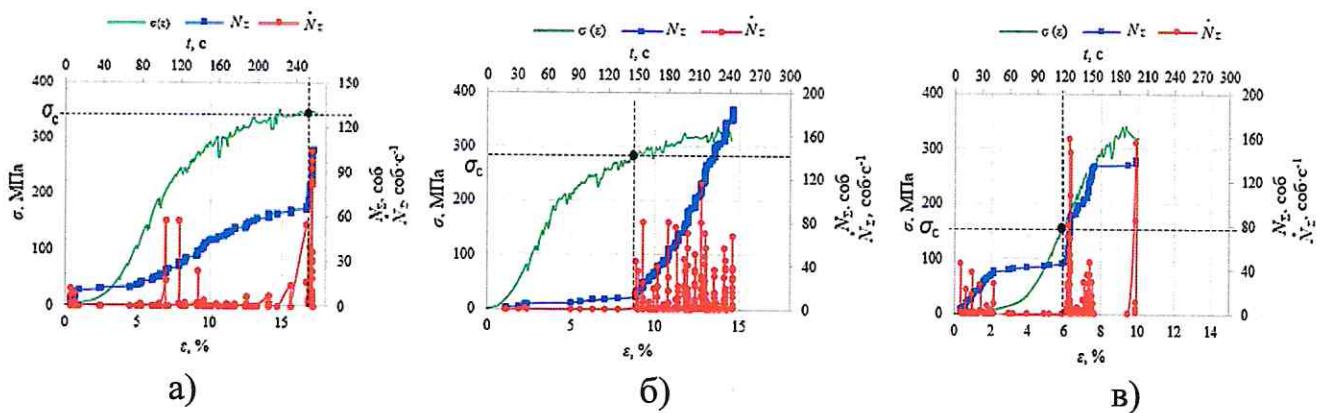


Рис. 6 Диаграммы распределения параметров АЭ при испытании образцов сварных соединений: а) – без дефектов (№№ 3А, 4А, 6А); б) – с дефектом «непровар в корне шва» высотой 100 мкм (№ 9Ад); в) – с дефектом «непровар в корне шва» высотой более 200 мкм (№ 10Ад)

Результаты сопоставительной оценки параметров АЭ сигналов, зарегистрированных при испытании образцов сварных соединений с дефектом типа «непровар в корне шва» (образцы №№ 9А, 10А) и без дефектов (образцы №№ 3А, 4А, 6А), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки параметров АЭ сигналов при испытании образцов сварных соединений

№ образца	U_m , мВ		$\Delta\tau$, мкс		f_m , кГц			σ_c , МПа
	$\sigma < \sigma_c$	$\sigma > \sigma_c$	$\sigma < \sigma_c$	$\sigma > \sigma_c$	$\sigma < \sigma_c$	$\sigma > \sigma_c$	Δf_m	
3А	265,9	470,8	11,9	6,9	165,2	294,4	129,2	324
4А	191,5	417,1	7,3	7,0	232,4	409,2	176,8	352
6А	244,0	601,5	9,7	3,9	216,7	304,8	88,1	326
9Ад	250,4	685,4	8,1	7,5	194,9	218,1	24	282
10Ад	691,2	1492	9,8	8,7	166,6	194,8	28	156

Установлено, что для образцов сварных соединений с дефектом (№ 9Ад, № 10Ад) изменение характера распределения значений амплитуды U_m , длительности переднего фронта $\Delta\tau$ и медианной частоты f_m АЭ сигналов при достижении критического напряжения срабатывания источника σ_c свидетельствует о смене доминирующих механизмов образования источников АЭ, связанных с началом развития дефекта «непровар в корне шва».

Результаты анализа информативных параметров АЭ при одноосном нагружении образцов сварных соединений показали чувствительность числа импульсов N_Σ и активности \dot{N}_Σ акустической эмиссии, амплитуды U_m , длительности переднего фронта $\Delta\tau$ и медианной частоты f_m к развитию дефекта типа «непровар в корне шва» при увеличении действующей нагрузки.

Полученные результаты были использованы при анализе АЭ сигналов, зарегистрированных при имитации дефектообразования в процессе сварки.

Для повышения достоверности принятия решения о моменте зарождения и развития дефекта предложено использовать комплексный параметр акустической эмиссии P_{AE} , определяемый функцией от числа импульсов, амплитуды (энергии) и длительности переднего фронта:

$$P_{A\dot{E}} = f(U_m, N_\Sigma, 1/\Delta\tau) = 0,7 \cdot \frac{U_m}{\Delta\tau} \cdot \ln(N_\Sigma). \quad (2)$$

Установлены значения напряжений σ_c , при которых изменяется функция распределения комплексного параметра АЭ $P_{A\dot{E}} = f(U_m, N_\Sigma, 1/\Delta\tau)$ для образцов сварных соединений с дефектом типа «непровар в корне шва» и без дефектов.

В ходе экспериментальных исследований с имитацией дефектообразования в процессе СТП установлено, что при формировании бездефектного сварного соединения параметры АЭ сигналов ($N_\Sigma, \dot{N}_\Sigma, U_m, f_m$) находятся в заданном диапазоне, зависящем от свойств материала и параметров настройки АЭ оборудования. Распределение параметров АЭ сигналов определяется работой источников АЭ при пластической деформации пластифицированного материала в зоне сварки, которые локализуются в области сварочного инструмента. В таблице 2 приведены значения основных параметров АЭ сигналов, зарегистрированных в ходе формирования сварных соединений с имитацией процесса дефектообразования и при локальном механическом перемешивании (ЛМП) материала сварочным инструментом без соединений деталей.

Схема экспериментальной установки АЭ контроля в процессе СТП приведена на рисунке 7.

Таблица 2 – Основные параметры АЭ сигналов

Группы образцов для исследований	№ образца	Описание	Число импульсов АЭ (N_Σ)	Кол-во информативных АЭ сигналов*, %	Время сварки (t_{cb}), с	Средняя активность АЭ (\dot{N}_Σ), соб/с	Суммарная амплитуда АЭ в АО (U_Σ), мВ	Медианная частота АЭ сигналов (f_m), кГц	Длина сварного шва, мм
Бездефектные	«1-1»	ЛМП	39	12,7	73,1	0,5	989,1	150,2±15,5	292
	«1-2»	ЛМП	23	10,6	91,3	0,3	620,8	148,6±12,3	365
	«1-3»	ЛМП	21	14,2	50,4	0,4	640,5	150,2±14,9	201
С имитацией дефектов	«2-1»	СТП, Зотв.	56	83,6	54,7	1,1	1164,2	172,3±11,5	208
	«2-2»	СТП, Зотв.	50	76,9	47,6	1,1	2112,1	168,7±13,7	200
	«2-3»	СТП, 12отв	48	78,7	47,4	1,0	1919,8	171,8±15,8	196

*Доля АЭ сигналов, удовлетворяющих условиям фильтрации по амплитуде и частоте, локализованных в области сварного соединения, от общего числа зарегистрированных АЭ сигналов (%);

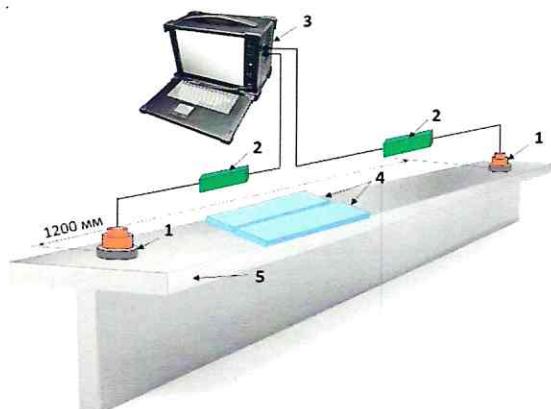
**ЛМП – локальное механическое перемешивание;

*** АО – АЭ-активные области: источники АЭ с максимальной концентрацией АЭ излучения

При образовании дефектов в процессе сварки формируются АЭ-активные области (АО) с максимальной концентрацией АЭ излучения.

На рисунке 8 приведены результаты локализации АО при формировании сварных соединений с имитацией процесса дефектообразования и при ЛМП материала сварочным инструментом.

В ходе анализа результатов локализации источников АЭ выявлено, что АО расположены в участках сварного соединения с нарушением однородности структуры, вызванной имитацией процесса дефектообразования с помощью технологических отверстий в кромках.



1 – преобразователь АЭ (ПАЭ);
2 – предварительные усилители АЭ;
3 – АЭ система; 4 – свариваемые заготовки;
5 – подкладная линейка

Рис. 7 Схема экспериментальной установки по АЭ контролю в процессе СТП

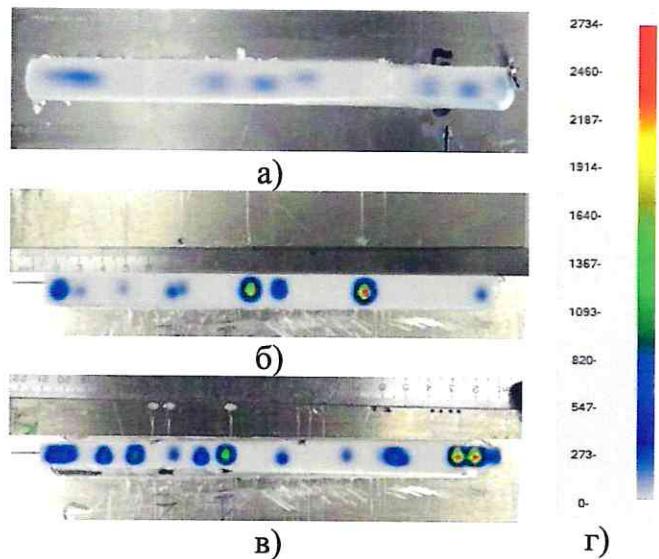


Рис. 8 Плотность локации АЭ сигналов:
а) – образец «1-1»; б) – образец «2-1»;
в) – образец «2-3»; г) – цветометрическая
шкала (значение U_{Σ} , мВ)

В основу алгоритма обработки результатов акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП положены регистрация, обработка и отображение в реальном времени следующих данных: номера первого принялого сигнала ПАЭ (номер зоны контроля); число импульсов АЭ N_{Σ} ; координаты зарегистрированного сигнала АЭ (x, y); амплитуду сигналов АЭ U_m ; время регистрации сигнала АЭ t ; длительность переднего фронта сигнала АЭ $\Delta\tau$; координаты АО (x_i, y_i, R_i); значение суммарной амплитуды АО $U_{\Sigma}^{[i]}$ (для каждой i -ой АО); значение активности АЭ в АО $\dot{N}_{\Sigma \max}^{[i]}$ (для каждой i -ой АО).

Последовательность операций по АЭ контролю при реализации разработанного алгоритма приведена на блок-схеме (рисунок 9).

Количественные критериальные значения, используемые в качестве диагностических признаков наличия АЭ сигнала от дефекта в АО в процессе сварки, получены в ходе испытаний образцов сварных соединений на одноосное растяжение ($N_{\Sigma}^{\text{пор}}, \dot{N}_{\Sigma \max}^{\text{пор}}$) и при имитации процесса дефектообразования ($U_{\Sigma}^{\text{пор}}$).

Комплексный параметр АЭ для выделенных АО областей рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\text{AЭ}}^{[i]} = f \left(U_{\Sigma}^{[i]}, N_{\Sigma}^{[i]}, 1/\Delta\tau^{[i]} \right) = 0,7 \cdot \frac{U_{\Sigma}^{[i]}}{\Delta\tau^{[i]}} \cdot \ln(N_{\Sigma}^{[i]}). \quad (3)$$

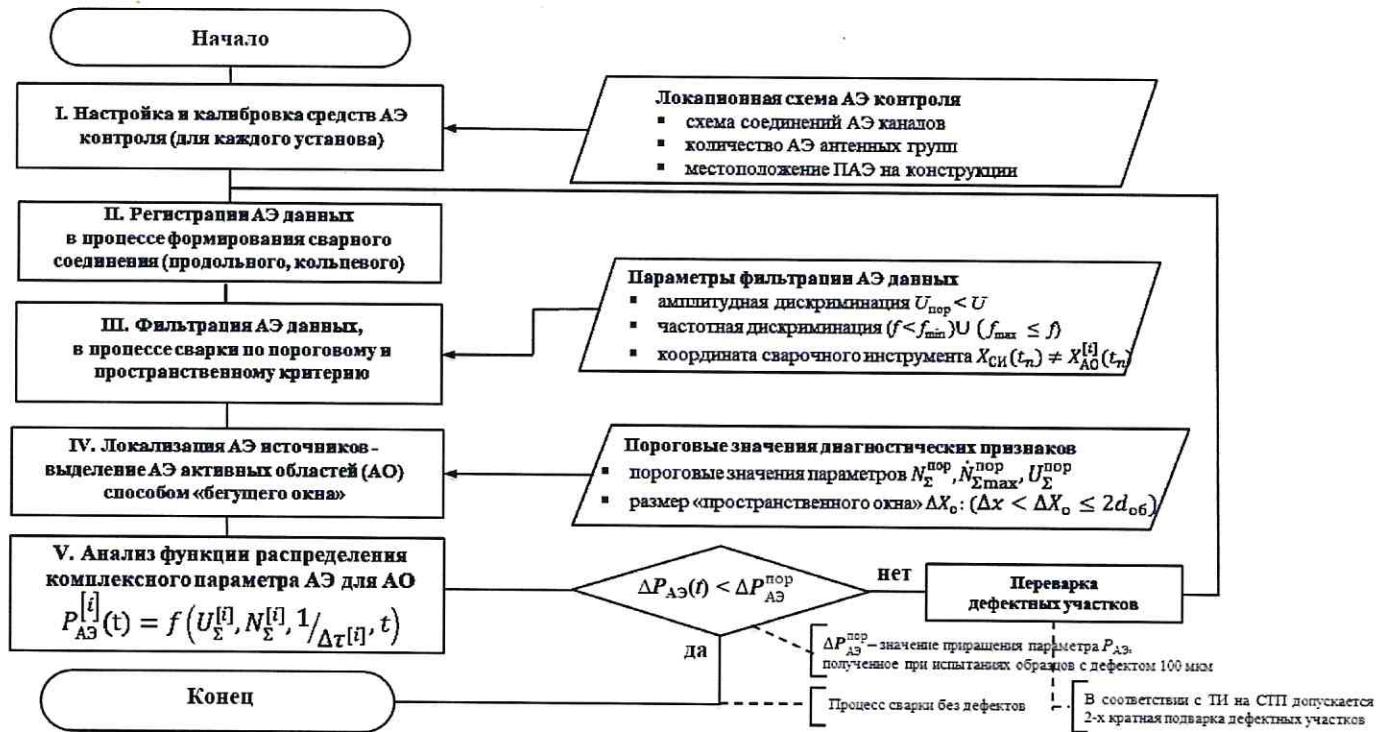
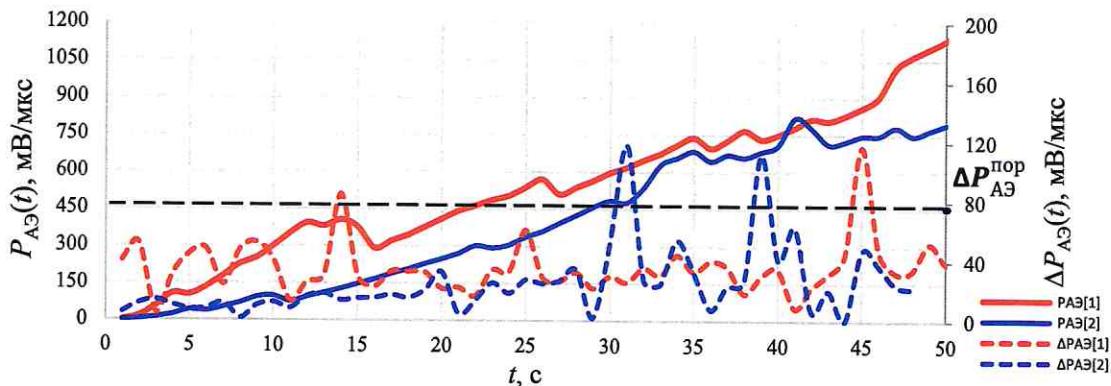


Рис. 9 Блок-схема алгоритма обработки результатов акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП

На рисунке 10 представлены графики распределения комплексного параметра АЭ $P_{AЭ}$, рассчитанного в соответствии с выражением (3) для АО, выявленных при имитации процесса дефектообразования в образце «2-1».

Пороговое значение приращения комплексного параметра АЭ $\Delta P_{AЭ}^{\text{пор}}$ определено по результатам испытаний образцов сварных соединений на одноосное растяжение с дефектом «непровар в корне шва» высотой 100 мкм.



$P_{AЭ}[1]/[2]$ – значения $P_{AЭ}$ для АО №1/№2; $\Delta P_{AЭ}[1]/[2]$ – приращение $P_{AЭ}$ для АО №1/№2

Рис. 10 Графики распределения комплексного параметра АЭ $P_{AЭ}$ при имитации процесса дефектообразования в образце «2-1»

Апробированный на образцах, выполненных СТП, алгоритм был положен в основу разработки методики акусто-эмиссионного контроля дефектов малого раскрытия в процессе СТП продольных и кольцевых соединений топливных баков РН «Ангара».

В четвертой главе разработана комплексная методика акусто-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП топливных баков РН «Ангара» из алюминиевых сплавов.

Ключевой особенностью данной методики является осуществление контроля, обработка и анализ результатов контроля в процессе сварки.

Области дефектообразования при АЭ контроле в процессе СТП идентифицируются по пространственному признаку, как места повышенной концентрации сопутствующего дефектообразованию АЭ излучения, и выявляются в виде АО. По разработанной методике:

- производится оценка сварных швов по наличию, местоположению (координатам) и типам АО. Расстояние от места ввода сварочного инструмента до центра АО принимается за координату АО в данном сварном соединении;
- устанавливается момент зарождения и развития АО;
- по комплексному параметру АЭ оценивается склонность АО к развитию в поле термических и технологических напряжений.

Требования к основным параметрам и техническим характеристикам применяемого АЭ оборудования сформулированы на основе результатов расчетно-экспериментальных исследований и требований нормативного документа РД 03-300-99 «Требования к акусто-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов».

Разработаны и апробированы локационные схемы АЭ контроля для установок СТП продольных и кольцевых (рисунок 11) соединений топливных баков РН «Ангара» с учетом геометрических параметров и акустических свойств свариваемых заготовок, конструктивных особенностей элементов сварочного оборудования и возможностей аппаратных средств контроля, позволившие повысить точность локации дефектов малого раскрытия.

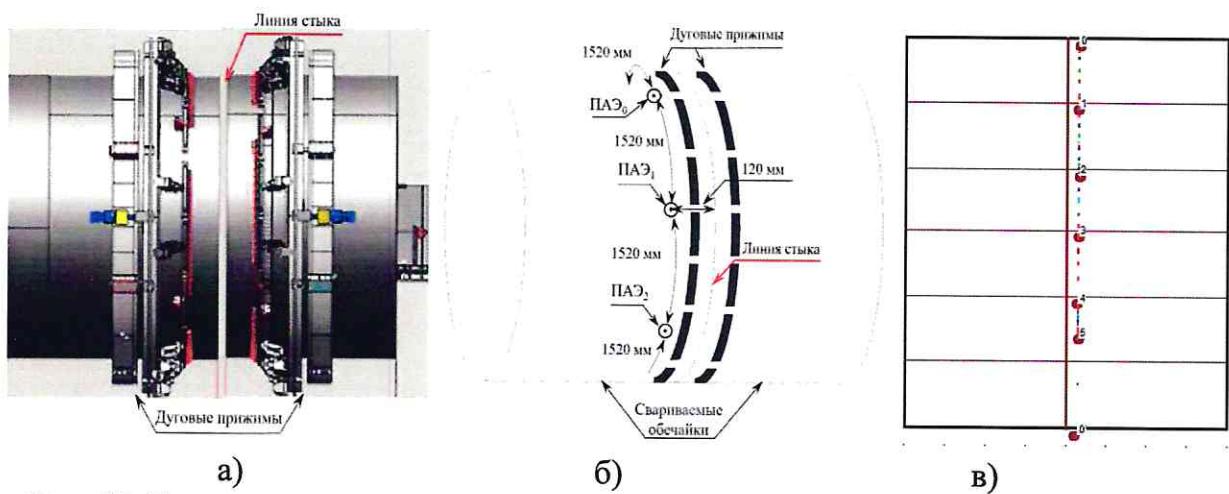


Рис. 11 Схема локации кольцевых соединений для установки KR003: а) – эскиз установки; б) – схема расположения ПАЭ (№№0, 1, 2); в) – результаты локации

При оценке технической эффективности разработанной методики оценивались показатели достоверности и оперативности контроля.

Достоверность контроля оценивалась в соответствии с ГОСТ Р 50.04.07-2018 «Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля» по следующему выражению:

$$\mathcal{D} = \frac{n_{\text{п.о.}}}{n_{\Sigma}} = \frac{n_{\Sigma} - n_{\text{пер}} - n_{\text{пр}}}{n_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где \mathcal{D} – достоверность контроля;

$n_{\text{п.о.}}$ – сумма правильно определенных элементов (дефектов);

n_{Σ} – сумма всех элементов (дефектов);

$n_{\text{пер}}$ – перебраковка (негодные элементы только по результатам контроля);

$n_{\text{пр}}$ – пропуск (элементы признаны годными по результатам контроля из числа негодных элементов, определенных эталонным методом).

В качестве эталонного метода использовался эхо-метод ультразвукового контроля с применением преобразователей на фазированных антенных решетках.

Оперативность контроля оценивалась в соответствии с выражением:

$$\delta = \frac{t_{\text{изг}}^{\text{T}} - t_{\text{изг}}^{\text{M}}}{t_{\text{изг}}^{\text{T}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где δ – оперативность АЭ контроля;

$t_{\text{изг}}^{\text{T}}$ – время, затрачиваемое на изготовление с применением традиционных методов НК;

$t_{\text{изг}}^{\text{M}}$ – время, затрачиваемое на изготовление с применением разработанной методики.

При оценке технической эффективности методики установлено повышение оперативности контроля на 29 % в сравнении с результатами, полученными с применением стандартизованных методик ультразвукового контроля. Повышение оперативности обусловлено интеграцией процедур АЭ контроля в технологический цикл сварки.

Достоверность контроля с применением разработанной методики составила 0,8. Данный показатель в среднем на 15% выше достигнутого уровня традиционными методами НК за счет выявляемости дефектов малого раскрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, были получены следующие научные, теоретические и практические результаты:

1. Разработана модель формирования источников акустической эмиссии при дефектообразовании в СТП, в которой объединены частные модели образования и развития источника АЭ при изменении НДС в процессе сварки и модели процесса распространения упругих волн деформации в подкрепленных

оболочках вафельного типа. Обобщенный векторно-матричный подход к решению задачи распространения нормальных волн позволил оценить элементы импедансных матриц систем препятствий оболочек различной геометрической формы. В частной модели генерации АЭ сигналов при образовании дефектов типа «непровар в корне шва» в тонкостенных оболочечных конструкциях энергия $E_{AЭ}$ и длительность τ АЭ импульсов определены как функция от действующих напряжений при вершине дефекта.

2. Разработан алгоритм обработки результатов акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП, основанный на выявлении АО, расчете комплексного параметра АЭ $P_{AЭ}$ и построении функции распределения данного параметра с целью идентификации процесса дефектообразования в процессе сварки. В результате статистической обработки АЭ данных, полученных при одноосном нагружении образцов сварных соединений, сформированы АЭ-портреты стадий упругопластической деформации, предразрушения и развития трещины в соединениях СТП с дефектом типа «непровар в корне шва» и без дефектов. В ходе экспериментальных исследований установлены критериальные (пороговые значения) информативных параметров АЭ.

3. Разработана комплексная методика акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе СТП топливных баков РН «Ангара» из алюминиевых сплавов, устанавливающая требования к организации работ по проведению АЭ контроля в процессе СТП, требования к АЭ оборудованию, порядок подготовки и проведения АЭ контроля в процессе сварки, определяющие основные этапы обработки АЭ данных в процессе СТП.

4. Разработаны и апробированы локационные схемы АЭ контроля для установок СТП продольных и кольцевых соединений топливных баков РН «Ангара». В результате апробации локационных схем, разработанных с учетом геометрических параметров и акустических свойств свариваемых заготовок, конструктивных особенностей элементов сварочного оборудования и возможностей аппаратных средств АЭ контроля, погрешность локации дефектов малого раскрытия вдоль свариваемых кромок обечаек не превысила 1,3 % от максимального расстояния между ПАЭ в зоне контроля.

5. В ходе практической апробации методики акустико-эмиссионного контроля дефектов малого раскрытия в процессе СТП продольных и кольцевых соединений топливных баков РН «Ангара» установлено, что, наряду с повышением оперативности контроля на 29 %, достоверность контроля составила 0,8 и в среднем на 15% превысила достигнутый уровень стандартизованных методик.

Основные результаты исследований реализованы в Учреждении науки ИКЦ СЭКТ (г. Санкт-Петербург), ПО «Полет» - филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Омск). Результаты внедрения отражены в Акте о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы от 26.05.2020 г.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы цитирования Scopus и Web of Science

1. Stepanova, K. Application of acoustic emission and laser optoacoustics at various stages of defect formation during friction stir welding / Stepanova K., Kinzhagulov I., Yakovlev Y. // IOP: Conference Series - 2019, Vol. 1421, No. 1, pp. 012022.
2. Stepanova, K.A. The results of the defect formation control in welded joints during friction stir welding by acoustic emission / Stepanova K.A., Kinzhagulov I.Y., Iuferev R., Levkova I.V., Kovalevich A.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - 2019, Vol. 666, No. 1, pp. 012010.
3. Stepanova, K.A. Applying Laser-Ultrasonic and Acoustic-Emission Methods to Nondestructive Testing at Different Stages of Deformation Formation in Friction Stir Welding / Stepanova K.A., Kinzhagulov I.Y., Kovalevich A.S., Alifanova I.E., Ashikhin D.S., Yakovlev Y.O. // Russian Journal of Nondestructive Testing - 2020, Vol. 56, No. 3, pp. 191-200.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

4. Степанова, К.А. Исследование степени влияния изменения параметров «толщина» и «зазор» на качество стыковых сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Котовчиков И.О., Федоров А.В., Свитнев И.В., Яковлев Ю.О., Быченок В.А. // Сварочное производство - 2018. - № 9. - С. 15-22.
5. Степанова, К.А. Анализ факторов, определяющих качество сварных стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Федоров А.В., Алифиренко Е.А., Спирков А.Б., Яковлев Ю.О., Быченок В.А. // Технология машиностроения - 2018. - № 7. - С. 18-23.
6. Степанова, К.А. Обеспечение качества стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Котовчиков И.О., Федоров А.В., Свитнев И.В., Яковлев Ю.О., Быченок В.А. // Технология машиностроения - 2018. - № 8. - С. 41-47.
7. Степанова, К.А. Анализ факторов, определяющих качество сварных стыковых алюминиевых соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Федоров А.В., Алифиренко Е.А., Спирков А.Б., Быченок В.А., Яковлев Ю.О. // Сварочное производство -2019. - № 5. - С. 37-43.
8. Степанова, К.А. Применение лазерно-ультразвукового и акусто-эмиссионного методов неразрушающего контроля на различных этапах дефектообразования при сварке трением с перемешиванием / Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю., Яковлев Ю.О., Ковалевич А.С., Ашихин Д.С., Алифанова И.Е. // Дефектоскопия - 2020. - № 3. - С. 3-13.

Статьи в других научных изданиях

9. Степанова, К.А. Результаты применения автоматизированного метода оптического контроля технологического процесса сварки трением с перемешиванием / Ашихин Д.С., Беркутов И.В., Степанова К.А., Костюхин А.С., Яковлев Ю.О., Федоров А.В. // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции ARMIMP-2017 (Сузdalь, 1–4 октября 2017 г.) - 2017. - Т. X. - С. 245-248.

10. Степанова, К.А. Технология контроля качества соединений, выполняемых сваркой трением с перемешиванием / Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю., Могутов Т.С., Краснов И.О // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции ARMIMP-2017 (Сузdalь, 1–4 октября 2017 г.) - 2017. - Т. X. - С. 241-244.
11. Stepanova, K.A. The analysis of the acoustic emission method applicability in researching the defect formation during the friction stir welding process / Stepanova K.A., Kinzhagulov I.Y, Fedorov A.V., Ashikhin D.S. //Proceedings 12th European Conference on Non-destructive Testing, IET - 2018, pp. 1-2.
12. Степанова, К.А. Результаты экспериментальных исследований процесса дефектообразования в процессе формирования соединений сваркой трением с перемешиванием с применением метода акустической эмиссии // Сборник тезисов IV международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Новосибирск, 27–30 июня 2017 г.) - 2017. - С. 76.
13. Степанова К.А. Анализ применимости метода акустической эмиссии при исследовании образования дефектов в процессе формирования соединений сваркой трением с перемешиванием // Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы» (Москва, 21-24 ноября 2017 г. Сборник Материалов - 2017. - С. 345-346.
14. Степанова, К.А. Результаты экспериментальной апробации акустико-эмиссионного контроля дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием / Степанова К.А., Сысунов Н.Д. //Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых // Электронное издание [Электронный ресурс] - 2018.
15. Степанова, К.А. Результаты акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в сварных соединениях, выполняемых сваркой трением с перемешиванием Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю., Ковалевич А.С., Сысунов Н.Д., Ашихин Д.С. // Политранспортные системы: X Международная научно-техническая конференция (Новосибирск, 15-16 ноября 2018 г.): тезисы докладов - 2018. - С. 262-264.
16. Степанова, К.А. Результаты испытаний на малоцикловую усталость материалов, выполненных по технологии селективного лазерного сплавления, с применением метода акустической эмиссии / Ковалевич А.С., Кинжагулов И.Ю., Степанова К.А., Сысунов Н.Д. // Тезисы докладов конференции "Приборы и методы Неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов" - 2018. - С. 68.
17. Степанова, К.А. Результаты исследования кинетики разрушения материалов, выполненных по технологиям селективного лазерного сплавления, с применением метода акустической эмиссии / Кинжагулов И.Ю., Степанова К.А., Ковалевич А.С., Ильинский А.В., Краснов И.О. //Политранспортные системы: X Международная научно-техническая конференция (Новосибирск, 15-16 ноября 2018 г.): тезисы докладов - 2018. - С. 264-266.
18. Степанова, К.А. Методические основы акустико-эмиссионного контроля дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием / Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю. //Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО [Электронный ресурс] – 2019.