

На правах рукописи

Григорьев Егор Витальевич



**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ
УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ**

*Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и
диагностики материалов, изделий, веществ и природной
среды*

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

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Носов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

Будадин Олег Николаевич

доктор технических наук, акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»), отдел технической диагностики и неразрушающего контроля, главный научный сотрудник;

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич

кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, лаборатория физики прочности, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится **27 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 27 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сварные соединения являются ресурсопределяющими элементами технических объектов, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок. Характеристики длительной прочности определяют состояние этих элементов и сказываются на показателях их долговечности. Согласно отчетности Ростехнадзора число аварий на производственных объектах газораспределения, в том числе и на опасных производственных объектах (ОПО), работающих в условиях повторно-переменных нагрузок, причиной которых установлены разрывы сварных стыков, вследствие развития в них опасных дефектов, каждый год увеличивается в среднем на 3% от общего числа всех аварий. В этой связи возникает необходимость совершенствования методов контроля и диагностики сварных соединений, первичные параметры которых связываются с показателями состояния, обеспечивающими надежность и безопасность технических объектов.

Повышение сопротивляемости разрушению сварных соединений достигается с помощью воздействия на них упрочняющих обработок, предназначенных для численного увеличения заданных прочностных характеристик. Под упрочняющей обработкой понимается технологическое воздействие на сварное соединение, которое приводит к созданию упрочнения, т.е. применение различных специальных операций в технологических процессах, которые приводят к необратимому повышению сопротивляемости разрушению материалом. Критерием оценки влияния упрочняющих обработок является степень упрочнения, учитывающая изменение заданной характеристики по сравнению с исходным значением. Для сварных соединений, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок, критериями оценки

упрочнения могут выступать изменения характеристик, связанных с длительной прочностью (предел выносливости) и долговечностью (число циклов до разрушения). Однако, ввиду различных причин, упрочняющие воздействия не всегда приводят к желаемому результату, что обязывает проводить проверку упрочнения без нарушения целостности объекта контроля.

Процессы, приводящие к росту и накоплению повреждений в сварном соединении, негативно влияют на их сопротивляемость разрушению. Поэтому контроль за эволюцией данного процесса позволяет оценить результат воздействия упрочняющих обработок. Существующие методы неразрушающего контроля, предназначенные для оценки влияния упрочняющих обработок, могут быть классифицированы с учетом типа первичного контролируемого параметра и его взаимосвязи с процессами, приводящими к росту и накоплению повреждений. Сигналы, регистрируемые методами прохождения и отражения вводимых извне волн различных физических полей, могут быть неоднозначно связаны с процессом роста повреждений. Данная группа методов фиксирует искажения от крупных отражателей, оглябая мелкомасштабные неоднородности структуры. При этом, долговечность сварных соединений определяется на субмикроскопическом масштабном уровне. Кроме того, воздействие упрочняющих обработок на сварное соединение сказывается на неоднородности его прочностных свойств, структуры, а также напряженно-деформированного состояния. Следовательно, такое воздействие влияет на связь первичных параметров данных методов контроля с процессами, определяющими долговечность сварных соединений. Поэтому предпочтительными являются методы контроля, основанные на фиксации излучения упругих волн из сварного соединения, так как данные сигналы могут быть связаны с процессом роста и

накопления повреждений сварного соединения. К таким неразрушающим методам относятся электромагнитная и акустическая эмиссии (АЭ). Однако, возникает основная проблема АЭ контроля, которая связана со сложностью интерпретации результатов регистрации первичных параметров АЭ и их связи с показателями долговечности. Кроме того, контроль влияния упрочняющих обработок на сварные соединения реального объекта осложнен неоднородностью условий контроля и ограниченной доступностью объекта.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в решение проблемы неразрушающего контроля и диагностики сварных соединений и оценки их прочностных свойств и прогнозирования долговечности, метода акустической эмиссии внесен такими учеными, как Барат В.А., Башкарев А.Я., Бигус Г.А., Бобров С.В., Буйло С.И., Быков С.П., Веттегрень В.И., Виноградов А.Ю., Грешников В.А., Дробот Ю.В., Елизаров С.В., Иванов В.И., Куксенко В.С., Махмудов Х.В., Махутов Н.А., Мерсон Д.Л., Науменко А.П., Нефедьев Е.Ю., Петерсен Т.Б., Петров В.А., Регель В.Р., Слуцкер А.К., Степанова Л.Н., Томашевский Э.Е., Druillard T.F., Williams R.V., Kemp, D.T., Lockner D.A. и др., а также различными институтами, специализирующихся на данном вопросе.

Однако в работах данных авторов не уделено достаточно внимания вопросам оценки упрочняющего воздействия в условиях влияния неоднородности свойств, структуры и напряженно-деформированного состояния сварного соединения на параметры акустической эмиссии. Решение данной проблемы предлагается вести на основе анализа результатов акустико-эмиссионного контроля с позиции многоуровневой модели временной зависимости при диагностическом нагружении сварных соединений. Работа

является продолжением направления, защищенного ранее в диссертациях Носова В.В. (1988 г., 1997 г.), Буракова И.Н. (2004 г.), Ельчанинова Г.С. (2011 г.), Лаврина В.Г. (2011 г.), Лаховой Е.Н. (2012 г.), Зеленского Н.А. (2016 г.).

Содержание диссертационного исследования соответствует паспорту научной специальности

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки) по п. 1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надежности изделий и экологической безопасности окружающей среды» и п. 7 «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоемкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды».

Объектом исследования является акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющего воздействия.

Предмет исследования – изменение параметров акустической эмиссии сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющего воздействия.

Целью работы является обоснование информативных параметров и алгоритма обработки регистрации сигналов акустической эмиссии для совершенствования контроля сварных соединений, подвергнутых влиянию упрочняющих обработок.

Идея работы – совершенствование алгоритма обработки сигналов акустической эмиссии сварных соединений на основе выделения потока сигналов, связанных с

определяющим характеристики прочности разрушением структурных элементов упрочняемых сварных соединений.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Литературный обзор, анализ и обобщение опубликованных работ, посвященных способам повышения сопротивляемости длительному разрушению сварных соединений и методам их контроля.

2. Обоснование метода акустической эмиссии как средства наблюдения за процессом накопления повреждений, определяющим сопротивляемость сварного соединения длительному разрушению.

3. Обоснование показателя упрочнения, связанного с параметрами акустической эмиссии, для оценки эффективности влияния воздействия упрочняющих обработок на сварные соединения.

4. Разработка и апробация методики проведения экспериментальных исследований по оценке влияния упрочняющих обработок сварных соединений на сигналы акустической эмиссии.

5. Исследование взаимосвязи предложенного акустико-эмиссионного показателя упрочнения с результатами разрушающих усталостных испытаний сварных соединений.

6. Разработка проекта методики по применению метода контроля влияния упрочняющих обработок на сварные соединения промышленных объектов.

Научная новизна работы:

1. В качестве первичного информативного акустико-эмиссионного параметра, регистрируемого при равномерном нагружении сварного соединения, предложено использовать времена прихода сигналов акустической эмиссии, позволяющие выделять из общего потока импульсов

информацию, необходимую для оценки упрочняющей обработки.

2. Предложен акустико-эмиссионный показатель, определяемый по результатам оперативных диагностических испытаний, и критерий упрочнения сварных соединений, подверженных упрочняющим обработкам.

3. Экспериментально установлена взаимосвязь предложенного акустико-эмиссионного показателя с долговечностью сварных соединений, полученных стандартными методами.

4. Разработана методика акустико-эмиссионного контроля сварных соединений, подверженных упрочняющим обработкам, отличающаяся своей оперативностью и простотой аппаратного оформления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Совершенствование обработки результатов регистрации акустической эмиссии, как метода неразрушающего контроля состояния технических объектов, природной среды, веществ, материалов и изделий с учетом особенностей объекта контроля.

2. Обоснована взаимосвязь предложенного акустико-эмиссионного показателя с показателями долговечности сварных соединений.

3. Разработан способ оценки качества упрочняющей обработки, защищенный патентом Российской Федерации.

4. Разработан алгоритм по автоматизированному определению степени упрочнения сварных соединений на основе результатов регистрации сигналов акустической эмиссии.

5. Разработан проект методики и практические рекомендации по применению метода акустической эмиссии и обработки полученных результатов для оценки влияния

упрочняющих обработок на сварные соединения промышленных объектов.

6. Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность АО «РАТТЕ», что подтверждено актом внедрения от 12.06.2024 г.

Методология и методы исследования. Опираются на научный анализ, включающий обобщение и обработку ранее опубликованных результатов теоретических и экспериментальных исследований по влиянию и оценке упрочняющих воздействий на сварные соединения, на модель потока временной зависимости числа импульсов акустической эмиссии, результаты экспериментальных исследований процесса разрушения и акустической эмиссии сварных соединений, физического и имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения. Экспериментальные исследования проведены с использованием сертифицированной автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы на сваренных в единое целое плоских образцах с технологическими воздействиями упрочняющих обработок, испытанных в процессе статического растяжения. Все исследования проводились на базе Санкт-Петербургского горного университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Степень упрочнения сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих обработок, предлагается определять акустико-эмиссионным показателем G_{AE} , рассчитываемым по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии в условиях диагностического нагружения до и после воздействия упрочнения на сварные соединения.

2. Участок временной зависимости числа импульсов акустической эмиссии технологически упрочняемого сварного соединения, необходимый для определения предложенного

показателя, предлагается идентифицировать после существенного или полного затухания активности акустической эмиссии, регистрируемой при его диагностическом нагружении.

Степень достоверности результатов исследования. Подтверждается результатами метрологических поверок оборудования, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного моделирования, сравнением с результатами, полученными в известных работах, результатами статистической обработки экспериментальных исследований, публикацией результатов в рецензируемых научных журналах.

Апробация результатов. Основное содержание диссертационной работы представлялось, докладывалось и обсуждалось на: Международном симпозиум «Нанofизика и Наноматериалы НиН-2021» (г. Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2021); Международном симпозиум «Нанofизика и Наноматериалы НиН-2023» (г. Санкт-Петербург, 22–23 ноября 2023 г.).

Личный вклад автора состоит в проведении литературного обзора отечественных и международных источников посвященных оценке влияния упрочняющих обработок на сварные соединения, непосредственном участии на всех этапах диссертационного исследования, личном участии в разработке методики проведения экспериментальных исследований, в выборе и реализации воздействия упрочняющих обработок на сварные соединения, в выборе тестового нагружения, в обработке и интерпретации полученных результатов, в формулировании рекомендаций по оптимизации упрочняющих воздействий на сварные соединения, в описании и реализации алгоритма автоматизированного определения степени упрочнения, в апробации результатов исследования на российских и

международных конференциях, в подготовке публикаций по результатам выполненной работы.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований и 2 приложения. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 29 иллюстраций и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены обзор и классификация способов увеличения сопротивления разрушению сварных соединений технических объектов, длительно работающих при низких напряжениях в условиях повторно переменных нагрузок и ограничивающих долговечность технических объектов. Рассмотрены и классифицированы методы контроля для оценки влияния упрочняющего воздействия на сварные соединения. Предложен критерий оценки такого влияния. Установлены механизмы влияния упрочняющих обработок, оказывающие воздействия на структуру и напряженное

состояние сварных соединений в условиях неоднородности. Сформулировано основное противоречие контроля.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе рассмотрена методологическая база работы в основе которой лежат физические закономерности процесса накопления повреждений в материале, приводящие к снижению сопротивляемости разрушению, а также учет структурной неоднородности и напряженно-деформированного состояния в условиях влияния дестабилизирующих факторов на результаты контроля. Предложен акустико-эмиссионный показатель G_{AE} , связанный со скоростью накопления повреждений в сварном соединении и позволяющий оценить влияние на них упрочняющих обработок.

В третьей главе описана программа подготовки к проведению экспериментальных исследований, образцы, упрочняющие воздействия, акустико-эмиссионная аппаратура, нагружающее устройство, изложена методика проведения эксперимента и алгоритм обработки и анализа результатов. Приведены результаты исследований, подтверждающие представительность предложенного параметра для оценки упрочняющего воздействия. Установлена корреляционная связь между предложенным показателем и видом упрочняющей обработки.

В четвертой главе приведены материалы по реализации результатов экспериментальных исследований, алгоритм автоматизированного определения предложенного показателя, а также проект методики по оценке влияния упрочняющих воздействий, принятый к внедрению, и перспективы дальнейших исследований.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Степень упрочнения сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих обработок, предлагается определять акустико-эмиссионным показателем G_{AE} , рассчитываемым по результатам регистрации сигналов акустической эмиссии в условиях диагностического нагружения до и после воздействия упрочнения на сварные соединения.

Анализ влияния упрочняющих обработок на сварные соединения технических объектов, работающих в условиях длительной нагрузки, показал, что повышение сопротивляемости разрушению достигается путем воздействия на состав и структуру сварного соединения, а также на его напряженно-деформированное состояние. Однако, данные манипуляции не всегда приводят к численному повышению сопротивляемости разрушению сварных соединений, что обязывает проводить мероприятия, нацеленные на оценку результатов их воздействия. Совершенствование методов оценки влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения с учетом неоднородности его свойств, структуры и напряженно-деформированного состояния без нарушения целостности предложено вести на основе возможностей метода акустической эмиссии и связи ее параметров с процессами, приводящими к снижению сопротивляемости разрушению.

Основным процессом, приводящим к снижению сопротивления разрушению сварных соединений, работающих в условиях длительных переменных нагрузок, является накопление повреждений $C(t)$, которое описывается уравнением кинетики первого порядка (1).

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{c_0 - c(t)}{\theta_{cp}}, \quad (1)$$

где C_0 – исходная концентрация структурных элементов в материале до возникновения разрушений, θ_{cp} – средняя

долговечность структурных элементов, заданная уравнением Журкова С.Н., описываемого уравнением (2).

$$\theta(t) = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{KT}, \quad (2)$$

где τ_0 – период атомных колебаний, U_0 – энергия активации процесса разрушения, γ – параметр структуры (активационный объем), $\sigma(t)$ – номинальные напряжения, действующие на структурный элемент, K – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Путем математических преобразований уравнения (1) с учетом формулы (2) в условиях нагружения с постоянной скоростью роста напряжений ($\sigma = \dot{\sigma}t$) для структурно однородного материала (с одинаковыми значениями γ) накопление повреждений $C(t)$ описывается уравнением (3).

$$C(t) = C_0KT \cdot \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma}t - U_0}{KT} \right] \cdot \tau_0 \gamma \dot{\sigma} \quad (3)$$

Возможности метода акустической эмиссии (АЭ) позволяют следить за эволюцией процесса накопления повреждений в сварных соединениях. Время регистрации сигнала, количественно выраженное число импульсов АЭ $N_{\Sigma}(t)$ и позволяющее сформировать временные зависимости, является первичным информативным параметром, доля сигналов которых связана с накоплением повреждений в сварных соединениях. Однако, на пропорциональность связи между $N_{\Sigma}(t)$ и $C(t)$ влияет акустико-эмиссионный коэффициент k_{AE} , учитывающий аддитивные и мультипликативные помехи, влияющие на процесс регистрации. Следовательно, уравнение (3) приобретает следующий вид (4)

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE}C_0KT \cdot \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma}t - U_0}{KT} \right] \cdot \tau_0 \gamma \dot{\sigma} \quad (4)$$

В условиях корректного нагружения ($k_{AE} = \text{const}$) с постоянной скоростью ($\dot{\sigma} \neq 0$) и постоянства коэффициентов правой части уравнения, логарифмируя обе части уравнения

(4), скорость накопления повреждений в сварном соединении (первая производная) задается уравнением (5)

$$\frac{d \ln(N(t))}{d\sigma} = \frac{\gamma}{KT} \quad (5)$$

Тогда упрочнение определяется соотношением скоростей (5) накопления повреждений до и после воздействия упрочняющей обработки (6):

$$G_{AE} = \frac{d \ln(N(t))_1 \cdot d\sigma_2}{d \ln(N(t))_2 \cdot d\sigma_1} \quad (6)$$

Предложенный показатель является акустико-эмиссионным показателем G_{AE} , выраженный отношением угловых коэффициентов зависимости логарифма числа импульсов акустической эмиссии от напряжений. Данный показатель связан с сопротивлением разрушению и определяется на прямолинейном участке зависимости числа импульсов акустической эмиссии от напряжений. С учетом выражения (6) критерием упрочнения является следующее неравенство (7)

$$G_{AE} > 1 \quad (7)$$

2. Участок временной зависимости числа импульсов акустической эмиссии технологически упрочняемого сварного соединения, необходимый для определения предложенного показателя, предлагается идентифицировать после существенного или полного затухания активности акустической эмиссии, регистрируемой при его диагностическом нагружении.

Для оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения и определения информативности акустико-эмиссионного показателя G_{AE} были подготовлены и проведены экспериментальные исследования. Для этого были изготовлены стальные образцы из марки стали «СтЗпс», сваренные полуавтоматической ручной сваркой в аргоновой среде с использованием сварочной проволоки. Стыковой

сварной шов располагался в середине образца. Все образцы были разделены на пять групп, каждая из которых подвергалась различным обработкам. Первая группа являлась контрольной и не подвергалась никаким дополнительным обработкам. Вторая группа подвергалась термообработке (высокий отпуск) при $t = 600^\circ$ и выдержке в течение 5 часов. К третьей группе применялось конструкционное упрочнение, связанное с технологией сварки, а именно создание кромок с двух сторон металла перед свариванием. К четвертой и пятой группе были отнесены образцы, подвергнутые ультразвуковой ударной обработке ($f = 20,1$ кГц и $P = 0,2$ кВт) сварного шва и околшовной зоны. Схема нагружения показана на рисунке 1.

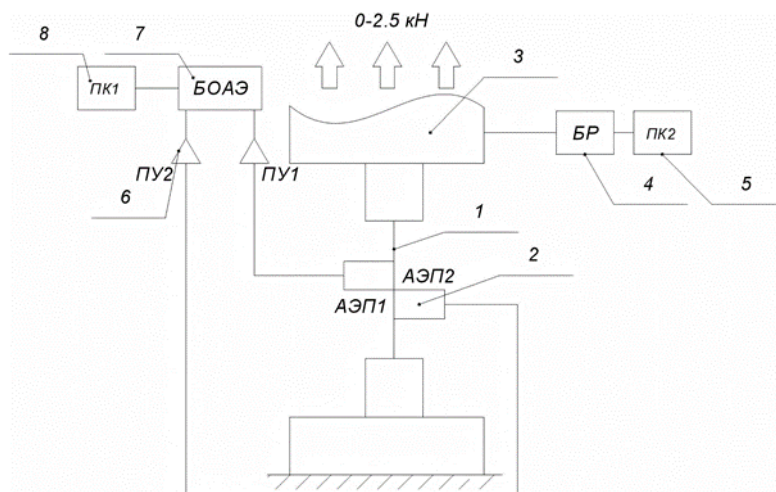


Рисунок 1 – Схема проведения нагружения и регистрации АЭ параметров, где 1 – образец; 2 – преобразователи акустической эмиссии; 3 – разрывная машина; 4 – блок управления; 5 – персональный компьютер для управления нагрузкой; 6 – предварительные усилители сигналов акустической эмиссии; 7 – блок обработки сигналов акустической эмиссии; 8 – персональный компьютер для регистрации сигналов акустической эмиссии

Для возникновения упругих колебаний образец подвергался статическому растяжению, которое создавалось универсальной испытательной машиной Zwick/Roell Z100. Регистрация упругих колебаний осуществлялась с помощью акустико-эмиссионной системы СДАЭ-16(2), состоящей из двух каналов с рабочим диапазоном частот преобразователя от 20 до 500 кГц.

По результатам эксперимента были рассчитаны значения стандартных АЭ и предложенного показателей (таблица 1). Стандартные АЭ показатели находились в пределах разброса и не позволили оценить влияние упрочняющих обработок. При этом, показатель G_{AE} оказался чувствителен к виду упрочняющего воздействия (рисунок 2). Относительно контрольной группы термообработанные образцы показали упрочнение в 3,4 раза, наличие фаски в 1,7, ультразвуковая обработка шва в 1,2, околосшовной зоны – в 0,89 раз.

Определение значений предложенного параметра сварных соединений, подвергнутых влиянию упрочняющих технологий, осуществлялось на этапе кинетически однородного разрушения (в условиях постоянства параметра γ), который следует после полного или частичного затухания активности акустической эмиссии (рисунок 3). Активность АЭ возрастает с начала нагружения, достигает максимума к 5 секунде, затем уменьшается до минимума к 20-й секунде, после чего снова растет (рисунок 4). Это уменьшение активности индицирует начало однородного этапа, необходимого для определения показателя G_{AE} .

Корреляционный анализ также подтверждает зависимость между полученным значениями акустико-эмиссионного показателя G_{AE} с числом циклов до разрушения образцов сварных соединений, полученных в

процессе усталостных испытаний на подобных стальных образцах (таблица 1).

Таким образом, предложенный показатель позволяет оценить воздействие упрочняющих обработок на сварные соединения технических объектов, работающих в условиях переменных нагрузок, оперативно и без нарушения их целостности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научной работой, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – обосновано применение информативных параметров и алгоритма обработки регистрации сигналов акустической эмиссии для совершенствования контроля сварных соединений, подвергнутых влиянию упрочняющих обработок.

1. По результатам проведенного анализа теоретических и экспериментальных исследований была проведена классификация способов повышения сопротивления длительной прочности и методов их контроля. Установлено, что первичные регистрируемые параметры неразрушающих методов контроля следует увязывать с характеристиками длительной прочности сварных соединений.

2. Предложен метод акустической эмиссии как средство наблюдения за процессом накопления повреждений в сварном соединении, снижающим его прочностные свойства, алгоритм обработки результатов которого предлагается определять в условиях влияния дестабилизирующих факторов.

3. Предложен акустико-эмиссионный показатель G_{AE} для оценки влияния воздействия упрочняющих обработок на сварные соединения, увеличение значений которого характеризует снижение скорости накопления повреждений в упрочненных швах относительно исходных. Предложен критерий упрочнения.

4. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния термообработки, ультразвуковой обработки и технологии сварки на сигналы акустической эмиссии сварных соединений.

5. Исследована взаимосвязь предложенного акустико-эмиссионного показателя с показателями долговечности сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих обработок. Установлена особенность его определения. Результаты экспериментальных исследований показали, что в условиях влияния дестабилизирующих факторов применение стандартных акустико-эмиссионных критериев соединения не представляется возможным.

6. Разработан проект методики по применению метода контроля влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения технических объектов. Разработан алгоритм по автоматизированному определению акустико-эмиссионного показателя и критерия упрочнения на его основе.

Дальнейшее развитие темы диссертации подразумевает расширение перечня контролируемых видов материалов и их конфигураций, упрочняющих обработок, а также разработки методологических основ прогнозирования остаточного ресурса материалов, подверженных влиянию упрочняющих воздействий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Носов, В.В. Методика акустико-эмиссионной оценки нанохарактеристик прочности конструкционных и машиностроительных материалов объектов / В.В. Носов, **Е.В. Григорьев** // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 9. – С. 44-57. – DOI: 10.14489/td.2019.09.pp.044-057.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. **Grigorev, E.** Improving Quality Control Methods to Test Strengthening Technologies: A Multilevel Model of Acoustic Pulse Flow / **E. Grigorev, V. Nosov** // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 9. – P. 4549. – DOI: 10.3390/app12094549.

3. Nosov, V.V. Micromechanics, nanophysics and non-destructive testing of the strength of structural materials / V. V. Nosov, I. E. Chaplin, E. R. Gilyazetdinov, **E.V. Grigoriev**, I.A. Pavlenko // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – Vol. 42. – № 6. – P. 808-824. – DOI: 10.18720/MPM.4262019_13.

Прочие публикации:

4. **Grigoriev, E.V.** Quality control of hardening technologies using the acoustic emission method / **E. V. Grigoriev**, A. G. Palaev, T. S. Golikov, V. V. Nosov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 266. – P. 04004. – DOI: 10.1051/e3sconf/202126604004.

5. Носов, В. В. Оценка качества упрочняющих технологий на основе многоуровневой модели потока импульсов акустической эмиссии и нанохарактеристик прочности материала / В. В. Носов, **Е. В. Григорьев** // Нанозифика и Наноматериалы: Сборник научных трудов Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 208-213.

Патенты на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент № 2775855 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Способ оценки качества упрочняющих технологий : № 2021134591 : заявл. 26.11.2021 : опубл. 11.07.2022 / В. В. Носов, **Е. В. Григорьев** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" – 12 с.

Таблица 1 – Средние значения предложенного показателя и стандартных АЭ параметров сварных соединений, подвергнутых упрочняющим обработкам и значение коэффициента корреляции с числом циклов до разрушения

	Исходный	Термо-обработка	Фаска	УЗО шва	УЗО ОШЗ	Коэффициент корреляции с числом циклов до разрушения
Активность, N'	7,6 $\pm 0,67$	17,3 $\pm 0,03$	11,3 $\pm 3,46$	6,9 $\pm 0,97$	6,5 $\pm 0,67$	0,97
Амплитуда, дБ	59,9 $\pm 0,23$	57,7 $\pm 0,26$	59,3 $\pm 0,74$	60,8 $\pm 1,00$	62,9 $\pm 0,51$	-0,90
Число импульсов, N_{Σ}	266 $\pm 21,3$	585 $\pm 4,3$	369 ± 117	188 $\pm 77,1$	196 $\pm 27,4$	0,98
MARSE, $MB^2 \cdot MC$	99713 ± 15759	140823 ± 1294	92513 ± 24557	78372 ± 33023	90438 ± 8711	0,87
γ/KT , $M\text{Па}^{-1}$	0,0050 $\pm 0,0002$	0,0015 $\pm 0,0003$	0,0029 $\pm 0,0005$	0,0040 $\pm 0,0005$	0,0056 $\pm 0,0003$	-0,99
G_{AE}	1	3,4	1,7	1,2	0,9	0,99
Количество циклов до разрушения [1]	2951	10399	-	4246	-	

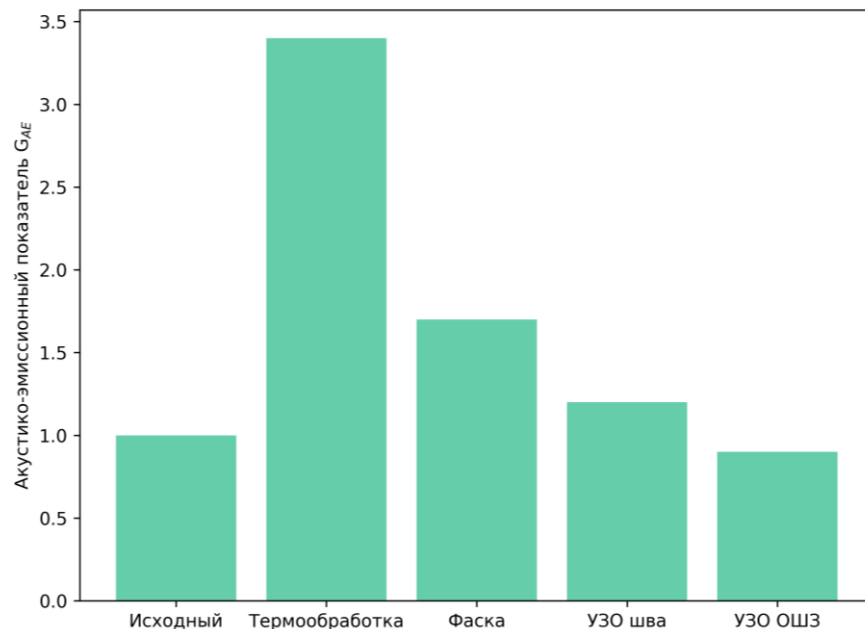
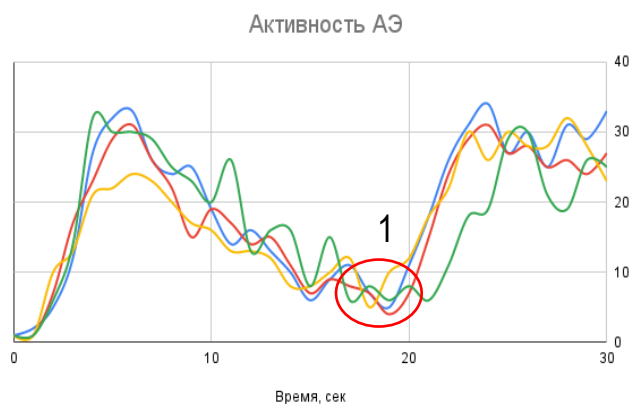
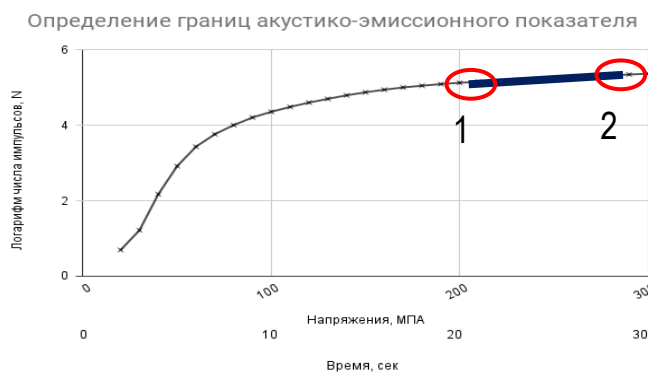


Рисунок 2 – Изменение значений акустико-эмиссионного показателя G_{AE} в зависимости от вида упрочняющей обработки

Примечание: УЗО – ультразвуковая обработка; ОШЗ – околшовная зона.
[1]. Вержбидский К.Д. Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем дополнительной обработки сварных соединений нижнего пояса: дис. канд. техн. наук – Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург. 2018. 103 с.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Порядок определения акустико-эмиссионного показателя: а – зависимость активности акустической эмиссии от времени, б – зависимость логарифма суммарного числа импульсов акустической эмиссии от времени и напряжений, в – зависимость коэффициента перекрытия сигналов от времени

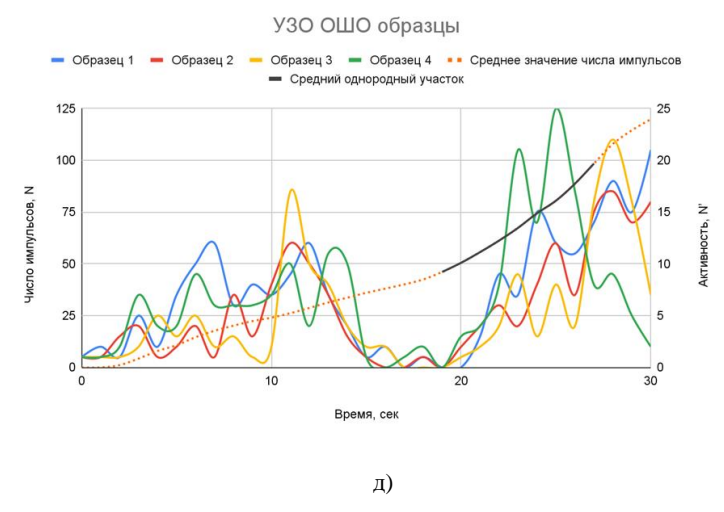
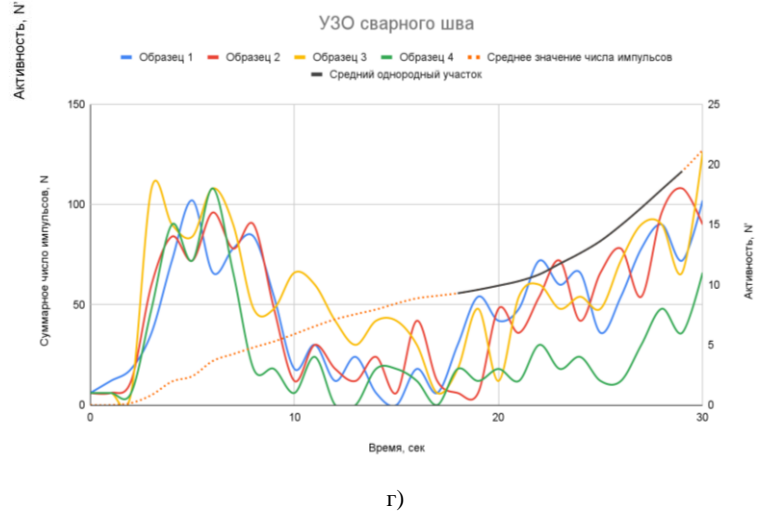
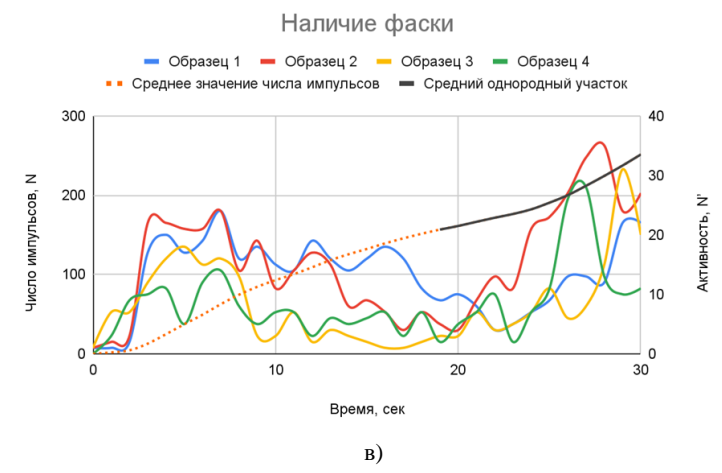
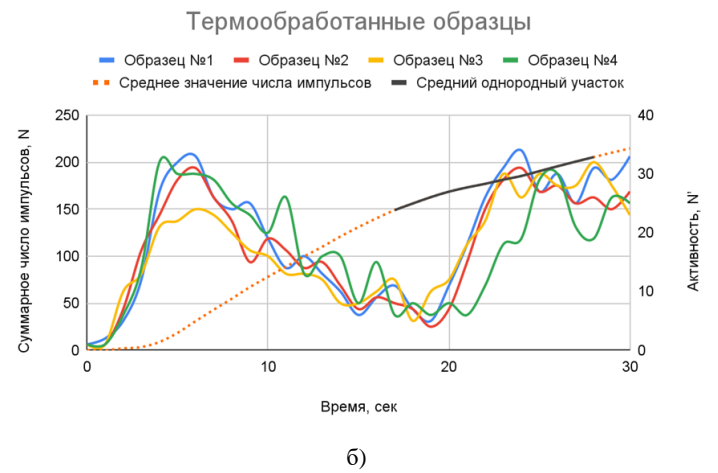


Рисунок 4 – Изменение активности акустической эмиссии N' и суммарного числа импульсов N_{Σ} от времени для всех видов упрочняющих воздействий: а) – исходный, б) – термообработка, в) – наличие конструкционного упрочнения, г) – УЗО сварного шва, д) – УЗО околошовной зоны