

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт–Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Носов В.В.

Санкт–Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 КЛАССИФИКАЦИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	12
1.1 Сварные соединения, работающие в условиях длительных повторно-переменных нагрузок.....	17
1.2 Классификация упрочняющих обработок, способствующих повышению сопротивляемости разрушению сварных соединений	21
1.2.1 Конструкционные и специальные методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений.....	23
1.2.2 Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании структуры и состава сварных соединений.....	26
1.2.3 Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании остаточных напряжений	28
1.3 Классификация методов контроля влияния упрочняющих обработок на сварные соединения	37
1.3.1 Разрушающие методы оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения	39
1.3.2 Неразрушающие методы оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения	45
1.4 Выводы по главе 1	58
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ АЭ) В КАЧЕСТВЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	59
2.1 Метод акустической эмиссии как способ слежения за накоплением повреждений в сварных соединениях	59

2.2 Обоснование акустико-эмиссионного показателя в качестве критерия оценки влияния упрочняющих обработок	70
2.3 Выводы по Главе 2	76
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК НА СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.....	78
3.1 Подготовка к проведению экспериментальных исследований по оценке влияния упрочняющих обработок на сварные соединения	78
3.1.1 Термообработка сварных соединений	83
3.1.2 Ультразвуковая ударная обработка и конструкционное упрочнение сварных соединений.....	83
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния упрочняющих обработок на акустические сигналы от сварных соединений.....	85
3.3 Обработка полученных результатов по оценке влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения и их анализ	90
3.4 Выводы по Главе 3	102
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК НА СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	104
4.1 Автоматизация определения степени упрочнения по сигналам акустической эмиссии.....	104
4.2 Методика по контролю сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих обработок	108
4.3 Выводы по 4 главе.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов исследования	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение	131

ВВЕДЕНИЕ

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, огибая 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».

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

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

Цель работы:

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.

Задачи исследования

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. (Приложение А).

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.

Положения, выносимые на защиту

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:

- Международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы НиН-2021» (г. Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2021);

- Международный симпозиум «Нанозифика 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 (номера из списка литературы – 70, 71, 107, 116, 120), 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 международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент.

Структура и объем диссертации

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.

ГЛАВА 1 КЛАССИФИКАЦИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Повышение надежности и безопасности эксплуатации сварных соединений технических объектов, работающих в условиях длительных повторяющихся переменных нагрузок, достигается различными способами. Например, широко используются различные упрочняющие обработки, способствующие повышению заданных прочностных характеристик и увеличению количественных значений показателей долговечности таких соединительных элементов. Однако, из-за влияния различных причин, упрочняющие воздействия не всегда приводят к желаемому результату, что обязывает проводить проверку результирующего упрочнения без нарушения целостности объекта контроля. Кроме того, согласно ежегодным отчетам о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, 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 аварий на данных объектах [36]. Помимо этого, технические объекты постоянно усложняются, поэтому любые не выявленные на этапе диагностирования неисправности в их работе могут иметь катастрофические последствия, и сказаться на будущем не только самого объекта, но и всего общества в целом. Следовательно, совершенствование методов контроля упрочняющих обработок сварных соединений, работающих в условиях повторяющихся переменных нагрузок, является актуальной задачей.

Технические объекты, работающие в условиях повторно-переменных нагрузок, охватывают разнообразное оборудование, включая машины, устройства и другие технические системы, используемые в производственных процессах различных отраслей промышленности. Эти объекты играют ключевую роль в поддержании эффективности производства и обеспечении жизненно важных

функций в различных сферах человеческой деятельности. Они являются основой для реализации технологических процессов и обеспечивают необходимые условия для производства товаров и услуг, что в свою очередь способствует развитию экономики и обеспечению потребностей общества [45, 58]. Кроме того, технические объекты функционируют в различных условиях, таких как повторно-переменные или циклические нагрузки, экстремальные температуры, агрессивные среды и так далее [58]. В данной работе основное внимание уделяется техническим объектам, работающим в условиях повторно-переменных нагрузок. Среди таких объектов можно выделить сосуды давления, подъемно-транспортные машины, мосты и сооружения, а также другие технические устройства, испытывающие повторяющиеся переменные нагрузки.

Современная промышленность сталкивается с возрастающей сложностью производственных процессов, что создает дополнительные вызовы в обеспечении надежной работы оборудования и систем. Эта динамика становится ключевой проблемой для различных отраслей промышленности. В то же время, появление новых технологий, таких как автоматизация и искусственный интеллект, устанавливает новые стандарты и требует постоянного развития систем с целью обеспечения их безопасности, надежности и эффективности. Помимо этого, возрастают требования к долговечности, прочности и другим физико-механическим характеристикам узлов и деталей, необходимых для повышения производительности. Обеспечение надежности, безопасности и бесперебойной работы промышленных объектов становится все более важным в контексте устойчивого развития и необходимости сокращения энергопотребления и выбросов парниковых газов [102].

Обеспечение соответствующих требований к надежности промышленных объектов достигается за счет широкого комплекса упреждающих подходов, закладываемых еще на стадии проектирования и поддерживающихся в процессе изготовления и эксплуатации на основе технологических и эксплуатационных методов. На стадии разработки технической документации и проекта задаются количественные показатели надежности к техническому объекту, выбирается

оптимальный вариант конструкции и проводят необходимые испытания макета объекта и отдельных его узлов. К основным мероприятиям относятся повышение стойкости технических объектов к внутренним и внешним воздействиям, защита от вредных воздействий, проектирование рациональной конструкции и автоматизированное управление параметрами системы. Такие мероприятия используют новейшие достижения в области конструирования и промышленных технологий [17, 45].

Основной задачей данных мероприятий является достижение заданных характеристик, увеличение производительности, сокращение использования металла и уменьшение размеров оборудования с минимальными затратами для обеспечения удобства эксплуатации. Кроме того, конструкция должна быть также рациональной с точки зрения ее ремонтпригодности и приспособленности к диагностированию. Достигается это за счет выбора износостойких материалов, правильного подбора рабочих жидкостей, автоматизированного управления нагрузкой и прочих итераций и ограничивается уровнем развития той или иной области техники [45].

Одним из наиболее уязвимых элементов конструкций, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок, являются сварные соединения. В основном, данный элемент редко превышает 1% от массовой доли всего объекта, однако, около 60-70 % отказов конструкции связано именно с недостатками данного соединительного элемента [17]. Поэтому возрастает важность сварных соединений в обеспечении безопасности работы всей конструкции. В связи с этим, повышение качества сварных соединений на различных этапах производства и эксплуатации должно выполняться с учетом современных требований и становится одной из ключевых задач [45]. Следовательно, проблема разработки научно-технических подходов для повышения сопротивляемости и продления ресурса сварных соединений объектов, работающих в условиях изменяющихся нагрузок, является одним из ключевых вызовов современной промышленности. Такие подходы должны основываться на комплексном анализе всего срока функционирования объекта, начиная со стадии проектирования и изготовления, и

заканчивая на этапе эксплуатации, где одной из задач стоит повышение сопротивляемости разрушению сварных соединений, ограничивающих ресурс длительно работающих при низких напряжениях объектов в эксплуатационных условиях [58, 65].

Решение данной задачи возможно на основе комплексного подхода, состоящего из нескольких аспектов, одним из которых является применение прогрессивных технологий, способных повысить сопротивляемость длительному разрушению технических объектов. Для сварных соединений характеристиками сопротивления могут выступать стандартные характеристики длительной прочности, а также количественные показатели, связанные с долговечностью, которые количественно могут быть выражены числом циклов до разрушения.

С развитием научных и технических достижений появляется все больше технологий, направленных на повышение сопротивляемости сварных соединений длительному разрушению [51]. Например, разработка новых материалов с повышенными прочностными свойствами и усовершенствованными технологиями сварки является одним из вариантов повышения сопротивляемости длительному разрушению. Другим аспектом является воздействие различных физических полей на уже эксплуатируемые материалы. Сварные соединения, подвергнутые таким упрочняющим обработкам, используются во многих отраслях промышленности. Однако, классические методы упрочнения не всегда являются эффективными, а иногда оказываются трудоемкими и энергозатратными для решения поставленных задач, в связи с чем требуется эффективное развитие так называемой упрочняющей обработки [46, 51]. Контроль результата воздействий упрочнений различного вида на сварные соединения реальных объектов, работающих в условиях динамически изменяющейся нагрузки, следует осуществлять с применением современных средств технической диагностики. В этой связи, в работе предлагается метод контроля влияния упрочняющих обработок, которое состоит в обеспечении контролепригодности упрочняющих факторов и информативности параметров контроля по отношению к ресурсу, упрочняемых сложно нагруженных технических объектов в условиях неоднородности.

Согласно ГОСТ – 18295-72 «Обработка упрочняющая. Термины и определения» [23] под упрочнением понимается применение различных специальных операций в технологических процессах, которые приводят к необратимому повышению сопротивляемости материалом разрушению или остаточной деформации. Под термином упрочняющая обработка трактуется такое технологическое воздействие на материал, которое приводит к созданию упрочнения. Таким образом, при воздействии упрочняющей обработки на сварное соединение различными способами, происходит к повышению сопротивляемости длительному разрушению, например, для объектов, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок, количественному увеличению числа циклов до разрушения.

Исследование процессов, которые приводят к повышению прочностных свойств сварных соединений, и механизмов упрочнения является фундаментальной проблемой современного материаловедения. Решение этой проблемы приводит к разработке эффективных технологий для получения материалов с повышенными прочностными свойствами. Повышение таких свойств возможно за счет изменения микрогеометрии поверхности и химического состава, объемного структурно-фазового состояния, фазовой и дислокационной структуры, за счет создания защитных покрытий и снятия энергетического и напряженного состояния с них и других методов [30, 45]. Конечным результатом применения упрочняющей обработки является повышение сопротивляемости разрушению, что в свою очередь приводит к повышению срока службы сварного соединения и всего объекта в целом.

В технической литературе и документации общепринятого определения термина разрушения нет, различные авторы предлагают свое понимание данного явления. Однако, прослеживается две основных тенденции к его толкованию: механическая и кинетическая. Первым вариантом [98] является представление разрушения в виде критического события (нарушение сплошности). Ко второму [86] и более предпочтительному относится описание данного явления как процесса накопления повреждений, протекающего во времени, и приводящего к

фрагментации тела на части. В первом случае ключевым фактором является усилие, во втором - время.

Критерием оценки влияния упрочняющих воздействий является степень упрочнения [23]. Под ней понимается повышение заданного параметра сопротивляемости материала разрушению или деформации по сравнению с исходным после воздействия упрочняющей обработки. В зависимости от типа обработки и материала, к которому она применяется, в качестве заданного параметра могут использоваться такие характеристики как долговечность, разрушающая нагрузка, предел прочности, выносливости, текучести и другие физико-механические характеристики. Однако, в комплексную оценку результата влияния упрочняющей обработки стоит вкладывать куда более широкий смысл, включающий в себя контроль степени упрочнения, совмещенный с возможностью прогнозирования остаточного ресурса.

1.1 Сварные соединения, работающие в условиях длительных повторно-переменных нагрузок

На сегодняшний день роль сварных соединений, используемых в качестве соединительных элементов в конструкциях, неуклонно растет, а области их использования постоянно расширяются. Так, например, они широко используются в таких сферах человеческой деятельности как энергетика, строительство, нефтегазовой и химической отраслях, судо- и автомобилестроении и др. Кроме того, расширяются места и условия их работы. Сварные соединения активно используются на Земле и воздухе, под водой и в космосе, в различных агрессивных средах, в том числе и при радиационном облучении, в условиях перепада давлений и температур от самых низких до предельно высоких. В этой связи непрерывно повышаются требования к качеству и надежности сварных соединений, в свою очередь приводящее к поиску оптимальных конструктивно-технологических решений, к изучению способности сопротивляться разрушению, к оптимизации изготовления конструкций с данными элементами и совершенствованию расчетных методов [45].

Для создания неразрывного соединения материалов используются различные виды сварки, продуктом которого является сварное соединение состоящие из различных зон. Использование такого технологического процесса представляется рациональным и целесообразным, так как сам он является экономически выгодным. Кроме того, он высокопроизводительный и местами полностью механизирован. Сваркой соединяют различные материалы, в том числе металлы и их сплавы, пластмассы, металлы с неметаллическими включениями и т.д. Особый интерес вызывают сварные соединения из металлических материалов, в том числе конструкционных углеродных сталей, так как именно эти стали составляют основу конструкций, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок [64].

Суть сварки заключается в образовании прочных межатомных или межмолекулярных связей на соединяемых заготовках путем энергетического воздействия. В результате термического, термомеханического и механического воздействия образуются общие кристаллические решетки на поверхности соединяемых металлов. С помощью термического класса осуществляется плавление с использованием тепловой энергии. К нему относятся дуговая, лазерная, плазменная и другие виды сварки. К термомеханическому виду сварки относится воздействие тепловой энергии и давления, например, контактная сварка. Представителем последнего класса является механическая сварка, которая осуществляется за счет механической энергии и давления, например, ультразвуковая сварка [64].

Продуктом сварки являются неразъемные сварные соединения, которые представляют собой одну из ключевых составляющих в множестве промышленных процессов. Эти соединения могут быть созданы в различных конфигурациях, включая широкий спектр форм и размеров, в зависимости от требований конкретного проекта. На рисунке 1.1 приведен типовой вид сварного соединения, который иллюстрирует основные элементы и структуру таких соединений. Классификация сварных соединений может осуществляться по различным признакам, таким как вид сварного соединения (например, стыковое, угловое, фланцевое), форма свариваемой конструкции (например, прямоугольная, круглая,

профильная), способ сварки (например, дуговая, газовая, лазерная), протяженность сварного шва и так далее. Более подробные классификации и стандарты описаны в соответствующих нормативных документах, которые регулируют процессы сварки и требования к качеству сварных соединений.

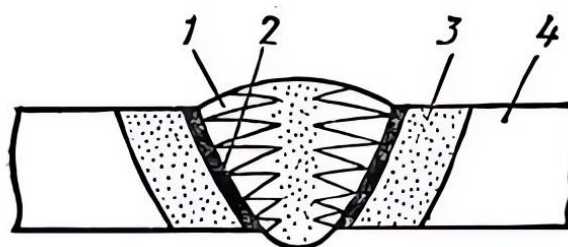


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение сварного соединения:

- 1 – сварной шов,
- 2 – зона сплавления,
- 3 – зона термического влияния,
- 4 – основной металл [64]

В качестве наиболее частой классификации сварных соединений используют разделение по способу их конфигурации. Существуют пять основных способов соединения заготовок сваркой [64], а именно:

- **Стыковое соединение.** Самый простой тип сварного соединения, где концы соединяемых деталей стыкуются и свариваются вместе. Данный тип соединения применяется, когда необходимо объединить две детали с прямыми или угловыми поверхностями.

- **Угловое соединение.** Этот тип сварного соединения используется для объединения деталей под углом друг к другу. Для создания углового соединения могут применяться различные методы сварки, такие как дуговая сварка, точечная сварка или газовая сварка. Угловые соединения широко используются в промышленности, включая машиностроение и другие отрасли.

- **Нахлесточное соединение.** В нахлесточном соединении одна деталь полностью или частично находится поверх другой детали, а затем сваривается. Этот тип соединения обычно применяется для усиления соединения между двумя деталями и создания прочного, и устойчивого к нагрузкам соединения.

- Тавровое соединение. Данный вид сварного соединения осуществляется с помощью сваривания торца изделия с боковой поверхностью под прямым углом. Данная конфигурация в основном применяется при создании несущих конструкций.

- Торцевое соединение. Это тип соединения двух сварных элементов, при котором они объединяются вплотную на их торцах, без наложения на друг друга. Применяется для большего выдерживания различных нагрузок.

Сварные соединения являются неотъемлемой частью многих промышленных конструкций, предназначенных для работы в условиях повторных переменных нагрузок. Такие нагрузки могут возникать в различных областях, включая нефтегазовую, химическую, строительную промышленности, авиационное и автомобильное производство и др. Поэтому корректное проектирование и исполнение сварных соединений играет ключевую роль в обеспечении безопасности и надежности таких объектов [45, 58].

Анализ литературы показал [45, 53, 58], что при работе промышленных объектов в условиях повторных переменных нагрузок одними из самых часто выходящих из строя элементов являются соединительные элементы, такие как болты, сварные соединения и другие элементы крепления. Эти элементы подвергаются повышенным напряжениям, вследствие чего развивается накопление усталостных повреждений из-за влияния повторяющихся нагрузок. Поэтому использование сварных соединений для промышленных объектов, работающих в условиях повторных нагрузок, требует особого внимания к выбору метода сварки, свойствам материалов, проектированию и соответствию нормативным требованиям.

Сегодня роль сварных соединений неуклонно возрастает, поскольку они активно используются в качестве ответственных конструктивных элементов во многих различных отраслях промышленности в различных странах. При этом, к сожалению, большая часть из них приближается к своему критическому возрасту. Со временем способность выполнять заданные функции сварными соединениями ухудшается из-за множества факторов, в том числе из-за воздействия повторно-

переменных нагрузок, окружающей и агрессивных сред, и плохого качества сварки. Помимо этого, непрерывная работа промышленных объектов и оборудования оказывает значительную нагрузку на сварные соединения, способствуя их износу и потенциальному выходу из строя. Последствия таких отказов могут варьироваться от дорогостоящих простоев и ремонтов, до катастрофических аварий с серьезными последствиями для безопасности и окружающей среды [58].

Для решения сложившейся проблемы большое внимание уделяется профилактическим и превентивным мероприятиям, в число которых входит соблюдение заданных режимов нагрузки, непрерывный мониторинг состояния, техническое обслуживание, ремонт и другие события, применимые для таких важных и ответственных элементов. Технические достижения и решения играют важную роль в выявлении потенциальных проблем до того, как они станут критическими. Кроме того, нормативные документы и правила постоянно пересматриваются, для того чтобы решить проблему старения инфраструктуры и обеспечить соответствие сварных соединений строгим требованиям безопасности и надежности [58].

1.2 Классификация упрочняющих обработок, способствующих повышению сопротивляемости разрушению сварных соединений

Повышение сопротивляемости разрушению сварных соединений можно достигнуть различными способами и технологическими приемами, применение которых зависит от конфигурации, материала и других параметров сварного соединения. На сегодняшний день существуют разнообразные упрочняющие обработки, предназначенные для повышения сопротивляемости усталостному разрушению сварных соединений. В частности, используются как хорошо освоенные традиционные методы, так и принципиально новые, способные воздействовать и повышать заданные прочностные характеристики. Согласно ГОСТ – 18295–72 «Обработка упрочняющая. Термины и определения» упрочняющие обработки разделяются по способу их воздействия на сварное соединение. Различают объемные, поверхностные и совмещенные способы

упрочняющей обработки. При этом сведения о применяемых методах и механизмах упрочнения в данном документе отсутствуют, что позволяет различным исследователям предложить свою классификацию.

В литературных источниках предложены различные классификации упрочняющих обработок, в которых описываются методы упрочнения металлических материалов [46], сплавов [30], металлообрабатывающих инструментов [99] и поверхностей [81, 114]. В данной работе классификацию упрочняющих обработок, воздействующих на сварные соединения, предлагается вести с позиции способа влияния технологических воздействий. В общем случае данные приемы можно разделить на три группы. К таким методам можно отнести конструкционные и специальные методы, технологические методы, направленные на структуру и состав сварных соединений, а также технологические методы, направленные на регулирование остаточных напряжений сварных соединений.

Упрочняющие обработки, применяемые в различных областях человеческой деятельности и для разнообразных материалов, представляют собой важный аспект инженерных решений. Сложность задачи заключается в том, что многообразие этих обработок делает невозможным исследование каждой из них в отдельности. Однако, в связи с широким применением данных методов и их влиянием на разнообразные характеристики материалов, на первый план выходит задача выявления наиболее перспективных и значимых процессов обработки. Это необходимо для того, чтобы изучить окончательный результат их воздействия на качество сварных соединений.

Упрочняющие обработки, способствующие повышению сопротивляемости длительному нагружению сварных соединений, влияя непосредственно на структуру и напряженно-деформированное состояние, представляют особый интерес. Следовательно, понимание и оптимизация процессов, используемых для создания сварных соединений с улучшенными прочностными характеристиками, способны повысить степень надежности различных технических объектов в различных отраслях промышленности, которые подвергаются переменным нагрузкам.

1.2.1 Конструкционные и специальные методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений

Существуют различные способы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений с помощью конструкционных и специальных методов, применение которых зависит от ограничения предельного состояния сварной конструкции. Суть данной группы методов направлена на рациональное проектирование сварных соединений и применения специальных защитных покрытий [51].

Одним из вариантов конструктивных методов является механическая обработка сварных соединений. Суть данного метода заключается в устранении концентраторов напряжений фрезой или другим инструментом для более плавного сопряжения сварного шва и основного металла, что приводит к увеличению сопротивляемости усталостному нагружению. Наибольший эффект данного приема приходится на стыковые сварные соединения, позволяя увеличить предел выносливости в 1,4-1,6 раз, а иногда и достигнуть предела выносливости основного металла [110]. Применение пологих фасок в нахлесточных сварных соединениях также оказывают положительное влияние на их сопротивляемость разрушению. Для штуцерных соединений механическая обработка чаще всего приводит к уменьшению предела выносливости. Зачистка шва абразивным кругом для тавровых соединений в ряде случаев приводит к повышению усталостной прочности, однако, для угловых, фланговых сварных соединений такая конструктивная манипуляция не всегда приводит к существенному повышению сопротивляемости разрушению [51, 110]. Данная процедура активно используется в различных областях промышленности, в том числе и на объектах, работающих при переменных нагрузках.

Другим вариантом конструктивных методов является обеспечение равнопрочности, при котором сварные соединения имеют достаточные сечения и механические свойства для достижения общей текучести, которая бы наступала не ранее, чем в основных элементах. Уменьшение предела текучести в сварном соединении по сравнению с основным металлом является одной из

распространенных проблем, которая связана с неравнопрочностью сварных швов. Устранение данной проблемы достигается различными способами, например, усилением сечения стыкового шва путем его увеличения. Кроме того, увеличение катета шва позволяет добиться равнопрочности в угловых сварных соединениях.

Альтернативным методом устранения неравномерности прочностных характеристик является технология контактного упрочнения. Этот подход направлен на уменьшение распространения пластической деформации путем создания узкой области сниженной прочности, которая имеет меньшую толщину по сравнению с основным материалом. В результате воздействия касательных напряжений формируются трехосные напряжения, взаимодействие которых с соседними участками металла препятствует дальнейшей деформации. Важно отметить, что достижение полной равнопрочности через этот метод представляет собой трудоемкую задачу [51].

Следующим вариантом конструктивного повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений является рациональное проектирование, которое в некоторых случаях позволяет значительно повысить предел выносливости. Достигается это за счет различных конструктивных уловок, например, увеличении податливости сопрягаемых элементов, добавления дополнительных конструктивных элементов, создания технологического непровара, создания деконцентраторов напряжений и другими конструктивными мерами. Суть выбора оптимальной конструкции влияет на уменьшение концентраторов и неоднородности напряжений. Увеличение податливости сопрягаемых элементов сваркой в некоторых конструкциях позволяет увеличить сопротивление выносливости. Концентрация напряжений в корневой зоне односторонних сварных напряжений негативно влияет на предел выносливости из-за неблагоприятной формы и наличия дефектов сварки. Из-за технологического непровара возникает снижение сопротивляемости усталости как при переменном растяжении, так и при симметричном изгибе, так как зависит от степени глубины проплавления элементов. Помимо описанных выше мер на сопротивление выносливости сварных элементов негативное влияние оказывают концентраторы напряжений, а также

неблагоприятное распределение механических напряжений. В этой связи, в наиболее напряженных местах конструкций не рекомендуется располагать сварные соединения. Кроме того, при переменной нагрузке наилучшим технологическим вариантом являются стыковые сварные соединения без дополнительных вспомогательных наплавов. Еще одним вариантом рационального проектирования является создания в сварных соединениях деконцентраторов напряжений в виде отверстий в местах концентраторов напряжений [51, 110].

Для повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений от воздействия окружающей среды, например, негативного влияния углеводородной среды, применяются различные специальные защитные методы. К их числу относят нанесение специальных покрытий (клея, пластмасс, эпоксидной смолы) на поверхность сварного соединения. Это воздействие может привести к незначительному увеличению устойчивости к усталостному разрушению путем уменьшения негативного воздействия окружающей среды [51]. Таким образом, разнообразие конструкционных и специальных методов упрочнения представлены на рисунке 1.2.

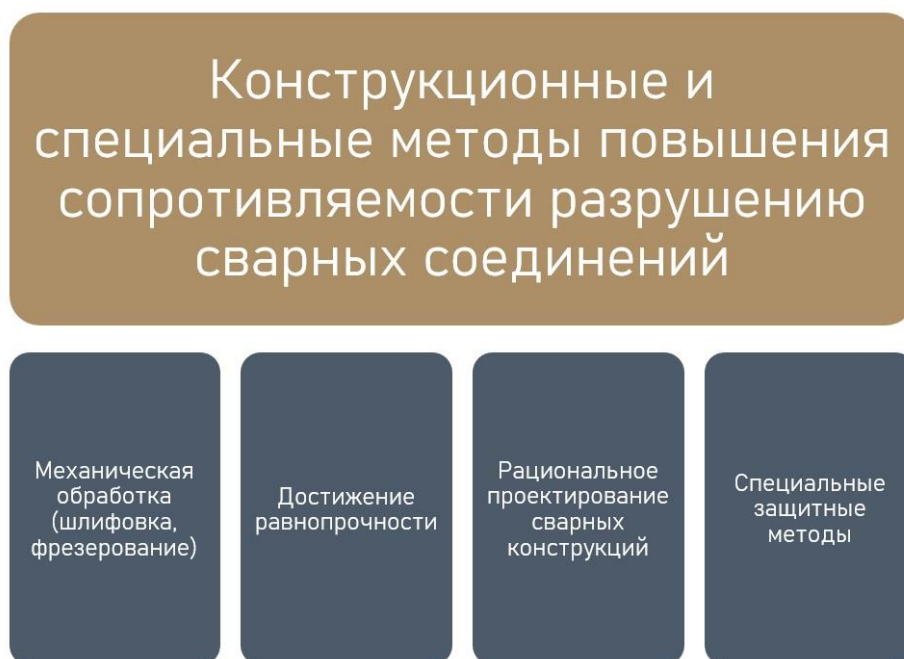


Рисунок 1.2 – Конструкционные и специальные методы повышения сопротивляемости усталостному разрушению сварных соединений

1.2.2 Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании структуры и состава сварных соединений

Режим сварки и используемые сварочные материалы являются ключевыми факторами, оказывающими влияние на характеристики сварных соединений за счет их воздействия на химический состав наплавленного металла. Изменение параметров сварки, составов сварочных материалов и выбор оптимальных режимов сварки в определенных ситуациях способны повысить предел выносливости сварных соединений. Кроме того, с учетом правильно подобранных режимов и техник сварки можно достичь плавного перехода от сварного шва к основному металлу. Не менее важно правильно выбрать электроды, флюсы и проволоку, так как это может существенно улучшить механические свойства сварного шва [51].

Помимо режимов сварки, на сопротивляемость усталостному разрушению незначительное влияние оказывает последовательность сварочных операций. Рациональный порядок сварки в наиболее нагруженных элементах конструкции позволяет снизить и минимизировать остаточные напряжения от сварки. Кроме того, исключение дефектов в виде непроваров, трещин, несплавлений, высокой пористости, подрезов, больших неровностей поверхности шва, наплавов у шва и т.д. уменьшает риск возникновения опасных концентраторов напряжений в конструкции. Мероприятия, осуществляемые после ввода конструкции в эксплуатацию, а именно контроль сварных соединений и качественное устранение выявленных дефектов также играют важную роль в снижении концентрации напряжений в изделиях, которые могут влиять на усталостное разрушение сварных элементов [51, 110].

Повышение прочности сварных соединений наблюдается при соблюдении специальных способов сварки, связанных с наложением дополнительных галтельных валиков для улучшения геометрической формы, что помогает снизить концентрацию напряжений у кромки шва. Такие мероприятия положительно влияют на нахлесточные сварные соединения, что сказывается на повышении

предела выносливости в примерно в 1,5 раза. Помимо всего прочего, качество свариваемых материалов также влияет на надежность всей конструкции. Кроме того, установлено, что кипящая сталь, а также неравномерное распределение углерода и серы в ней сказывается на чувствительности к низким температурам, старению и хрупкому разрушению, снижает стойкость к образованию кристаллизационных трещин. Поэтому применение чистых сталей и сплавов значительно улучшают свойства конечных сварных соединений [51, 110]. Совокупность описанных выше методов представлена на рисунке 1.3.

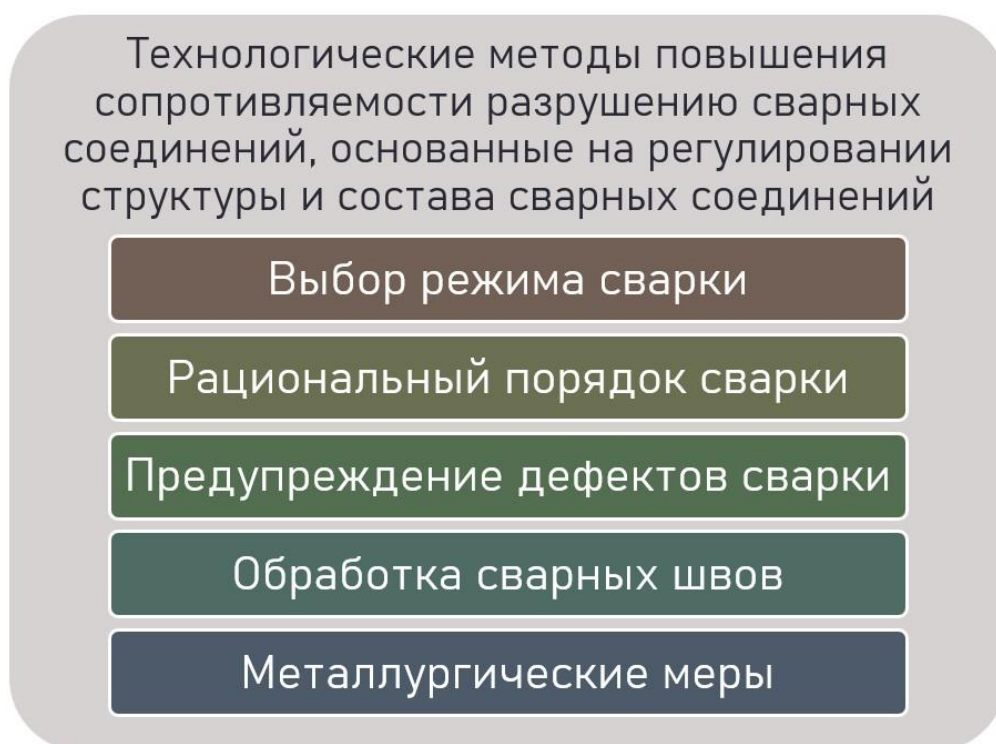


Рисунок 1.3 – Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании структуры и состава сварных соединений

Таким образом, применение данного вида упрочняющих обработок направлено на повышение однородности и дисперсности структуры различных зон сварных соединений, что способствует повышению сопротивляемости разрушению и благоприятно сказывается на эксплуатационной надежности объектов, работающих в условиях переменных нагрузок.

1.2.3 Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании остаточных напряжений

Для уменьшения влияния остаточных напряжений, возникающих в сварных соединениях в процессе сварки, применяют ряд мероприятий, направленных на уменьшение их влияния на работоспособность. В первую очередь активно применяется термическая обработка сварных соединений, которая осуществляется путем воздействия температурных полей на весь объем элемента [51, 76, 113, 121, 126]. Самыми распространенными термическими методами являются закалка, отжиг, нормализация и отпуск. Различают струйную, прерывистую и ступенчатую, изотермическую закалки при непрерывном охлаждении в одной среде с последующим отпуском или самоотпуском. Основной целью закалки является повышение износостойкости, твердости и прочности. Другим способом обработки является отжиг, при котором происходит нагрев изделия до определенной температуры с последующей выдержкой при заданной температуре в течение нескольких часов с дальнейшим медленным охлаждением до температуры охлаждающего воздуха в различных средах. Его применяют для устранения структурной неоднородности, снятия внутренних напряжений, повышения пластичности и обрабатываемости детали, при этом происходит снижение твердости. Следующим термическим методом упрочнения является нормализация, операционные воздействия которой полностью схожи с отжигом, однако основными различиями является время выдержки и скорость охлаждения. В результате воздействия нормализации происходит улучшение микроструктуры материала сварного соединения. К последнему способу относят отпуск. Применяют описанные выше процедуры, однако, как правило, при низких температурах с выдержкой от 15 мин до 15 часов и последующим охлаждением в жидкости или на воздухе. В результате воздействия уменьшаются значения остаточных напряжений, твердости и хрупкости. Также различают обработку отрицательными температурами, к которым относятся криогенное воздействие холодом на материал сварного соединения. Стали с высоким содержанием углерода, а также же легированные различными добавками, имеют конечную температуру

мартенситного превращения ниже нуля градусов по Цельсию. Поэтому после закалки в структуре стали наблюдается большое количество остаточного аустенита, что снижает твердость и магнитные свойства. Для удаления остаточного аустенита изделие дополнительно охлаждают в диапазоне отрицательных температур. Обработку отрицательными температурами проводят сразу после отверждения стали, чтобы избежать стабилизации аустенита. После данной обработки происходит значительное увеличение твердости. Однако, воздействие не оказывает влияния на внутренние напряжения, поэтому проводят низкий отпуск. Применение методов воздействия термических полей может привести как к увеличению сопротивляемости разрушению, так и оказать отрицательное воздействие.

Кроме того, активно используется местный нагрев, механизм которого заключается в наведении сжимающих остаточных напряжений от нагрева на сварочные растягивающие, которые имеют высокие величины [51, 74, 111, 118]. В основном такой нагрев применяется в массивных конструкциях, где применение традиционных методов термической обработки не представляется возможным. Нагрев сварного шва осуществляется различными способами, например, применением газового нагрева, токов высокой частоты (индукционный метод), либо электронагревателями сопротивления. Основным показанием к применению местного нагрева служит низкое качество поверхности сварного шва, где применение традиционных механических методов не представляется возможным. В работе [117] исследователи провели серию экспериментов, чтобы изучить, как создание сжимающих напряжений влияет на усталостную прочность. Они пришли к заключению, что местная термическая обработка сварных соединений как метод последующей обработки может положительно повлиять на увеличение устойчивости к разрушению и увеличение предела выносливости сварного соединения. При этом повышение сопротивляемости усталостному разрушению сильно зависит от качества сварного соединения, форм, размеров, геометрии и других параметров сварки. Однако, исследования, проведенные в работе [123] по оценке влияния местного нагрева на конструкционную сталь S355 (аналог 17Г1С)

и на сварку трением, разработанной компанией Thompson [119], показали, что предел выносливости сварных швов был выше у исходных образцов, не подвергнутых термическому воздействию. В первом случае из-за отсутствия эффекта от температурного воздействия, а во втором случае из-за ухудшения качества полученного сварного соединения. Таким образом, проведение местного нагрева не гарантирует повышения способности сопротивляться длительному нагружению сварного соединения, что требует обязательной проверки после проведения описанных манипуляций.

Помимо термического воздействия для снятия негативного влияния остаточных напряжений используют различные методы, направленные на создание сжимающих напряжений в зоне концентрации, которые создаются различными технологическими манипуляциями. Такие способы местного создания сжимающих напряжения могут способствовать увеличению предела выносливости стальных сварных соединений как при усталостном изгибе, так и при растяжении-сжатии [117].

Поверхностный наклеп, который создает благоприятные сжимающие напряжения в сварном соединении путем создания поверхностного пластического деформирования. Такой вид упрочняющей обработки показал свою эффективность для различного вида и типа сварных соединений из различных стальных материалов в различных характерах переменного нагружения и температурных условий. Согласно [35, 49, 51, 125] методы поверхностной пластической деформации, среди которых распространены ударно-вибрационная, пневмодинамическая, дробеструйная, фрикционно-упрочняющая и другие виды обработок, положительно влияют на сварное соединение. Также применяются различные накатки роликами, волочения, чеканки, наклеп и др. Уменьшение адгезионного воздействия изделия достигается с помощью выглаживания, виброполирования и механического нанесения твердых слоистых материалов и смазок на рабочую поверхность. К недостатку данной группы методов можно отнести трудоемкость применения обработки. При пластическом деформировании механизмы упрочнения заключаются в изменении строения металла из-за

преднамеренного искажения кристаллической решетки и деформации зерен. При этом в несколько раз возрастает значения твердости в поверхностном слое. Также повышается коррозионная стойкость и сопротивление изнашиванию, увеличивается сопротивляемость усталостному разрушению. В работе [109] по результатам исследований авторы сделали вывод о том, что при поверхностном наклепе толщина сваренных стальных листов влияет на сопротивление усталости, при этом повышение численных значений предела выносливости не носит линейный характер. В работах [52, 77] рассматривалось влияние наклепа, технологически выполненного разными способами, на сопротивление усталостному разрушению. Авторы пришли к выводу, что технологический наклеп оказал положительное влияние на долговечность сварного соединения, то есть привел к повышению предела выносливости исследованных образцов.

Следующим способом является местное обжатие сварного соединения в области концентратора. Суть данного метода заключается в сжатии металла около концентратора, для возникновения сжимающих остаточных напряжений, которые положительным образом влияют на действующие растягивающие остаточные напряжения, тем самым приводят к увеличению предела выносливости и долговечности сварного соединения. Такие манипуляции позволяют повысить предел выносливости для сварных соединений различных марок стали в несколько раз [51].

Еще одним способом снижения влияния растягивающих остаточных напряжений является предварительная перегрузка. Сварное соединение с концентратором нагружается до появления текучести в надрезе, что способствует появлению механических напряжений противоположного знака. Результатом воздействия нагружения является создание сжимающих остаточных напряжений в месте достижения текучести, а также происходит повышение вибрационной прочности [49, 51, 110]. Однако, основным недостатком является трудоемкость выполнения данного метода на крупногабаритных конструкциях, а также невозможность нагружения до предела текучести во всех углах. В работе [104] установлено, что усталостная прочность образцов сварных соединений повысилась

после проведенного предварительного нагружения, что авторы исследования связывают с перераспределением напряжений.

Для увеличения предела выносливости также используются метод импульсной обработки, заключающейся в обработке зон концентраций энергией взрыва малого заряда. Такое воздействие способствует влиянию локального пластического деформирования на околошовную зону сварных соединений и созданию сжимающих остаточных напряжений в зонах концентраторов. Такой метод позволяет повысить сопротивляемость сварных соединений из низкоуглеродистых сталей на циклический изгиб [51, 110]. В работе [41] изложено экспериментальное исследование по повышению долговечности сварных элементов после магнитно-импульсной обработки. Результаты показали повышение предела выносливости сварных соединений после их обработки.

Согласно [49] из всех описанных выше методов для стыковых сварных соединений наибольшее повышение предела выносливости достигается при механической обработке. Результаты проведенных исследований приведены на рисунке 1.4.

Помимо описанных выше методов, также применяются и другие способы снятия остаточных напряжений. Одним из вариантов является применение виброобработки сварных швов во время или после сварки [54, 105]. Послесварочная вибрационная обработка осуществляется путем возбуждения низкочастотных механических колебаний в сварном соединении. Суть данного метода заключается в возникновении переменных напряжений под действием которых происходит суммирование с остаточными напряжениями, которые приводят к микроскопической деформации, способствующие перераспределению и снижению механических напряжений в сварном элементе. Виброобработка сварных элементов из углеродистых сталей в среднем позволяет снизить на 55% напряжения первого рода и до 45% второго. Однако, влияние виброобработки на сопротивление усталости является неоднозначным. В редких случаях такой метод приводит к снижению долговечности сварного элемента, что зависит от качества сварного соединения, а также режима воздействия данного способа [54]. Данный

факт подтверждает необходимость проверки влияния виброобработки на сопротивляемость разрушению стальных сварных соединений.

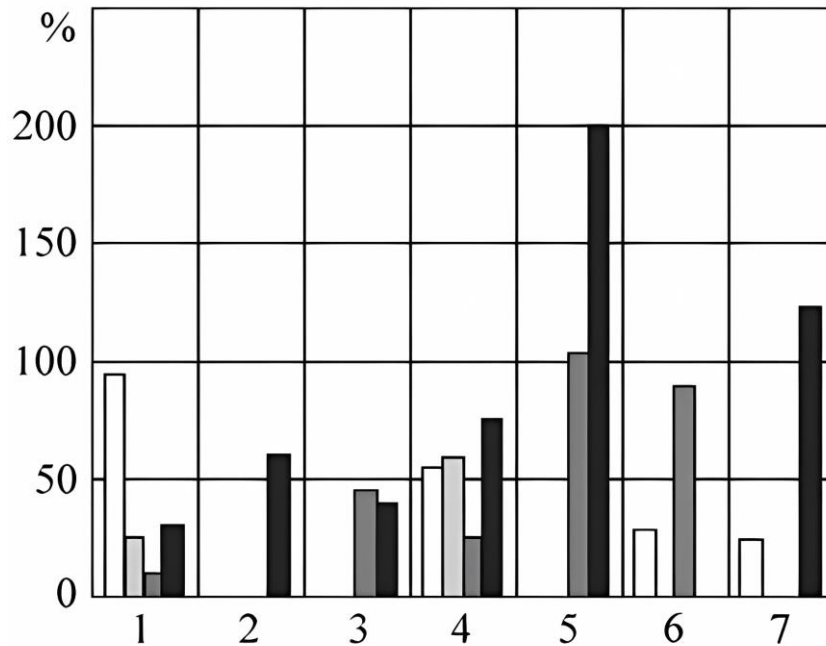


Рисунок 1.4 – Результаты влияния различных упрочняющих обработок на предел выносливости сварных соединений различной конфигурации. На диаграмме обозначены следующие обработки: 1 – механическая, 2 – высокий отпуск, 3 – предварительная перегрузка, 4 – наклеп, 5 – местный нагрев, 6 – локальное обжатие, 7 – импульсная. Стыковые соединения обозначены белым цветом, лобовые швы - серым, фланговые швы - темно-серым, а прикрепление конструктивных элементов – черным [49]

Помимо виброобработки, ультразвуковая ударная обработка является одной из разновидностей механического упрочнения сварных соединений [19, 43, 78, 106]. Она относится к послесварочным методам обработки и является разновидностью поверхностного пластического деформирования, так как глубина эффективного влияния ультразвуковых колебаний достигает до 10 мм. Достижение эффективного применения ультразвуковой обработки получилось возможным путем оптимизации энергетических и массогабаритных характеристик ультразвукового оборудования, что позволило широко использовать ультразвук в сварочном производстве. Для достижения наибольшего эффекта выбирают определенные режимы ультразвуковых частот для определенных зон влияния.

Влияние ультразвуковой ударной обработки заключается в изменении структурного и механического состояния поверхностного слоя, в блокировке пластических сдвигов и прекращении накопления повреждений. Совокупность методов, направленных на снижение остаточных напряжений представлены на рисунке 1.5.

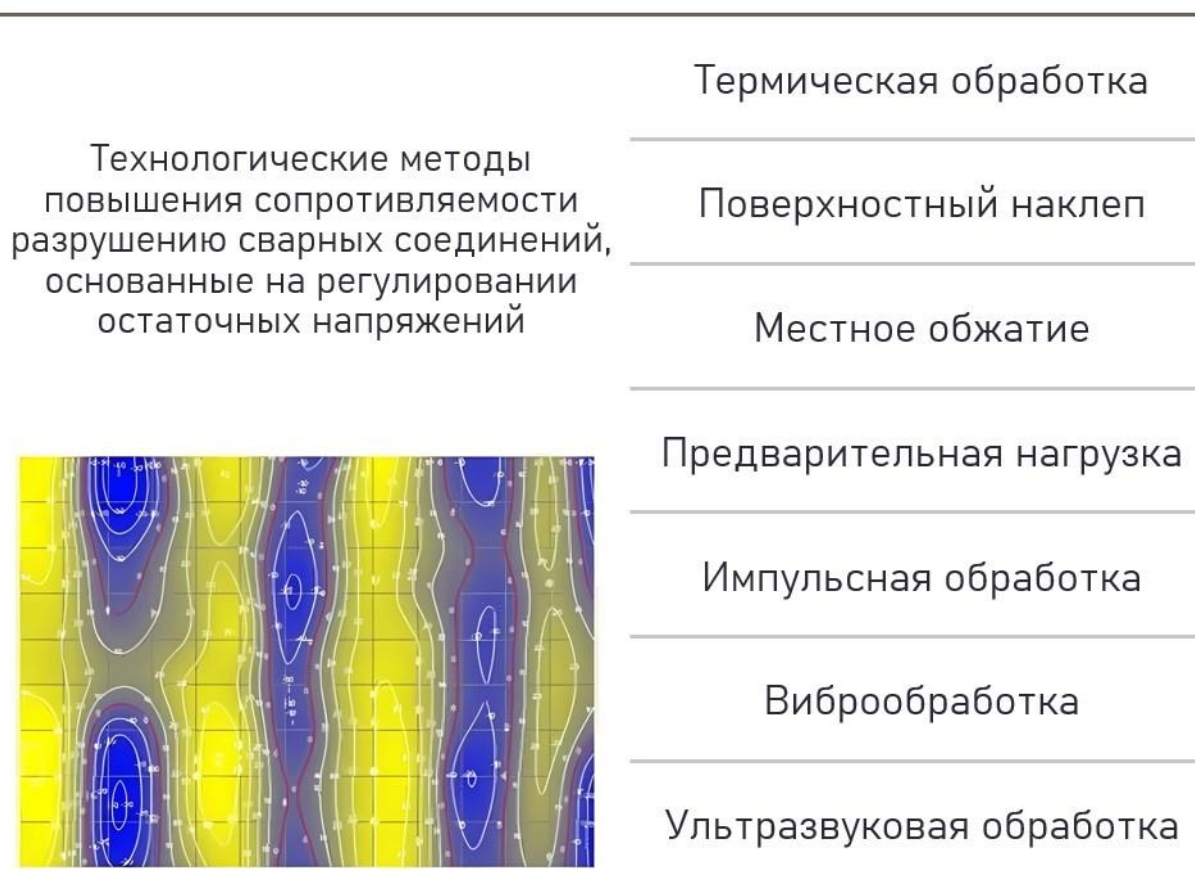


Рисунок 1.5 – Технологические методы повышения сопротивляемости разрушению сварных соединений, основанные на регулировании остаточных напряжений

Таким образом проведена классификация методов, направленных на повышение сопротивляемости усталостному разрушению сварных швов, которая представлена на рисунке 1.6.

Помимо предложенной классификации возможны и другие вариации. Например, упрочняющие обработки можно разделить по времени воздействия на сварное соединение, где ключевым фактором является продолжительность упрочнения. Кроме того, способы упрочнения можно разделить по стадии воздействия, таких как до, во время и после сварки.

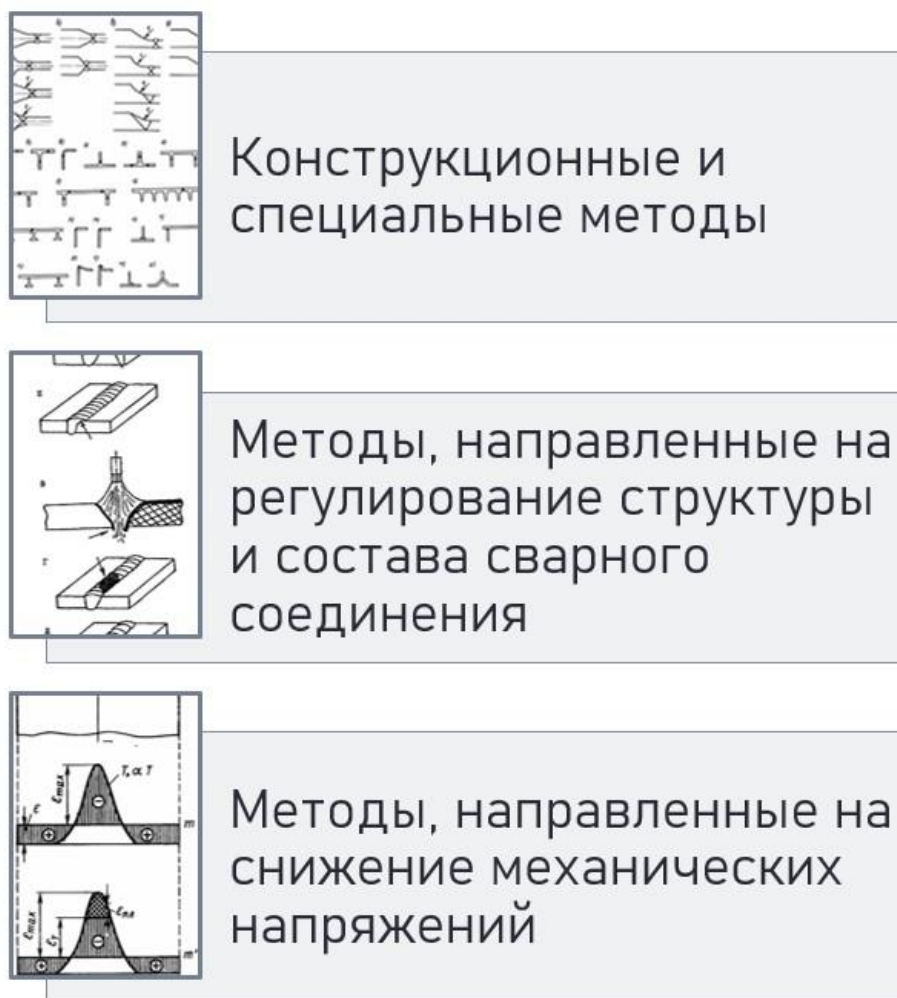


Рисунок 1.6 – Методы повышения сопротивляемости усталостному разрушению сварных соединений

В работе [96] к основным механизмам упрочнения материалов относят дислокационный и не дислокационный механизм упрочнения. Дислокационные механизмы упрочнения возможны лишь в тех материалах, которые в своем строении имеют кристаллическую решетку. Упрочнение происходит из-за перестройки структуры материала, на которую большое влияние оказывают такие процессы как, размножение дислокаций и изменение их количества, плотности, размеров, а также характера их распределения и торможения. К материалам, имеющим гетерогенную структуру, относится другой механизм упрочнения, реализованный в поликристаллических и аморфных телах [21].

Наиболее распространенные классификации способов упрочнения металлов были предложены выдающимися отечественными и зарубежными материаловедами, среди которых академик А.А. Бочвар [13], профессор М.Л.

Бернштейн [8], немецкие металловеды Р. Циммерман и К. Гюнтер [98]. Распределение методов упрочнения основано на механизмах упрочнения. В основе дислокационных механизмов лежат представления о торможении дислокаций, уменьшения их плотности, размеров в результате механического, термического и иных воздействий. В свою очередь упрочнение, связанное с недислокационными механизмами, основано либо на создании бездислокационных структур путем создания нанокристаллических и аморфных материалов, либо на изменении матрицы композиционных материалов.

Проведя классификацию упрочняющих обработок и проанализировав их результирующее воздействие на сварные соединения и их различные зоны, можно выделить два основных фактора, которые оказывают влияние на прочностные свойства: структурный и напряженно-деформированный. Под структурным понимается создание различных воздействий на материал, приводящих к улучшению качества структуры путем влияния на дефекты кристаллической решетки (устранение, торможение, уменьшение и др.). Напряженно-деформированный фактор связан уменьшением влияния механических напряжений на состояние сварной структуры. Контроль объектов, подверженных воздействию упрочняющих обработок, является наиболее неизвестным из-за усиливающегося влияния этих факторов. Поэтому проводить корректный контроль с учетом обоих факторов является важной задачей, решение которой предлагается в данном диссертационном исследовании.

Таким образом, упрочняющие воздействия на сварные соединения могут приводить к увеличению их сопротивляемости разрушению. Это, в свою очередь, должно способствовать повышению долговечности конечной сварной конструкции, которая может быть количественно выражена числом циклов до разрушения. Повышение надежности, безопасности, безотказности сварных соединения являются главной целью применения упрочняющих обработок. Однако, ряд упрочняющих обработок направлен на снижение остаточных напряжений в сварном соединении, что не всегда приводит к увеличению долговечности сварных соединений. Поэтому необходима проверка результата

воздействия упрочняющих обработок на сварных соединениях на реальных технических объектах, работающих в условиях переменных нагрузок, без нарушения целостности и вывода из эксплуатации. Совершенствование методов контроля влияния упрочняющих обработок на сварные соединения предлагается вести с позиции оценки влияния механизмов упрочнения на усталостные свойства и конечный ресурс, что на сегодняшний день оценивается на основе характеристик структуры или остаточных механических напряжений.

1.3 Классификация методов контроля влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

На этапе проектирования промышленного объекта закладывается информация о его безопасности и надежности [17, 45]. Выбор технологии изготовления и степень проработки конструкции в значительной степени оказывают влияние на конечный срок эксплуатации. Для его продления используют различные технологические операции, которые оказывают большое влияние на качество материала. В условиях эксплуатации в работоспособность конструкции вносят коррективы прочностная неоднородность, а также дефектность материала. Для выбора оптимальной упрочняющей обработки, помимо основных критериев выбора, необходимо также учитывать влияние неоднородности напряженного и структурного состояния.

Оценка влияния результата упрочняющих обработок сварных соединений сводится к контролю заданного параметра и осложняется тем, что требуется проводить контроль реальных материалов и элементов конструкций, не выводя их из эксплуатации. Нарушение конструктивной функции объекта, приводящее к непригодному состоянию для дальнейшей эксплуатации, в широком смысле слова понимается под нарушением прочности. Под образованием в теле новых плоскостей в результате разрушения понимают понижение прочности в узком смысле данного слова. С точки зрения кинетической концепции разрушения твердых тел [86] под разрушением понимается процесс, протекающий во времени. Появление недопустимо больших деформаций трактуется как разрушение

пластичных материалов. Однако, выполнение условия пластичности в одной точке тела еще не означает потери его несущей способности [50].

Развитие теоретических и экспериментальных исследований в области контроля качества привело к разработке методов контроля сварных соединений. Каждый из существующих способов имеет определенный диапазон применения, а его преимущества и недостатки требуют использования простых или сложных устройств. Чтобы более полно понять природу этих методов, необходимо их классифицировать. Главной особенностью классификации является физическая сущность, лежащая в основе метода. Все методы по оценке влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения можно разделить на разрушающие и неразрушающие. Классификация методов контроля оценки влияния упрочняющих обработок представлена на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Классификация методов контроля влияния упрочняющих обработок сварных соединений

1.3.1 Разрушающие методы оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

К первой группе относят разрушающие методы и их суть заключаются в определении конечных возможностей сварного соединения с помощью лабораторных испытаний контрольных образцов до их полного разрушения. Эти образцы должны быть изготовлены из того же материала и использовать ту же технологию производства, что и объекты контроля (для новых объектов), или они могут быть взяты непосредственно из сборных конструкций (для существующих объектов). Для определения результата влияния упрочняющих обработок сварных соединений используют разрушающие методы, которые включают в себя методы механических испытаний, химический анализ, металлографические и коррозионные исследования.

Механические испытания разделяются в зависимости от характера изменения текущей нагрузки во времени. Такие методы охватывают широкий спектр подходов, включая статические методы, такие как испытания на растяжение, сжатие, изгиб, ползучесть, измерение твердости и другие, а также динамические методы, в том числе испытания на ударный изгиб, старение, а также циклические методы для проверки усталостной прочности при растяжении, кручении, изгибе. В зависимости от воздействия температуры испытания могут проводиться при номинальной, низкой или высокой температуре. По продолжительности действия нагрузки они подразделяются на краткосрочные и длительные. Важно отметить, что все полученные в результате таких испытаний значения являются эталонными механическими характеристиками сварного соединения, которые используются для оценки результатов косвенных измерений. Однако следует учитывать, что структурные особенности, неоднородность прочностного и напряженно-деформированного состояния сварного шва конкретного образца оказывают значительное влияние на полученные результаты и их интерпретацию.

Основными нормативными документами, регламентирующим статические и динамические методы механических испытаний сварных соединений, является

ГОСТ Р 57180–2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры», для измерения длительных (циклических) механических характеристик используется ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». Такие методы являются прямыми методами оценки механических свойств, так как связаны с процессами разрушения, и основаны на измерении перемещений и деформации.

Механические испытания проводятся для основного металла и различных зон сварного соединений, а также непосредственно для сварного шва статическими, динамическими или усталостными методами [24, 27]. Образцы для проведения испытаний либо вырезаются непосредственно из контролируемого объекта, либо изготавливаются из тех же материалов, с тем же видом и режимом сварки, полностью соблюдая геометрические размеры и расположения шва в пространстве по подобию с объектом исследования. В отдельных случаях образцы для проведения механических испытаний могут отобраны из специально сваренных плоских образцов. Методика и условия проведения испытаний, а также требования к образцам и оборудованию, зависят от метода механических исследований и температурного режима, среды и т.д. при котором осуществляется измерение свойств сварных швов и околошовной зоны. Согласно нормативным документам определение механических свойств сварных соединений осуществляется с помощью лабораторных испытаний, описанных ниже.

Испытание металла сварного соединения и сварного шва на статическое растяжение [27]. Исследования проводятся на образцах различных типов, показанных на рисунке 1.8 (а, б), при различных температурах, при этом чаще всего используют плоские или цилиндрические заготовки, которые могут быть вырезаны из объекта контроля, либо изготовлены на основе подобию реальному объекту контроля. Испытаниям подвергаются металл шва, металл различных участков зоны термического влияния при сварке, выполненной плавлением, а также сам сварной шов. Сварной шов располагается посередине зажимов разрывной машины. Процесс исследований осуществляется путем приложения растягивающей

нагрузки с постоянной скоростью, при котором измеряют такие механические свойства как временное сопротивление, предел текучести, условный предел текучести, относительное удлинение и сужение после разрыва. Испытание на растяжение производится в целях выявления прочности и пластичности самого слабого участка сварного соединения. Помимо испытаний на растяжение, регламентирующим документом также предусмотрено испытание на статический изгиб, который позволяет определить максимальную нагрузку, которую сварное соединение может выдержать перед разрушением. Кроме того, это позволяет оценить пластичность и подтвердить, что сварное соединение обладает достаточной механической прочностью для требуемых условий эксплуатации.

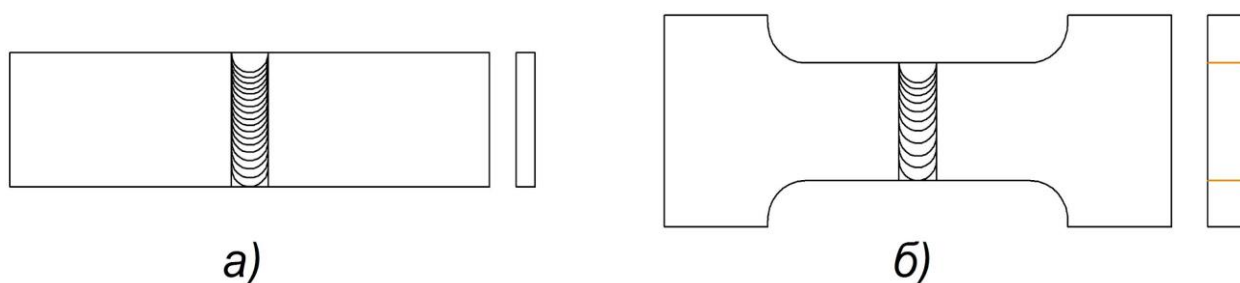


Рисунок 1.8 – Типовые образцы для проведения механических испытаний на статическое растяжение:

- а) – при толщине основного металла менее 3 мм,
- б) – при толщине основного металла более 3 мм [27]

Помимо определения механических свойств на статическое растяжение, сжатие и изгиб для определения других свойств активно применяются динамические испытания [27]. К основному способу динамических исследований относят динамическое испытание металла сварного соединения или сварного соединения на ударный изгиб и ударный разрыв, согласно ГОСТ Р 57180–2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры».

Для данного вида испытаний образцы изготавливаются или вырезаются из объекта контроля в которых удаляется выпуклость сварного шва и делается либо U-образный, либо V-образный надрез. Надрез осуществляется непосредственно на основном металле сварного соединения или на металле наплавления, или

термического влияния в околошовной зоне, или в сварном шве. По результатам испытаний определяют ударную вязкость или работу удара, или процентное соотношение хрупкой и вязкой составляющих поверхности излома. Испытания производятся на маятниковых копрах с различной предельной энергией.

Одной из разновидностей динамических испытаний является испытание основного металла и металла околошовной зоны на стойкость против старения [27]. Стойкость к старению металла сварного шва выражается в процентном соотношении изменением ударной вязкости образца, подвергнутого старению по отношению к исходному. Для этого плоские образцы с надрезом подвергают искусственному старению, которое заключается в растяжении образца на 10% и последующему равномерному нагреву в течении одного часа с охлаждением в воздушной среде. По результатам испытаний определяют стойкость к старению основного металла и металла околошовной зоны.

Еще одной разновидностью стандартных методик оценки механических свойств сварных соединений и околошовной зоны является усталостные испытания [24]. Образцы для проведения испытаний на усталость вырезаются непосредственно из объекта контроля, либо изготавливаются в виде гладких образцов круглого или прямоугольного сечения. Исследования проводятся при растяжении-сжатии, кручении и изгибе при различных условиях в много- и малоцикловой упругой или упругопластической области при симметричных и асимметричных циклах нагружения. Основной целью усталостных испытаний сварных соединений является определение их способности выдерживать повторяющиеся нагрузки без разрушения. Этот вид исследований позволяет оценить предел выносливости и число циклов до разрушения сварного соединения, что приближено к условиям реальной эксплуатации. К основным факторам, влияющим на долговечность сварного шва, относятся: концентраторы напряжений, дефектность сварного соединения, а также факторы металлургического характера. По результатам испытаний получают зависимость между действующими напряжениями и числом циклов до разрушения, которая называется кривой усталости. Данная кривая разделяется на три основных участка: участок

квазистатического разрушения, участок малоциклового усталости и участок многоциклового усталостного разрушения. В отдельных случаях выделяется участок гистоциклового или сверх многоциклового усталости. Стоит отметить, что проведение испытаний в особых условиях (наличие агрессивных сред, повышенных или пониженных температур и т.д.) регламентируется соответствующими нормативными документами. Методы механических испытаний представлены на рисунке 1.9.

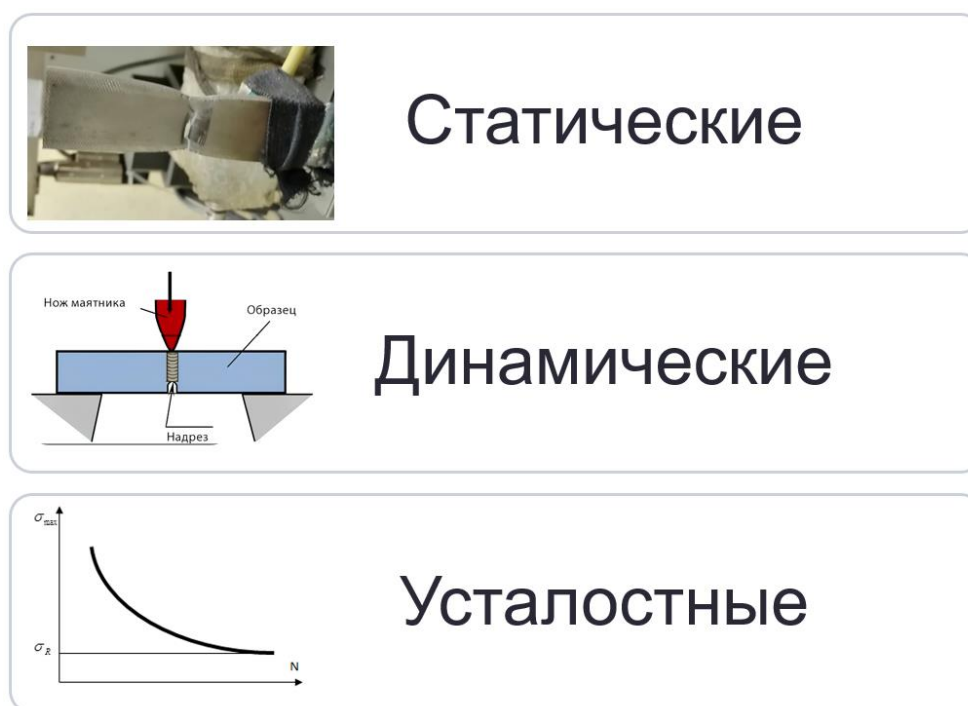


Рисунок 1.9 – Классификация методов механических испытаний

Помимо описанных выше методов, широкое распространение получили методы оценки механических характеристик, основанные на измерении твердости и микротвердости, как способности сопротивляться вдавливанию [29]. Сущность метода заключается во вдавливании более твердого тела в контролируемый объект и о твердости судят либо по размеру отпечатка, либо по высоте или скорости отскока бойка. Существуют разные способы определения твердости и перевод из одной шкалы в другую возможен лишь через приближенные таблицы, так как прямой взаимосвязи между разными определениями твердости нет. Выбор метода измерения зависит от задач измерения, свойств материала и др. [29]. Контроль влияния результата воздействия упрочняющих обработок на основе определения

твердости и микротвердости описан в работах [11, 47, 56]. На результаты измерений практически не оказывает влияния размеры структурных элементов, что предполагает возможность увязывания значений твердости с другими физико-механическими характеристиками [124]. Сущность заключается в известном факте, что процессе эксплуатации с возрастанием ее длительности происходит изменение физико-механических свойств материала.

Помимо описанных выше методов оценки механических испытаний сварных соединений для оценки микро и макроструктуры используются методы металлографического контроля различными измерительными средствами [27]. Суть данного способа оценки заключается в исследовании структуры и дефектов основного и наплавленного металла сварного соединения. Макрошлифы и изломы металла исследуются с помощью невооруженного глаза или лупы при микроскопическом методе. Оценку микроструктуры производят с помощью качественного (описание структур), количественного (геометрия структур) и полуколичественного (сравнение со шкалами структур) методов с помощью систем численного анализа изображения и получением спектра геометрических параметров элементов структуры. В основном данные методы используются для контроля качества поверхностного упрочнения в различных областях промышленности, где предъявляются высокие требования к структуре и качеству поверхности.

Для определения состава и содержания химических элементов в сварных соединениях используют химический анализ, который выполняется с методами фотоэлектрического спектрального анализа, рентгенофлуоресцентного анализа и др. в полном соответствии с нормативными документами. Данный метод востребован при исследовании влияния различных примесей и добавок на физико-механические свойства материала. Для определения долговечности материала в условиях влияния коррозии применяют коррозионные исследования, состоящие из целого ряда комплексных мер [88]. Оценку влияния упрочняющих воздействий, направленных на повышение коррозионной стойкости, производят с помощью

данного метода. Совокупность разрушающих методов определения механических свойств сварных швов и околошовной зоны наглядно представлена на рисунке 1.10.

В большинстве случаев объекты, подверженные повторно-переменным нагрузкам, работают в условиях небольшой частоты нагружения и подвергаются гибким изменениям величины нагрузки, что в свою очередь приводит к усталостному накоплению повреждений. При этом большинство разрушающих методов оценки качества сварных соединений направлены на определение стандартных характеристик прочности. Таким образом, именно результаты усталостных испытаний являются предпочтительными при оценке результата влияния упрочняющих обработок, воздействующих на сварные соединения.



Рисунок 1.10 – Классификация разрушающих методов оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

1.3.2 Неразрушающие методы оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

Вторая группа методов связана с исследованием сварных соединений неразрушающими методами, что позволяет поддерживать эксплуатационную пригодность рассматриваемого объекта без нарушения его целостности и является

наиболее приемлемым при проверке объектов в процессе эксплуатации. Основными направлениями оценки влияния результатов упрочнения является контроль физико-механических характеристик, дефектоскопия сварных соединений и измерение внутренних механических напряжений. На результаты исследований неразрушающими методами оказывает влияние неоднородное состояние структуры объекта исследования и напряженно-деформированного состояния, которые вносят неопределенность в результаты измерений, что не всегда принимается во внимание.

К первой группе неразрушающих методов оценки относится контроль физико-механических характеристик [42]. Их сущность заключается в поиске корреляции между контролируемыми физическими параметрами и механическими характеристиками сварных соединений. Среди данной группы методов выделяются в основном активные, такие как акустические, вихретоковые и магнитные методы, методы измерения микротвердости и другие методы.

Акустические методы оценки физико-механических свойств основаны на связи характеристик упругих колебаний с эксплуатационными свойствами основного металла сварных соединений. Выделяют основные методы, основанные на измерении скорости ультразвука, коэффициента затухания, акустического импеданса. В первом случае происходит поиск корреляции между скоростью распространения упругих волн и структурой основного металла сварных соединений. Оценивают модуль упругости и предел прочности околошовной сварных соединений. Изменение скорости основано главным образом на рассеянии ультразвука. Среднее расстояние между неоднородностями и средний размер неоднородностей с длиной волны ультразвука влияет на величину коэффициента рассеяния. Во втором случае по отношению исходного и прошедшего сигнала производится оценка коэффициента затухания. Данный метод в основном используют при контроле размеров зерен и межкристаллитной коррозии. Измерение акустического импеданса используется для контроля качества клеевых соединений и для измерения твердости. Когезионная прочность оценивается по влиянию акустического сопротивления поверхности на резонансные

характеристики преобразователя. Акустические методы также используются для контроля упругой анизотропии, содержания различных веществ, твердости, напряженного состояния, межкристаллитной коррозии, прочности и др. [3, 25, 37]. Использование данных методов предполагается в условия изотропии и структурной однородности, а в условиях гетерогенности измерение контролируемых сигналов приводит к влиянию неопределенности на результат.

Магнитные методы оценки физико-механических свойств используются для контроля содержания примесей, химического состава, твердости, размеров зерен, анизотропии свойств и напряженного состояния, а также для контроля качества термического упрочнения. Измеренные характеристики размера и формы петли гистерезиса являются контролируемыми факторами, поэтому по ним можно судить о контролируемых свойствах ферромагнетиков. Широкое распространение получили методы контроля структуры на основе коэрцитивной силы [42, 59]. В работе [10] установлена корреляционная связь между пределом прочности и коэрцитивной силой для различных сталей, показывающая, что с ростом численных значений прочности возрастает и значения коэрцитивной силы. Однако, на данную контролируемую характеристику также оказывает влияние различные факторы структурного и термического состояния, в том числе и размер структурного элемента [108].

Структурное состояние также оказывает влияние на электромагнитные свойства материала, которые можно контролировать с помощью вихретоковых методов оценки физико-механических свойств. Сущность вихретокового метода заключается в анализе воздействия внешнего электромагнитного поля на электромагнитное поле, индуцируемое в объекте контроля за счет вихревых токов. Такой подход применяется для оценки разнообразных параметров материалов, включая предел прочности, химический состав, твердость и механические свойства как ферромагнитных, так и неферромагнитных материалов. Кроме того, вихретоковый метод находит применение в оценке качества химической и химико-термической обработки материалов. При этом структурная неоднородность оказывает влияние на результат контроля. В качестве контролируемого параметра

при контроле ферромагнитных материалов используется удельная электрическая проводимость [100], которая зависит от размера структурного элемента. При этом, согласно [18, 97, 115] размер зерна оказывает влияние на предел прочности образца.

Ко второй группе методов относится дефектоскопия сварных швов, околошовной зоны и основного металла. Основным нормативным документом по оценке качества сварных соединений является ГОСТ 3242–79 «Соединения сварные. Методы контроля качества», который регламентирует использование неразрушающих методов контроля для обнаружения несплошностей в сварных соединениях из металлов и сплавов, выполненных любым видом сварки. Виды неразрушающих методов контроля, а также типа дефектов, которые они выявляют представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Неразрушающие методы оценки качества сварных соединений [26]

Вид контроля	Выявляемые дефекты
Визуальный и измерительный	Поверхностные дефекты
Радиационный	Внутренние и поверхностные дефекты (несплошности), а также дефекты формы соединения
Акустический	Внутренние и поверхностные дефекты (несплошности)
Магнитный	Поверхностные, подповерхностные и внутренние несплошности
Проникающими веществами	Сквозные, внутренние и поверхностные дефекты

Сущность неразрушающих методов контроля по отдельности или в совокупности заключается в анализе прямого преобразования энергии излучения волн, отраженных от дефекта, либо прошедших через контролируемую среду. Дефекты, образующиеся в сварном соединении, влияют на механические характеристики, однако учесть их негативное воздействие в каждом конкретном случае представляет собой трудоемкую задачу.

Визуальный и измерительный метод контроля является одним из наиболее распространенных, простых и дешевых способов оценки качества сварных соединений и регламентируется ГОСТ Р ИСО 17637–2014 «Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением». С его помощью возможно визуально обнаружить поверхностные дефекты, которые могут негативно влиять на надежность соединения [20]. Основными инструментами визуального контроля являются невооруженный глаз, специальные оптические устройства и другие инструменты. Визуальный контроль проводится путем внимательного осмотра сварного соединения, включая сварные швы, зоны нагрева и зоны основного металла. Такой метод широко используют на всех этапах сварочного процесса. Он может быть применен как для крупногабаритных конструкций, так и для мелких деталей. Кроме того, визуальный контроль обычно дополняется другими методами для более точного обнаружения дефектов.

Радиационный вид неразрушающего контроля является эффективным способом оценки качества сварных соединений, который регламентируется ГОСТ 7512–82 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод». Он основан на использовании коротковолнового электромагнитного ионизирующего для обнаружения дефектов сварного шва и околошовной зоны [94]. В радиационном методе контроля применяются различные виды ионизирующего излучения, включая рентгеновское и гамма-излучение. Источники излучения располагаются на одной стороне сварного соединения, а приемники на противоположной стороне. Когда излучение проходит через сварной шов и образцы, оно поглощается в разной степени в зависимости от толщины и плотности материала, а также наличия дефектов. Приемники регистрируют уровень поглощения излучения, а результаты обработки сигнала позволяют определить наличие дефектов или отклонений от заданных параметров сварного соединения. Радиационный метод контроля способен выявлять как поверхностные, так и внутренние дефекты, что делает его полезным инструментом для обнаружения скрытых несплошностей в сварных соединениях.

Из всего многообразия методов неразрушающего контроля акустического вида в основном используется ультразвуковой метод, регламентированный ГОСТ Р 55724–2013 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые», который содержит в себе совокупность эхо-акустических методов для контроля сварных соединений. Ультразвуковой метод контроля сварных соединений является одним из неразрушающих методов, который использует упругие колебания для оценки качества сварных соединений [2]. Ультразвуковые волны передаются через поверхность сварного соединения и регистрируются преобразователями, которые могут быть расположены по разные стороны соединения. Затем полученная информация обрабатывается при помощи специальных приборов и программного обеспечения для анализа и интерпретации данных. Ультразвуковой метод позволяет обнаружить различные дефекты, которые могут оказывать влияние на качество соединения, что впоследствии влияет на ресурс данного элемента. Этот метод широко распространен во многих промышленных отраслях, где требуется высокая надежность сварных соединений.

Сущность ультразвукового метода заключается в анализе взаимодействия упругих колебаний со сварным соединением [3]. Ультразвуковые волны передаются через поверхность сварного соединения и регистрируются преобразователями, которые могут быть расположены по разные стороны соединения. Затем полученная информация обрабатывается при помощи специальных приборов и программного обеспечения для анализа и интерпретации данных, при этом появляется возможность определить местоположение и размер дефектов. Один из основных преимуществ ультразвукового метода контроля заключается в его способности обнаруживать дефекты не только на поверхности, но и внутри материала, что обеспечивает более объективную и всестороннюю оценку качества сварного соединения. Более того, УЗК является быстрым и относительно недорогим методом контроля, что позволяет его широкое применение в производственных условиях.

К следующему способу оценки качества сварных соединений относят магнитный вид неразрушающего контроля, среди которых используются

магнитоферрозондовый, магнитопорошковый и магнитографический методы [83]. Основным нормативным документом, регулирующим методики применения данного вида НК, является ГОСТ 21104–75 «Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод». Магнитоферрозондовый метод контроля сварных соединений является одним из неразрушающих методов, который используется для оценки качества сварных соединений. Этот метод основан на измерении магнитных свойств материала и обнаружении дефектов или неоднородностей внутри сварного соединения. Принцип работы метода заключается в создании магнитного поля вокруг сварного соединения с помощью постоянных магнитов или электромагнитных систем. В результате магнитного воздействия происходит магнитная насыщенность материала, которая может быть изменена при наличии дефектов. Далее, с помощью феррозондовых преобразователей происходит измерение параметров магнитного поля вдоль сварного соединения. Преимуществами магнитоферрозондового метода являются его относительная простота и экономичность, а также возможность проведения контроля на больших площадях сварного соединения. Кроме того, этот метод обладает высокой чувствительностью к обнаружению дефектов различного характера и глубины, и может быть применен на различных материалах, в том числе на магнитных и немагнитных сталях.

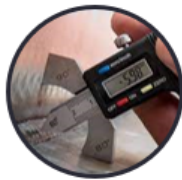
Еще одним из распространенных методов контроля является магнитопорошковый контроль [93]. В этом методе на поверхность сварного соединения наносится магнитопорошковая смесь, которая содержит магнитные частицы. Затем создается магнитное поле, которое выявляет дефекты и неоднородности под поверхностью сварного соединения. Магнитопорошковый метод контроля обладает рядом преимуществ, таких как высокая скорость и точность контроля, возможность обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, а также возможность автоматизации процесса контроля. Магнитографический метод контроля является еще одним неразрушающим методом, который применяется для оценки качества сварных соединений. Сущность метода заключается в записи магнитного поля на

магнитную пленку в процессе намагничивания сварного соединения различными схемами. Впоследствии полученная информация считывается с помощью специальных дефектоскопов для дальнейшего анализа. Данный метод позволяет обнаруживать поверхностные, подповерхностные и внутренние несплошности сварного соединения, а также данный метод обладает высокой оперативностью.

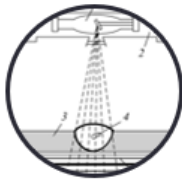
Контроль проникающими веществами является также одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля для оценки качества сварных соединений [73]. Этот метод предназначен для выявления нарушений сплошности в поверхностных слоях сварных соединений и дополняет собой визуальный осмотр, при котором невозможно обнаружить малые дефекты. Сам контроль осуществляется двумя способами. В первом случае осуществляется полирование сварного соединения с последующим травлением различными растворами кислот для повышения контрастности изображения. Однако, такой способ осуществим только на локальных участках поверхности сварных швов, а в производственных условиях нерентабелен. Во втором случае происходит заполнение дефектов специальными индикаторными свето- и цветоконтрастными проникающими жидкостями, которые повышают контрастность изображения на основе изменения светоотдачи. Контроль осуществляется путем нанесения на подготовленную (очищенную и обезжиренную) поверхность пенетранта с последующим выдерживанием и удалением данной жидкости, при этом полости дефекта остаются заполненными пенетрантом. Выявление дефектов происходит под воздействием электромагнитных волн разного диапазона, при этом иногда наносится специальный проявитель для улучшения контрастности индикаторного следа. Явление капиллярной активности является физической сущностью данной группы методов, которая заключается в способности проникающего вещества втягиваться в микроскопические сплошные, либо открытые с одной стороны, несплошности.

Помимо описанных выше методов, в промышленности, в качестве инструментов дефектоскопии, используются и другие методы неразрушающего контроля [73]. Например, вихретоковая дефектоскопия успешно применяется для

контроля сварных соединений из алюминиевых сплавов [95], опираясь на использование электромагнитных полей для обнаружения изменений в проводимости материала, что может свидетельствовать о наличии дефектов. Тем не менее, применение этого метода для контроля сварных соединений из металлических материалов ограничено из-за различий в электропроводности в различных зонах сварного соединения, что влияет на точность результатов контроля в связи со структурной неоднородностью сварного соединения. Кроме того, используется тепловой, электрический и другие методы. Совокупность всех методов неразрушающего контроля качества сварных соединений представлено на рисунке 1.11.



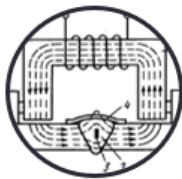
Визуально-измерительный контроль
(ГОСТ Р ИСО 17637-2014)



Радиационный контроль
(ГОСТ 7512-82)



Акустический контроль
(в частности ГОСТ Р 55724-2013)



Магнитный контроль
(в частности ГОСТ 21104-75)



Контроль проникающими веществами
(ГОСТ Р ИСО 3452-1-2011)

Рисунок 1.11 – Классификация неразрушающих методов контроля влияния упрочняющих обработок сварных соединений

Все описанные выше и предложенные нормативными документами неразрушающие методы не содержат информации о моменте и причине появления дефектов, что осложняет увязывание первичных параметров таких методов контроля с процессами накопления повреждений. Из-за того, что технические объекты, работающие в условиях повторно-переменных нагрузок, испытывают постоянные перепады нагрузок, предпочтительными являются методы наблюдения за накоплением усталостной повреждаемости, так как позволяют проследить за эволюцией данного процесса, что при должной физической интерпретации данного процесса предоставляется возможным увязать первичные параметры контроля с показателями надежности через соответствующие модели.

К последней группе неразрушающей оценки качества сварных соединений относят методы измерения механических напряжений [6, 91], которые основаны на измерении деформация-пространственных параметров для дальнейшего расчета механических напряжений. Возникающие в материале механические напряжения могут достигать величины предела текучести и в случае совпадения с направлением приложения нагрузки оказывают существенное влияние на расчетный ресурс конструкции. Также они оказывают влияние на результат измерения физико-механических величин прямыми и косвенными методами [75]. Согласно [12] при циклических нагрузках значительного влияния остаточных напряжений на циклическую прочность не наблюдалось. Тем не менее, данная группа методов активно используется для оценки влияния упрочняющих воздействий, особенно для поверхностного упрочнения. Помимо традиционных механических методов измерения применяют и физические в основу которых входят: рентгеновский, акустический, нейтронный методы, метод магнитной памяти и методы, основанные на теплофизических свойствах среды. Сущность физических методов основана на зависимости физических свойств материала от механических напряжений [75]. На результаты большинства методов оказывает влияние структурная неоднородность материала, в результате которой фиксируется геометрический (пространственный) сигнал-деформация, а значит контролируются только те напряжения, которые возникают на наиболее крупных

структурных элементах. Прочные структурные элементы, определяющие ресурс, меньше в размерах и определяются хуже, поэтому механические напряжения на них хуже контролируются, а значит и влияние их на ресурс тоже.

Неразрушающий контроль результата влияния упрочняющих обработок на сварные соединения тесно связан с контролем остаточных напряжений. Однако оценка остаточных напряжений происходит по всему объему элементов изделия, например, сварному шву, без учета гетерогенности, то есть как сплошное тело. А определяются они гетерогенно, так как рассматривается отражение только от отдельных структурных элементов, которые обладают наибольшим деформационными характеристиками. Происходит некоторая упрощенная оценка остаточных напряжений, которая связана с определением отражательных свойств крупных структурных элементов, которая рассматривается как отражение от всех структурных элементов. В то время как за долговечность сварных соединений отвечают структурные элементы с наименьшим размером [115]. Это связано в первую очередь с отсутствием дефектов в кристаллической решетке, что не выявляется методами неразрушающего контроля. Отсюда вытекает основное противоречие, связанное с тем, что контролю подвергаются одни структурные элементы, в то время как за состояние объекта контроля отвечают совсем другие, что в конечном счете приводит к повышению неопределенности в оценке влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения.

Неразрушающие методы оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения являются косвенными и в основном регистрируют сигналы, которые главным образом связаны с пространственными характеристиками структурных элементов, определяемые их формой, размерами и ориентацией в пространстве. Согласно [86] разрушение — это процесс, который протекает во времени и сопротивляемость данному процессу можно представить временной характеристикой, что справедливо для всех твердых тел. В этой связи, предлагается переход к контролю временных характеристик, которые определяют интенсивность процесса накопления повреждений в материале. Сопротивление разрушению определяется на атомно-молекулярном уровне и характеристики

прочности зависят от размера структурного элемента. На повышение характеристик пластичности с увеличением прочностных характеристик влияет уменьшение величины зерна [18, 115]. Чем меньше зерно, тем труднее развиваются усталостные повреждения. Поэтому возникает противоречие при контроле процессов, влияющих на снижение сопротивляемости разрушению, активными методами, так как контролируются параметры, несвязанные с этим процессом. Кроме того, определение деформаций и перемещений в сварных соединениях еще не дает ответа на вопрос об их долговечности. Поэтому предпочтительными в данном случае являются методы наблюдения за процессом накопления повреждений с регистрацией временных параметров.

Существуют различные методы, с помощью которых происходит экспериментальное наблюдение за повреждаемостью. Одним из них является магнитный метод, который основан на регистрации параметров, связанных с собственным полем рассеяния, магнитной анизотропией, эффектом Баркгаузена [48]. Также используют термоэлектрические методы, которые регистрируют температуру саморазогрева или число циклов нагружения, которое необходимо для саморазогрева материала из-за гистерезисных потерь. К данной группе относятся вихретоковые методы, которые регистрируют параметры токов Фуко. Методы, базирующиеся на определении коэффициента поглощения, относительного модуля упругости материала, относительной ширины петли гистерезиса, на измерении остаточной прочности также относятся к данной группе. Следующим методом можно выделить контактный метод электропроводности, заключающийся в измерении электропроводности материала [69]. Из обширной группы акустических методов можно выделить пассивный метод регистрации упругих колебаний, которые возникают, главным образом, при образовании повреждений в материале сварного соединения. Этим методом является акустическая эмиссия, которая является одним из самых перспективных и привлекательных методов для неразрушающего контроля различных материалов, так как метод высоко чувствителен к образованию микротрещин [4, 7, 62] и основан на регистрации временных и энергетических параметров определяющего долговечность процесса

накопления повреждений. Однако, требуется развитие метода, так как используемая в качестве основного информативного параметра амплитуда сигналов АЭ зависит от большого количества факторов, дестабилизирующих ее связь с параметрами надежности.

Все методы определения механических свойств различных материалов основаны на описанных выше двух принципах. Наиболее распространенным является разрушающий метод контроля стандартных характеристик прочности, который делает невозможным оценку влияния результата воздействия упрочняющих обработок на реальных объектах. Эта проблема создает предпосылку для развития методов неразрушающего контроля, с помощью которых возможна оценка влияния результата упрочнения без нарушения их целостности. Существующие методы неразрушающего контроля, применяемые для анализа воздействия упрочняющих обработок, могут быть систематизированы в зависимости от основного контролируемого параметра и его взаимодействия с процессами, способствующими формированию и накоплению повреждений. Сигналы, получаемые при использовании методов прохождения и отражения внешних волн различных физических полей, часто демонстрируют неоднозначную связь с процессом эволюции повреждений. Данная группа методов фиксирует искажения от крупных отражателей, огибая 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, которые используют фиксацию излучения упругих волн из сварного соединения, потому что эти сигналы могут быть связаны с процессом развития и накопления повреждений в сварном соединении.

Одним из вариантов совершенствования методов оценки влияния результата упрочняющих обработок на сварные соединения может рассматриваться методика [89, 92-94] к интерпретации результатов акустической эмиссии, объединяющая структурные свойства и внутренние напряжения как критерии упрочнения через регистрацию времён разрушения ответственных за ресурс структурных элементов.

1.4 Выводы по главе 1

1. Установлено, что сварное соединение является ответственным элементом технических объектов, длительно работающих при низких напряжениях в условиях повторно переменных нагрузок, и ограничивает ресурс таких объектов.

2. Предложен критерий оценки влияния результата воздействия упрочняющих обработок на сварные соединения, связанный с увеличением заданной характеристики сопротивления длительному разрушению относительно исходных значений.

3. Произведена классификация упрочняющих обработок, результат которых направлен на повышение сопротивляемости усталостному разрушению сварных соединений. Установлено, что влияние упрочняющих воздействий направлено на улучшение состава и структуры, а также напряженно-деформированного состояния сварного соединения.

4. Произведена классификация методов оценки влияния результата упрочняющих воздействий, направленных на сварные соединения. Предложено использовать методы неразрушающего контроля, способные произвести оценку оперативно и без нарушения целостности.

5. Обосновано использование неразрушающих методов контроля, основанных на фиксации акустических сигналов, связанных с процессом накопления повреждений в сварном соединении.

6. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ АЭ) В КАЧЕСТВЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Метод акустической эмиссии как способ слежения за накоплением повреждений в сварных соединениях

Метод акустической эмиссии (АЭ) используется как явление физическое, которое отражает сущность происходящих в материалах процессов. С позиции практического применения АЭ используется как для неразрушающего контроля, так и для исследования свойств материалов и изделий, веществ, природной среды. Многие промышленные объекты, такие как сосуды давления, металлоконструкции подъемно-транспортных машин, трубопроводы и т.д., являются базовыми объектами АЭ контроля. Воздействие упрочняющих обработок возможно, как в процессе изготовления данных объектов, так и в процессе эксплуатации, во время ремонта и технического обслуживания, что позволяет использовать явление АЭ для исследования влияния упрочняющего воздействия на сварное соединение [1, 4, 92].

Метод акустической эмиссии является неразрушающим пассивным акустическим методом диагностики, который основан на регистрации и интерпретации акустических сигналов, возникающих при деформации или разрушении материала. Этот метод широко применяется для оценки состояния различных конструкций и материалов, включая сварные соединения. Явление акустической эмиссии для оценки сварных соединений представлено на рисунке 2.1. Акустическая эмиссия возникает в результате выделения энергии в виде упругих колебаний при трении, накоплении повреждений, зарождении и развитии несплошностей и т.д. внутри контролируемого объекта. Преобразователи акустической эмиссии, например, в виде пьезоэлектрических пластин, регистрируют и преобразуют эти волны в электрические сигналы, которые затем записываются и визуализируются с помощью специализированного программного обеспечения.

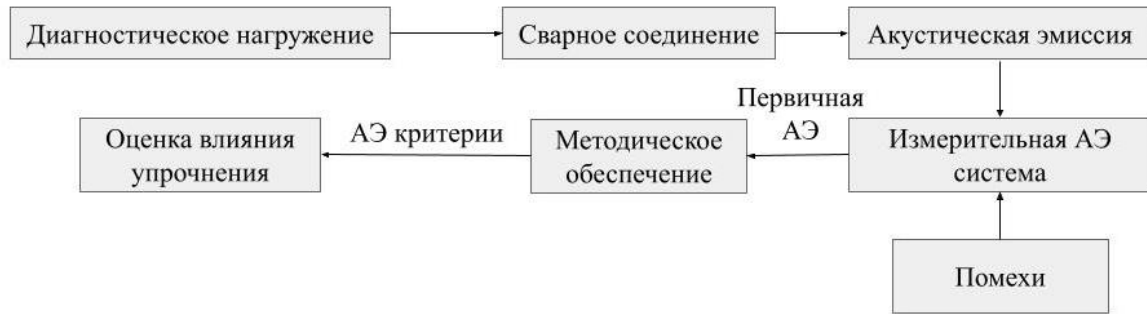


Рисунок 2.1 – Принцип реализации метода акустической эмиссии для оценки влияния упрочнения на сварные соединения [72]

Метод акустической эмиссии позволяет обнаруживать различные несплошности, например, в виде трещин, а также отслеживать и контролировать их рост в реальном времени. Благодаря высокой чувствительности и возможности анализа сигналов в широком диапазоне частот, метод АЭ может обнаруживать даже мельчайшие разрушения, которые могут быть незаметны при других методах контроля. Основными преимуществами метода АЭ являются [69, 92]:

- **Интегральность.** Метод акустической эмиссии предоставляет уникальную возможность полного контроля объекта, охватывая также участки, которые могут быть труднодоступными или недоступными для обычных методов контроля. Этот метод особенно полезен при диагностике подземных трубопроводных систем, объектов, находящихся в изоляции, резервуаров, колонных и емкостных устройств. Уникальность заключается в том, что для проведения контроля используется всего несколько датчиков, что значительно упрощает и ускоряет процесс проверки.

- **Обнаружение и мониторинг несплошностей.** Метод АЭ контроля представляет собой эффективный способ обнаружения и регистрации развивающихся дефектов в объекте, а также их классификацию по степени опасности. Одним из важных преимуществ этого метода является способность обнаруживать повреждения контролируемого объекта задолго до наступления критического состояния. В свою очередь это позволяет своевременно планировать и проводить ремонтные мероприятия, а также применять превентивные меры для

предотвращения аварийных ситуаций. Благодаря использованию метода АЭ контроля, значительно повышается уровень безопасности объекта и обеспечивается его более долговечное эксплуатационное состояние.

- Непрерывность контроля. Благодаря применению метода АЭ контроля, обеспечивается непрерывный мониторинг технического состояния объекта во время его эксплуатации. Это приводит к переходу от традиционного контроля объекта с определенной периодичностью к режиму эксплуатации, основанному на фактическом техническом состоянии. Это революционное развитие области безопасности и обслуживания объектов, позволяющее предотвращать потенциальные проблемы и повышать эффективность эксплуатации за счет оперативного реагирования на возникающие повреждения и отклонения в работе. В результате ресурсы могут быть использованы оптимальным образом, обеспечивая надежность и долговечность эксплуатации объекта.

- Высокая чувствительность. Уникальность метода заключается в его способности обнаруживать дефекты независимо от их местоположения, ориентации и пространственной конфигурации. Он обеспечивает обнаружение не только трещин и микротрещин, но и других повреждений, таких как расслоения и водородное охрупчивание. Важно отметить, что данный метод применим для обследования объектов с практически любой конфигурацией и из различных материалов. Этот подход применим к широкому спектру материалов, и его возможности практически не ограничены свойствами и структурой материалов. Одно из важных преимуществ метода - его способность точно локализовать дефекты. Благодаря этому уменьшаются затраты на дополнительные обследования и значительно упрощается проведение ремонтно-восстановительных работ. В итоге, применение данного метода значительно повышает эффективность и эффективность процессов контроля и устранения дефектов, что ведет к улучшению качества сварных соединений.

- Дистанционный контроль. Под дистанционным контролем понимается способность осуществлять контроль с небольшого расстояния от объекта. Такая особенность метода позволяет эффективно применять его для надзора и

управления критически важными и особо опасными объектами, минуя необходимость их остановки и рисков для персонала. Такой способ контроля способствует снижению затрат и повышению безопасности в различных областях, от энергетики до промышленности, обеспечивая возможность бесперебойного мониторинга и обслуживания.

- Требования к объекту контроля. В отличие от сканирующих подходов в неразрушающем контроле, акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой метод, который снижает требования к подготовке поверхности объекта для исследования. Это означает, что проведение контроля с применением АЭ не зависит от того, насколько готова или обработана поверхность объекта. Кроме того, даже в случае наличия изоляционных покрытий, их не требуется полностью снимать, доступ необходим только к месту крепления датчиков. Таким образом, метод АЭ предоставляет удобство и эффективность в проведении неразрушающего контроля, а также минимизирует влияние факторов, влияющих на результаты контроля, связанных с подготовкой объекта.

Для появления в объекте контроля упругих колебаний его подвергают воздействию силой, давлением или изменением температуры, которые определяются конструкцией объекта и условиями его эксплуатации. Данный факт является как преимуществом метода, так и недостатком. Преимущество заключается в контроле объекта в условиях рабочего нагружения, а недостатком является тот факт, что каждое нагружение является уникальным и ставит под сомнение воспроизводимость контроля. Кроме того, еще одним недостатком, с которой сталкивается метод акустической эмиссии (АЭ) при проведении неразрушающего контроля, являются разнообразные шумы различной природы. Эти шумы могут иметь разное происхождение, включая как электромагнитные, так и механические, импульсные и непрерывные. Такие искажения могут значительно затруднить обработку сигналов, полученных при использовании метода акустической эмиссии. В частности, выявление активности акустической эмиссии, особенно при минимальных изменениях несплошностей, является трудоемкой задачей. Тем не менее, современные технологии позволяют внедрять различные

фильтры и тонко настраивать пороги срабатывания для каждого канала, что в некоторой степени решает данную проблему. Кроме того, оборудование становится более устойчивым к помехам и внешним воздействиям. Некоторые исследователи считают [68, 69], что главным вызовом метода акустической эмиссии является извлечение полезных сигналов из общего потока. Такой отбор сигналов позволяет выделять полезную информацию о состоянии объекта полностью абстрагировавшись от остальных мешающих сигналов, не несущих в себе информацию.

Согласно литературным сведениям основными источниками сигналов акустической эмиссии являются различные физические процессы, такие как первичные макроскопические скачки трещин, процессы, связанные с деформацией материала и его разрушением, утечка, трение, удары, химические реакции, изменения размеров магнитных доменов и многие другие процессы, и явления [92]. Графическая интерпретация сигналов акустической эмиссии представлена на рисунке 2.2. Согласно ГОСТ Р 52727–2007 «Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования», источники акустической эмиссии разделяют на четыре класса: пассивные, активные, критически активные и катастрофически активные. В первом случае источник акустической эмиссии относят к не опасному дефекту и сигналы регистрируются для последующего анализа развития событий. Во втором случае регистрируется умеренно опасный развивающийся дефект. В процессе проведения испытаний ведется наблюдение за данным источником для дальнейшего принятия решения, на основе информации о его поведении. В случае его эволюции предоставляются рекомендации о дополнительном контроле другими неразрушающими методами. В третьем случае за источником подразумевается опасный дефект, за поведением которого требуется пристальное внимание и в случае необходимости предпринимаются шаги к снижению воздействующей нагрузки. К последнему, четвертому случае источник признается катастрофически опасным дефектом. При возникновении признаков источника IV класса, производится снижение нагрузки до комфортного уровня, при котором данный источник перестает быть опасным, либо нагрузка полностью

снимается для дальнейшего осмотра объекта и назначением дополнительного неразрушающего контроля.

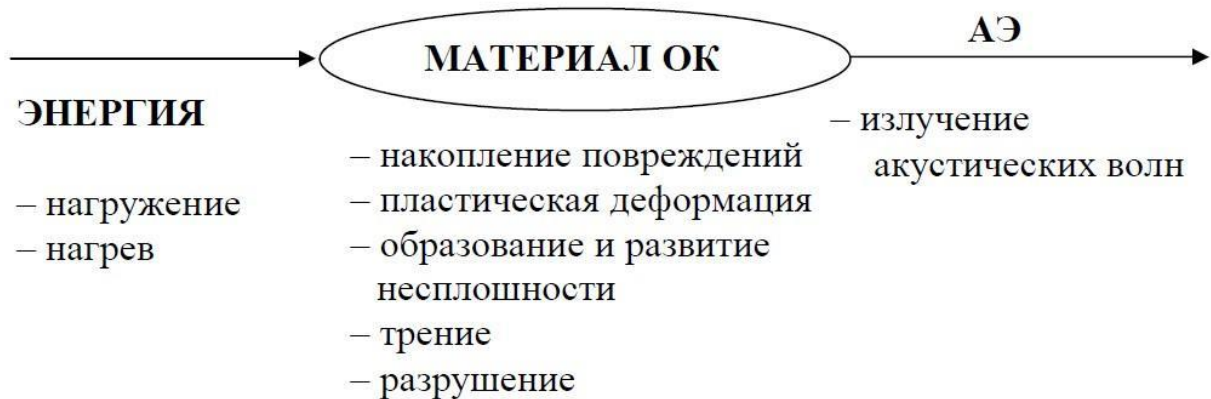


Рисунок 2.2 – Основные источники акустической эмиссии [9]

Для регистрации упругих колебаний, возникающих в сварных соединениях при воздействии внешних приложенных сил, применяются акустико-эмиссионные преобразователи. Их можно разделить по физическому принципу работы на пьезоэлектрические, магнитострикционные, оптические и другие.

Основными нормативными документами, регулирующими применение метода акустической эмиссии для объектов, подверженных повторно-переменным нагрузкам, а также являющихся потенциальными для применения упрочняющих технологий на сварные элементы таких конструкций, являются ГОСТ Р EN 13477–1 2021 «Контроль неразрушающий. Метод акустической эмиссии. Требования к аппаратуре. Часть 1. Параметры аппаратуры», ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» и др. Согласно нормативным документам основными регистрируемыми параметрами АЭ являются потоковые, частотные, амплитудные и временные характеристики.

Необходимо провести различие между первичными параметрами для дискретных акустических импульсов и характеристиками непрерывных акустических сигналов. Характеристики акустических импульсов определяются основными параметрами, такими как амплитуда, длительность, форма и момент возникновения. Кроме того, поток акустических сигналов можно охарактеризовать средней частотой событий, спектральной плотностью, амплитудными,

временными и амплитудно-временными распределениями, корреляционной функцией, средним значением и дисперсией. Каждый из указанных параметров связан с физическими процессами, которые инициируют акустические сигналы, и содержит информацию о характере этих процессов.

К первичным параметрам регистрации относятся следующие [72]: общее число импульсов, активность акустической эмиссии, суммарная акустическая эмиссия, скорость счета, плотность вероятности амплитуды импульсов, распределение временных интервалов, амплитудно-временное распределение импульсов акустической эмиссии, спектральная плотность дискретной акустической эмиссии, суммарный счет импульсов акустической эмиссии, скорость счета акустической эмиссии, огибающая электрического сигнала акустической эмиссии, амплитудное распределение, длительность электрического сигнала акустической эмиссии, время нарастания, энергия электрического сигнала акустической эмиссии и другие.

Однако, несмотря на значимость энергетических параметров в акустической эмиссии, их использование как первичных показателей связано с определенными ограничениями. Данное ограничение обусловлено наличием множества дестабилизирующих факторов, которые оказывают влияние на энергетические характеристики сигналов АЭ. Например, структурная неоднородность, дефекты и высокая скорость деформирования способны исказить энергетические параметры, что накладывает на них искажение, влияющие на их использование в качестве первичных показателей. Кроме того, в ряде исследований было показано [69, 101, 112], что низкоамплитудные сигналы, которые обычно фильтруются как шум, содержат в себе ценную информацию о зарождении повреждений. Такие сигналы могут быть информативными и содержать важные сведения о состоянии сварного соединения. Однако, эти сигналы не всегда получают должное внимание из-за их низкой амплитуды и принятия их за шумы. Так как акустическая эмиссия позволяет наблюдать за сварным соединением в процессе полного нагружения, то предпочтительными являются первичные параметры, которые связаны с развитием

повреждений в материале во времени, так как меньше подвержены влиянию дестабилизирующих факторов.

Более того, важно заметить, что сами по себе первичные параметры не всегда предоставляют достаточно информации для полного анализа влияния результатов упрочняющих обработок на сварное соединение. Основной проблемой акустической эмиссии является сложность связи первичных параметров с показателями воздействия упрочняющих процессов на сварное соединение. Для достижения этой связи необходимо глубокое понимание и описание физики процессов, влияющих на возникновение сигналов АЭ в результате воздействия упрочняющих обработок. Например, понимание механизмов разрушения материалов, деформаций и фазовых переходов, и влияния упрочняющих воздействий на эти механизмы, может помочь в интерпретации сигналов АЭ и их связи с упрочняющими обработками.

На сегодняшний день выделяют статистические, механические и кинетические модели для интерпретации результатов акустико-эмиссионного контроля сварных соединений. Статистический заключается на основе выявления статистических закономерностей при проведении большого количества экспериментов. Результаты исследований позволяют идентифицировать закономерности и паттерны в сигналах АЭ, а также устанавливать связи между параметрами сигналов и конкретными эффектами влияния упрочняющих обработок или наличия неоднородностей. Критериями являются статистические показатели, частотный анализ, анализ волновых форм, распределение энергетических и частотных вероятностей, фрактальный анализ и другие методы. Для достижения всесторонней оценки также используются дополнительные методы обработки сигналов и анализа данных, включая статистические метрики, множественную регрессию и машинное обучение. Данному методу посвящено много исследовательских работ.

В работах [34, 85, 90] осуществлялась разработка методики по отбраковке сварных соединений и оценка влияния карбидных и обезуглероженных прослоек на сварные соединения с помощью метода акустической эмиссии. Критерием для

отбраковки служило выявление искусственных несплошностей, таких как поры, непровары, а также наличие вольфрамовых и титановых вставок в стальных образцах. Для анализа использовалась статистическая обработка первичных параметров акустической эмиссии, включая энергетический параметр MARSE, среднее число осцилляций и двухинтервальный коэффициент. В работах [32, 63, 84, 89] показывается возможность идентификации деформационных процессов в алюминий-магниевых и стальных сплавах с помощью анализа волновых форм сигналов, кластеризации по энергетическим признакам и вейвлет-преобразования. Основными недостатками данных работ является уникальность конкретного исследования, влияние дестабилизирующих факторов на результаты контроля и сложность вычислений.

В основе механических моделей лежит связь параметров акустической эмиссии с различными теориями деформирования и разрушения твердого тела, линейным и нелинейным накоплением повреждений. Гулевский [31] связал число импульсов акустической эмиссии, а позже и Данеганом и соавторами [103] была предложена модель (2.1), которая связывала скорость счета акустической эмиссии N с параметрами роста трещины в металле, выраженной коэффициентом интенсивности напряжений K_I . При этом примерно в тоже время Палмер и соавторы [39] предложили выражение, описывающее связь параметров АЭ и напряжений σ . На основе полученных выражений была предложена зависимость, которая связывает длину трещины α и ее напряжений с параметрами АЭ:

$$N = A_D \sigma^4 \pi^2 \alpha^2, \quad (2.1)$$

где A_D – эмпирический коэффициент материала. Данная зависимость легла в основу локально-динамического критерия, являющимся рекомендованным к использованию при акустико-эмиссионной диагностике [80], в том числе и объектов, подверженных влиянию переменных нагрузок. Полученные выражения заложили основу связи акустической эмиссии с механическими представлениями о разрушении материала. Дальнейшие исследования породили появления новых моделей. Например, Грешниковым В.А. и соавторами [28] была предложена зависимость спектральной характеристики АЭ сигнала с длиной трещины, а

Карпенко Г.В. и др. [5] предложили выражение, связывающее параметры АЭ с ориентацией и длиной трещины.

Описанные выше модели представляют собой механический подход к анализу интерпретации результатов акустико-эмиссионных явлений и оценке состояния конструкций на стадии формирования зон разрушений, который может быть применен для оценки влияния упрочняющего воздействия на сварные соединения. Однако, зависимость между параметрами АЭ сигналов и показателями материала возможна при соблюдении уникальных условий эксперимента и зависит от конфигураций трещин, физико-механических и акустических характеристик материала. Поэтому применение данного подхода для оценки влияния упрочняющих воздействий на сварных соединениях не всегда представляется возможным, из-за уникальности сварного шва, структурной и напряженно-деформированной неоднородностей.

Микроструктурные исследования показали [87] что предвестником развития макротрещин является процесс зарождения и роста трещин микроскопических размеров, который описывается уравнением кинетики первого порядка [44]. Скачкообразное приложение напряжений на берегах трещины является одной из причин зарождения и распространения трещин. Исходя из этого в зависимости от связи конфигурации новых возникших трещин с параметрами АЭ определяется коэффициент интенсивности напряжений. При этом в месте возникновения максимальных напряжений или деформаций в вершине трещины происходит локальное разрушение, описываемое слиянием микроразрыва и исходной трещины. Скачок трещины провоцирует падение исходного уровня напряжений, при этом высвобождая упругие колебания. Исходя из этого авторы некоторых работ предполагают связь числа импульсов АЭ с коэффициентом интенсивности напряжений. На эту связь сильно влияние оказывает порог дискриминации, коэффициент усиления электрического сигнала, частотный диапазон преобразователей и др. Такие представления о природе явления АЭ и ее связи с кинетическим трактованием образования трещин позволяет предложить свою интерпретацию результатов регистрации АЭ [60, 61]. В данных работах источники

АЭ представляются точечными излучателями упругих колебаний, расположенных в окрестностях устья трещины.

Работа [15] положила начало описания результатов интерпретации регистрации сигналов АЭ с помощью кинетической концепции прочности (2.2). Образец представлял из себя совокупность ячеек, каждая из которых имела критическое значение напряжения разрыва. При этом активность АЭ характеризует число разрушившихся в единицу времени ячеек, а каждый отдельный разрыв ячейки сопровождается одним импульсом АЭ. Общий вид такой модели:

$$\dot{N}(t) = (A/t^2)[\exp(-B/t) + (B/t - 1) \cdot \exp(-C/t)], \quad (2.2)$$

где $\dot{N}(t)$ – активность АЭ, A , B , C – коэффициенты.

Такая зависимость активности АЭ была позднее использована в работах тех же авторов для определения момента разрушения металлических образцов, при этом константы выражения (2.2) определялись на начальном этапе нагружения с постоянным ростом напряжений. При этом, воспроизводимость такого подхода возможна была только на серии образцов из одной партии определенного металла.

В работе Донина А.Р. [33] определялась долговечность сварных соединений, результаты которой описывались концепцией прочности твердых тел. В данной работе введено предположение о том, что распределение структурного параметра γ неоднородно по объему, но в рамках эксперимента было принято усредненное значение.

Авторы [44] предложили свою модель интерпретации сигналов АЭ с позиции кинетической концепции прочности, что в дальнейшем привело к созданию отдельного направления [67]. Таким образом, вводится предположение, что для оценки результата влияния упрочняющих обработок, в качестве физической основы возможно использование кинетической концепции прочности твердых тел, так как данная концепция показала свою состоятельность в ряде работ по оценке состояния сварных соединений [14, 55].

2.2 Обоснование акустико-эмиссионного показателя в качестве критерия оценки влияния упрочняющих обработок

Оценка влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения, путем связи параметров акустической эмиссии с учетом влияния дестабилизирующих факторов, а также в условиях неопределенности результатов АЭ и структурной вариативности, представляется возможным на основе предложенной в работе методологии [66, 67]. Данная методика является предпочтительной основой для интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ, полученных от сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих воздействий, в условиях неоднородности. В ее основе лежит дедуктивный переход от объектов, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок к модели, содержащей универсальные физические константы и обоснованную физическую модель с разделением накопления повреждений в сварном соединении на этапы определяющий ресурс и нет.

Кинетическая концепция твердых тел является физической основой данной методологии и помогает объяснить процесс перестройки структуры сварного соединения с выделением упругих колебаний на основе атомно-молекулярных взаимодействий. Представления сварного соединения в виде структурных элементов его образующих и имеющих долговечность, определяющую долговечность всего сварного шва, помогают объяснить влияние упрочняющих воздействий. При этом долговечность $\theta(t)$ является временной функцией и описывается известным уравнением Журкова С.Н. (2.3) [38]:

$$\theta(t) = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma(t)}{KT}, \quad (2.3)$$

где τ_0 – время, в течение которого происходят колебания атомов,

U_0 – энергия, необходимая для отрыва атома при переходе вещества из твердого состояния в газообразное,

γ – параметр, зависящий от структуры и чувствительный к изменениям в ней,

$\sigma(t)$ – механические напряжения, действующие на структурный элемент,

K – константа Больцмана,

T – температура в абсолютных единицах.

Структурные элементы связаны между собой энергией U_0 и для разрыва этой связи необходимо приложить внешнюю нагрузку σ .

Уравнение кинетики первого порядка (2.4) [44] описывает концентрацию C накопления повреждений в материале во времени и представлено следующим выражением:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\theta_{cp}(t)}, \quad (2.4)$$

где C_0 – исходная концентрация структурных элементов в материале до возникновения разрушений. Решая уравнение (2.4), заменив экспоненту двухчленным разложением ($\exp x \approx 1+x$) в условиях нагружения с постоянной скоростью ($\sigma = \dot{\sigma}t$) получаем зависимость (2.5) концентрации накопления повреждений в однородном материале, где параметр γ является постоянным для каждого структурного элемента:

$$C(t) \approx \frac{C_0 KT \cdot \exp \frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT}}{\tau_0 \gamma \sigma} \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) отражает накопление концентрации в условиях структурной однородности ($\gamma = \text{const}$), однако в условиях реальной эксплуатации сварных соединений, из-за влияния структурной, напряженно-деформированной и температурной неоднородности появляется разброс средних значений долговечности $\theta(t)$, который необходимо учитывать при оценке качества сварных соединений. Влияние неоднородности приводит к разбросу значений механических свойств структурных элементов, что приводит к разбросу свойств самого сварного соединения. При этом сама неоднородность носит случайный характер и зависит от размеров сварного соединения. В первую очередь разрушаются элементы с наименьшими значениями долговечности, что приводит к повышению среднего значения $\theta(t)$ структурного элемента. Поэтому стоит учитывать влияние упрочняющих воздействий на сварное соединение в условиях неоднородности, и решение уравнения (2.4) сводится к следующей зависимости (2.6):

$$C(t) = C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{dt}{\theta_{cp}} (\omega(t)) \right] \right\} d\omega, \quad (2.6)$$

где $\omega = \gamma\sigma/KT$ – прочностной параметр структурного элемента,

$\Psi(\omega)$ – распределение плотности вероятности значений величины ω среди структурных элементов,

ω_0 – минимальное значение величины ω ,

$\Delta\omega$ – доверительный интервал для различных значений ω среди структурных элементов.

Форма функции $\Psi(\omega)$ определяется распределениями напряжений σ и коэффициента γ в материале, которые взаимосвязаны с распределением размеров концентраторов напряжений.

Распределение значений параметра γ ограничено физической природой накопления повреждений и отражает структурную неоднородность сварного соединения. Из [82] известно, что около 10% связей в сварном соединении являются перегруженными, а остальные 90% не испытывают высоких значений механических напряжений. Однако, при достижении критического момента $C^*(t^*)$ разрушение структурных элементов оказывает пагубное влияние на соседние связи из-за релаксации напряжений и приводит к объединению мелкодисперсного разрушения. Весь этот процесс может привести к образованию и развитию трещин до тех пор, пока не произойдет дефрагментация, при этом на вершинах трещин происходит накопление микроповреждений. Согласно [82], соотношение критической и начальной концентрации находится в пределах 0,1 - 0,01.

Таким образом процесс накопления повреждений в сварном соединении можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит мелкодисперсное накопление повреждений, которое заканчивается наступлением значений критической величины $C^*(t^*)$. Данный этап можно разделить на стадию однородного, описываемого уравнением (2.5), и неоднородного накопления повреждений, математически описанного формулой (2.6). На втором этапе происходит локализованная эволюция трещины, которая описывается уравнениями из теории механики разрушения [67].

Совершенствование методов оценки качества сварных соединений, подверженных воздействию упрочняющих обработок возможно с позиции многоуровневой модели временной зависимости сигналов АЭ. В общем виде связь числа импульсов акустической эмиссии $N_{\Sigma}(t)$ с параметрами повреждаемости материала на стадии мелкодисперсного разрушения в условиях влияния дестабилизирующих факторов описывается в виде (2.7):

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE}C(t), \quad (2.7)$$

где k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент.

Данный параметр отражает акустически активный объём материала, связанный с общим контролируемым объёмом V через вероятность регистрации сигналов АЭ, прошедших фильтрацию, попавших в частотный диапазон регистрации преобразователя, превысивших порог дискриминации. Коэффициент зависит от плотности контакта между преобразователем и сварным соединением, от скорости нагружения образца, от затухания и расстояния от источника до приемника, от размеров и числа излучателя упругих колебаний, от спектральных характеристик сигнала, от температуры и др. [67]. Математический вид данного коэффициента (2.8):

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t, \quad (2.8)$$

где V – объём сварного соединения, подверженный контролю,

$\Phi(\Delta t, f, u)$ – распределение вероятности сигналов акустической эмиссии по интервалам Δt (паузам) между ними, а также по амплитуде u и частоте f .

Так как упругое излучение подвержено случайному характеру, то выражение (2.8) отражает акустически активный объём материала, связанный с общим контролируемым объёмом V через вероятность регистрации сигналов АЭ. Для стабилизации коэффициента и дальнейшего математического приведения при проведении экспериментов по оценке влияния упрочняющих воздействий необходимо воспользоваться следующими рекомендациями [67]:

- Обеспечить стабильность объема сварного соединения;

- Гарантировать постоянство коэффициента усиления и порогов дискриминации АЭ оборудования;
- Сохранить постоянство характеристик энергетического или амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии;
- Обеспечить подобие между экспериментальной и реальной нагрузкой, на которую подвергается сварное соединение;
- Поддерживать постоянную скорость экспериментальной нагрузки.

Потенциальная энергия, освобождаемая в виде упругих колебаний при разрыве межатомных связей, зависит от размера структурного элемента D , действующих на него напряжений σ^* , и модуля упругости E_y . Она пропорциональна квадрату амплитуды акустической эмиссии и описывается следующим уравнением (2.9) [40]:

$$E_{И} = \frac{\sigma^{*2} D^3}{2E_y} \sim u^2 \quad (2.9)$$

Энергия упругой волны, исходящей из общей энергии $E_{И}$, постепенно уменьшается по мере приближения к поверхности сварного соединения. Этот процесс затухания зависит от частоты волны f , коэффициента ее затухания и расстояния, пройденного до места регистрации сигнала преобразователем. Из общей массы излучаемых сварным соединением упругих волн регистрации АЭ подвергается лишь часть, которая попадает в амплитудный диапазон дискриминации аппаратуры. Неоднородность сварного соединения приводит к разбросу амплитуд сигналов АЭ, что в сочетании с хаотическими процессами накопления повреждений снижает вероятность попадания сигналов в диапазон регистрации аппаратуры. Таким образом, использование уравнения (2.6) не предоставляется возможным в условиях неоднородности, так как невозможно определить его параметры.

Решение сводится к разделению стадии накопления повреждений в сварном соединении на этапы с выделением сигналов только от тех элементов, которые отвечают за состояние сварного соединения и могут оценить влияния упрочняющих воздействий. Таким критерием является кинетически однородный

этап, с постоянными значениями показателя γ , что соответствует определяемым состоянию сварных соединений структурным элементам.

Важно отметить, что согласно [67] параметры модели процесса разрушения, определенные на данном этапе, демонстрируют корреляцию с параметрами кривых усталости. Эта корреляция подтверждает предположение о суммировании повреждений, а также служит основой для связи кривых усталости с повреждаемостью сварного соединения. Это важное соотношение является основой для интеграции результатов измерений с показателями надежности.

В условиях пропорциональности параметров АЭ и накопления концентрации повреждений в сварном соединении на этапе однородного разрушения в условиях постоянной скорости роста напряжений уравнение (2.5) приобретает следующий вид (2.10):

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \cdot \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{K T} \right] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}) \quad (2.10)$$

Логарифм (2.10) равен (2.11):

$$\ln(N_{\Sigma}(t)) = \ln(k_{AE} C_0) + \frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{K T} - \ln(\tau_0 \gamma \dot{\sigma} / K T) \quad (2.11)$$

В условиях постоянства коэффициентов правой части уравнения, находящихся под логарифмом, кривые, представляющие зависимость логарифма числа импульсов акустической эмиссии от времени в полулогарифмических координатах, будут иметь линейную форму на этапе кинетически однородного накопления повреждений.

Связывая параметры акустической эмиссии с параметрами микроскопического накопления повреждений при корректном нагружении ($k_{AE} = \text{const}$, нагружение происходит с постоянной скоростью роста напряжений $\dot{\sigma} \neq 0$, наблюдается стабильность амплитудного распределения сигналов АЭ), путем дифференцирования выражения (2.11) по напряжениям σ , скорость накопления повреждений в сварных соединениях описывается уравнением (2.12):

$$d \ln(N(t)) / d \sigma = \gamma / K T \quad (2.12)$$

Тогда упрочнение определяется соотношением скоростей (2.12) накопления повреждений до и после воздействия упрочняющей обработки (2.13):

$$G_{AE} = \frac{d \ln(N(t))_1 \cdot d\sigma_2}{d \ln(N(t))_2 \cdot d\sigma_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad (2.13)$$

Предложенный показатель является акустико-эмиссионным показателем G_{AE} , выраженный отношением угловых коэффициентов зависимости логарифма числа импульсов акустической эмиссии от напряжений и является частным случаем кинетической концепции прочности твердых тел. Данный показатель связан с сопротивлением разрушению и определяется на прямолинейном участке зависимости числа импульсов акустической эмиссии от напряжений. Следовательно, с учетом выражения (2.13) критерием упрочнения является следующее неравенство (2.14):

$$G_{AE} > 1 \quad (2.14)$$

Таким образом, выдвигаются теоретические предпосылки [70, 116], что данная методология, лежащая в основе предложенного метода, позволяет оценить качество сварных соединений, подвергнутых влиянию упрочняющих обработок путем отслеживания изменений в акустических свойствах структурных элементов.

2.3 Выводы по Главе 2

1. Установлено, что акустическая эмиссия является предпочтительным методом для обеспечения контроля за влиянием упрочняющих воздействий на сварное соединение, так как она содержит в себе информацию о перестройке структуры сварного соединения и позволяет определить изменения, вызванные влиянием упрочняющих воздействий.

2. Выявлено, что основной проблемой применения метода АЭ для оценки влияния упрочняющих обработок на свойства сварных соединений является интерпретация результатов регистрации в условиях нестабильности связи параметров АЭ и состоянию сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих воздействий.

3. Дан анализ подходов к решению данной проблемы, которое основано на обосновании моделей, связывающих параметры АЭ со степенью упрочнения. Рассмотрены статистические, механические и кинетические модели параметров АЭ.

4. Предложена методологическая база решения поставленных задач, в основе которой лежат физические закономерности процесса накопления повреждений в материале, а также учет влияния метрологической и прочностной неоднородности в условиях влияния дестабилизирующих факторов.

5. Предложен критерий оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения, основанный на акустико-эмиссионном показателе G_{AE} . Рассмотрен вариант по определению данного показателя. Предложено его определять как угловой коэффициент в графиках зависимости числа импульсов акустической эмиссии от напряжений в полулогарифмических координатах на этапе однородного кинетического разрушения.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК НА СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

3.1 Подготовка к проведению экспериментальных исследований по оценке влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

Для проверки работоспособности предложенного акустико-эмиссионного показателя (контролепригодности и информативности) в качестве критерия оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения, анализа его чувствительности к технологическим воздействиям на сварное соединение был подготовлен и проведен комплексный эксперимент. В рамках исследования производилась обработка изготовленных стандартных по ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» образцов сварных соединений различными упрочняющими воздействиями, с последующим их визуальным обследованием, регистрированием и контролем сигналов АЭ в процессе равномерного деформирования на нагружающем устройстве. После этого проводилась последующая их обработка с использованием предложенной методики и определением предложенного показателя оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения.

Основной целью эксперимента было выяснить, насколько чувствителен предложенный угловой коэффициент к упрочняющему воздействию. Полученные данные позволили определить, какие технологические параметры оказывают наибольшее воздействие на сварные соединения и как их можно оптимизировать для повышения механических характеристик сварных соединений.

Выбор материала обуславливался предоставленными возможностями, а также исходил из условий эксплуатации, поэтому был ограничен металлическим материалом вследствие его широкого применения. На сегодняшний день доля задействования различных металлов в промышленности составляет порядка 70% от мирового объема продукции. Кроме того, для конструкций и сооружений,

которые подвергаются свариванию, применяют полуспокойную или спокойную сталь [58]. В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 3.

Сталь 3 — это универсальный конструкционный материал. Из нее изготавливают как детали, которые работают при положительных температурах, так и различные несущие и ненесущие конструкции. Сталь получила широкое применение для изготовления неразъемных соединений. Из нее изготавливают как кованные изделия, так и прокатные. Данный материал востребован в нефтехимической отрасли, где используется в качестве листового материала для трубопроводов и сосудов давления. Основным преимуществом стали является не склонность к отпускной хрупкости, а также отличная свариваемость [57].

Для изготовления образцов использовалась горячекатаная лента, полученная на Новолипецком металлургическом комбинате (НЛМК). Изданной ленты были изготовлены металлические пластины из конструкционной полуспокойной углеродистой стали обыкновенного качества Ст3пс. Согласно паспорту качества, на данную сталь, содержание в ней углерода составляет 0.16%. Доля вредных примесей типа серы и фосфора составляет не более .007% и .008% соответственно. Образцы были изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» для исследований на статическое растяжение с фиксацией акустических сигналов в процессе проведения испытаний. Габаритные размеры образца составляли 150 мм в длину, 25 мм в ширину при толщине 4 мм. Типовой образец представлен на рисунке 3.1. Такой подход позволяет убедиться в высокой точности результатов и обеспечить соответствие образцов установленным стандартам и требованиям качества.



Рисунок 3.1 – Типовой образец, изготовленный из Ст3пс для проведения исследований

Для создания неразъемного соединения использовался метод полуавтоматической ручной сварки в аргоновой среде проволокой с расположением стыкового сварного шва в середине образца. После изготовления образцов они были подвержены визуально-измерительному контролю на предмет наличия в них типовых наружных дефектов сварных соединений невооруженным глазом. Проведенный контроль подтвердил отсутствие поверхностных трещин видимого размера, подрезов и наплывов. Это обеспечивает качество сварного соединения и пригодность образцов для проведения испытаний АЭ при статическом растяжении.

Выбор статического нагружения на растяжение для сварных соединений обоснован использованием этого метода для создания напряженно-деформированного состояния в сварном шве. Данный вид нагружения способствует появлению сигналов АЭ и позволяет выявить наиболее активные участки сварного соединения, совпадение которых с определяющими усталостную прочность участками усталостного разрушения подтверждает достоверность получаемой на основе регистрации АЭ информации. Статическое растяжение является простым и не трудоемким видом исследования. Увеличение нагрузки происходит плавно и равномерно, что позволяет минимизировать влияние помех, создаваемых разрывной машиной. Для создания в образцах напряженно-деформированного состояния использовалась универсальная испытательная машина Zwick/Roell Z100, показанная на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Универсальная разрывная машина Zwick/Roell Z100, использовавшаяся для нагружения образцов

Регистрация упругих колебаний осуществлялась с помощью акустико-эмиссионной системы СДАЭ-16(2), состоящей из двух каналов, внешний вид которой показан на рисунке 3.3. Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) типа П113с, блок управления и регулирования усиления, блоки предварительных усилителей и обработки сигналов, а также персональный компьютер составляли систему СДАЭ-16(2). Рабочий диапазон частот преобразователя составлял от 20 до 500 кГц. В результате внешнего воздействия в виде приложения нагрузки разрушающей машины на образец происходит внутренняя перестройка структуры сварного соединения с высвобождением упругих колебаний. Упругая волна, прошедшая от источника сигнала до поверхности, регистрируется и преобразуется ПАЭ в электрический импульс посредством пьезоэффекта. Полученный сигнал усиливается и обрабатывается с дальнейшим выводом информации на дисплей компьютера и записью. Корпус ПАЭ состоял из латуни, в которую была помещена пьезокерамическая таблетка, которая состояла из цирконата-титоната свинца ЦТС-

19. В процессе лабораторного эксперимента регистрировались время прихода сигнала, число и длительность импульса, амплитуда, энергия и время нарастания сигнала, а также число выбросов и суммарный счет АЭ. Данная аппаратура состоит в государственном реестре средств измерений и имеет действующий сертификат о поверке.

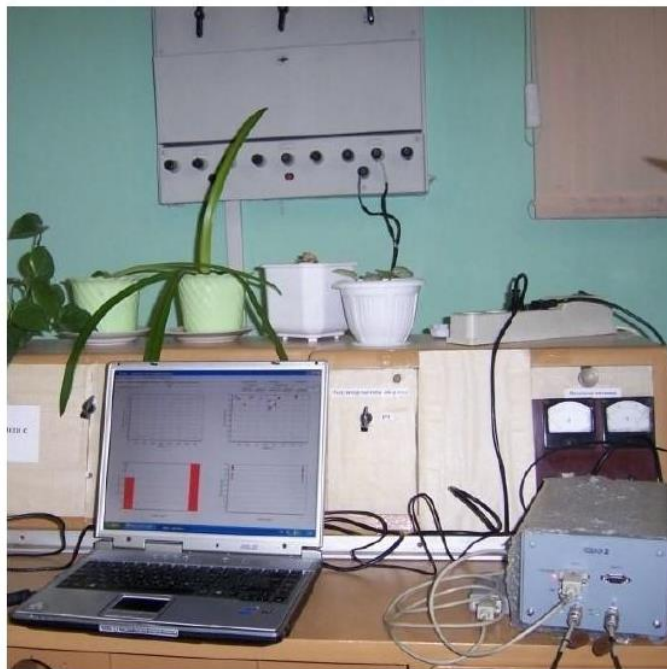


Рисунок 3.3 – Акустико-эмиссионная система СДАЭ-16(2)

Для проверки предложенных критериев по оценке влияния упрочняющих обработок на сварные соединения были проделаны следующие итерации. Стальные образцы, полученные из листового проката, искусственным образом были подвержены влиянию упрочняющих воздействий, направленных на повышение числа циклов до разрушения. Было выбрано по одной обработке из каждой группы в соответствии с предложенной классификацией в главе 1. В их число вошли обработки, влияющие на структуру, напряженно-деформированное состояние и конструкционные виды упрочняющих обработок. Из всего многообразия имеющихся на текущий момент видов упрочнений, выбор осуществлялся из имеющихся возможностей, доступности и трудоемкости упрочняющей обработки.

3.1.1 Термообработка сварных соединений

Группа стальных образцов со сварными соединениями в количестве 4 штук была обработана объемной упрочняющей обработкой в виде термообработки, как показано на рисунке 3.4. Данная технология осуществлялась в муфельной печи SNOL 7,2/1100. В процессе нагрева достигалось значение температуры равное 600°C с шагом $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в течение первого часа. Выдержка при данной температуре осуществлялась в течении пяти часов. Для максимального снятия остаточных напряжений был подобран медленный режим охлаждения, который заключался во взаимодействии металла с воздушной средой и последующим остыванием вместе с печью. В результате воздействия произошло выравнивание и уменьшение твердости, было достигнуто повышение пластичности и ударной вязкости. Значения остаточных напряжений не измерялись.



Рисунок 3.4 – Процесс термообработки сварных соединений для проведения экспериментальных исследований

3.1.2 Ультразвуковая ударная обработка и конструкционное упрочнение сварных соединений

Группа образцов в количестве восьми штук была разделена на равные части для применения ультразвуковой ударной обработки, которая позволяет снизить

остаточные напряжения в сварном соединении. Одна часть образцов была подвергнута ультразвуковому воздействию на сварной шов, в то время как другая часть на околошовную зону. Ультразвуковая обработка происходила при частоте 20,1 кГц и мощности 0,2 кВт. Схема воздействия показана на рисунке 3.5.

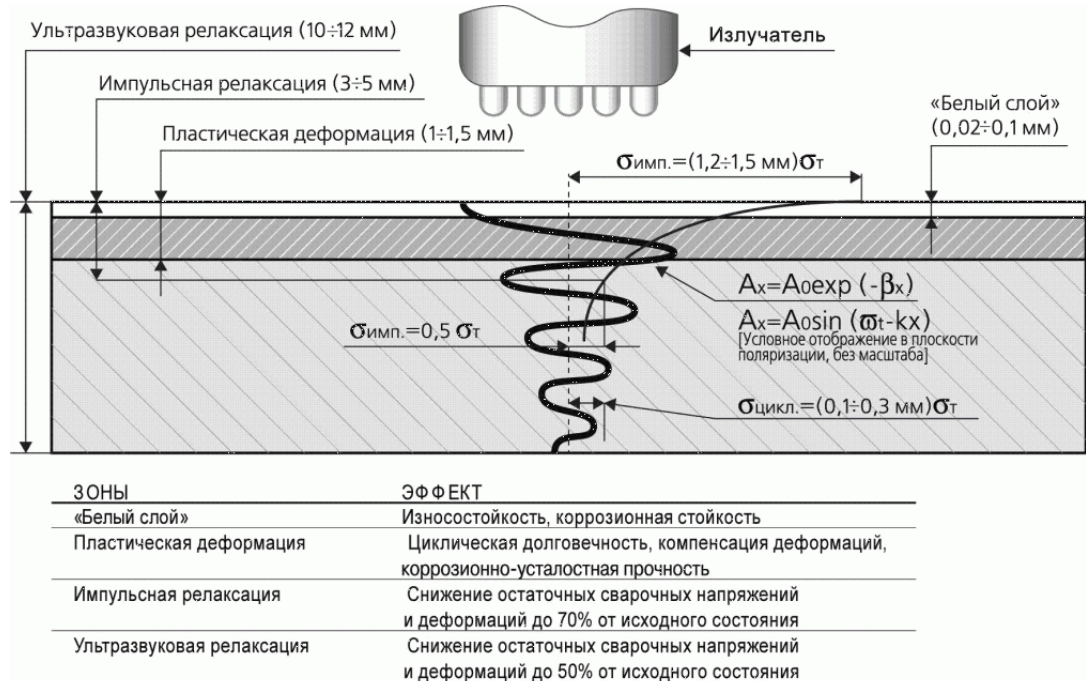


Рисунок 3.5 – схема ультразвуковой импульсной обработки [79]

К последней группе образцов, также в количестве четырех штук, было применено конструкционное упрочнение, связанное с технологией сварки, а именно наличие фаски с двух сторон металла (двойная X-образная фаска). Технологическая особенность такого вида сварного соединения показана на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Способ разделки кромок, используемых при изготовлении сварных швов [64]

Для сварки листов и труб применяют обязательный технологический этап, который заключается в разделке кромок. Данная технология повышает конечное качество получаемых сварных соединений, если соблюдается качественное исполнение этой части производственной цепочки. При сварке листов и труб обязательным является подготовка к сварочным работам. Существует различные типы кромок, выбор которой зависит от различных факторов, в том числе и от толщины изделия. При небольших толщинах от 3 мм до 20 мм обычно используется V-образная фаска. Но независимо от формы скосов кромок, V-, X-, U-образной, необходима полная зачистка основного металла перед сваркой, для устранения факторов, влияющих на прочность конечного сварного шва. Основным документом для подготовки и создания кромок является ГОСТ 16037–80 «Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры», по которому определяется алгоритм разделки металла. Еще одним преимуществом является то, что фаска выполняется для хорошего провара и прочного соединения сварочных швов, а также сокращения времени выполнения сварочных работ [22].

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния упрочняющих обработок на акустические сигналы от сварных соединений

После подготовки образцов и оборудования начался процесс проведения испытаний. Для этого образцы помещались в разрывную машину для создания статического растяжения сварного соединения. Концы образца зажимались в испытательной установке, где нижний захват оставался неподвижным, в то время как верхний захват перемещался в вертикально вверх с постоянной скоростью. В процессе приложения нагрузки скорость деформирования была постоянной для всех образцов. В качестве контактной жидкости использовался литол. Для улучшения акустического контакта ПАЭ прижимались к образцам с помощью резинок. Крепление датчиков происходило с двух сторон по одному сверху сварного соединения и снизу, по схеме «крест на крест». В процессе нагружения

происходила постоянная регистрация значений усилия в МПа, приложенного к образцу, а также параметров акустической эмиссии. Процесс проведения статического растяжения показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Вид образца сварного соединения с установленными предусилителями и ПАЭ

Для обоснования контроля сварного шва были проведены диагностические нагружения на образцах из того же материала, но без сварного соединения для определения координат источников. Кроме того, часть образцов, результаты которых не вошли в последующую обработку, были подвержены растяжению для определения оптимальной скорости нагружения, а также для выставления порога дискриминации аппаратуры. Для устранения влияния аддитивных помех на результаты регистрации устанавливался нижний уровень порога дискриминации равный 45,8 дБ на каждом канале.

После настройки оборудования начиналась основная часть экспериментальных исследований. Каждый образец из пяти групп подвергся статическому растяжению с параллельной фиксацией акустических сигналов в процессе нагружения. Следует отметить, что применяемый в испытаниях вид нагружения рассматривался, как подобный циклическому первый его полцикл, что обосновывало его кратковременное подобие рабочему нагружению. После установки образца в испытательную машину и установки преобразователей АЭ

производилась калибровка каждого канала (преобразователя). Важным элементом настройки АЭ системы перед проведением контроля является калибровка АЭ преобразователей. Калибровка выполняется посредством создания в диагностируемой конструкции сигнала, имитирующего АЭ-импульс, по каждому рабочему каналу. В качестве имитатора может быть использован АЭ-датчик с подачей на него синусоидального сигнала либо импульсного сигнала, создаваемого аппаратурой, сигнала от источника Су-Нильсена, либо легким постукиванием металлическим предметом. В данном эксперименте был использован источник Су-Нильсена перед каждым отдельным испытанием образцов для калибровки чувствительности каждого из каналов. Общая схема проведения эксперимента показана на рисунке 3.8.

Образцы сварных соединений подвергались растяжению до разрушения на испытательной машине с постоянной скоростью увеличения деформации. В процессе этого напряженного испытания регистрировалась акустическая эмиссия, что позволило отслеживать и анализировать изменения, происходящие в структуре материала. Для поддержания стабильности и точности измерений было обеспечено корректное нагружение, способствующее стабилизации акустико-эмиссионного коэффициента k_{AE} . Результаты проведенных исследований привели к формированию обширного массива данных акустической эмиссии, охватывающего весь процесс нагружения от начала и до момента разрушения образцов. Помимо этого, были получены диаграммы растяжения, снятые с компьютера разрывной машины, а также первичные параметры акустической эмиссии и их производные, представленные в табличном и графическом виде. Эти данные включают в себя ключевые характеристики, такие как суммарное число импульсов АЭ, амплитуда, длительность сигналов, число выбросов и показатель MARSE, что позволяет детально анализировать поведение материала под нагрузкой. Пример результатов регистрации для одного из образцов можно увидеть на рисунках 3.9 и 3.10.

Стоит отметить, что полученные числовые значения стандартных характеристик при механических испытаниях соответствовали ожидаемым значениям для данной марки стали, как указано в марочнике [57]. Однако, среди

всех исследованных образцов, наименьшие значения прочности были зафиксированы у тех, которые подвергались термообработке. В то же время, именно эта группа образцов продемонстрировала наибольшее увеличение пластичности, выраженное в относительном удлинении, по сравнению с остальными. Это наблюдение является важным, так как указывает на значительное влияние термообработки на механические свойства стали, особенно на её способность к деформации перед разрушением.

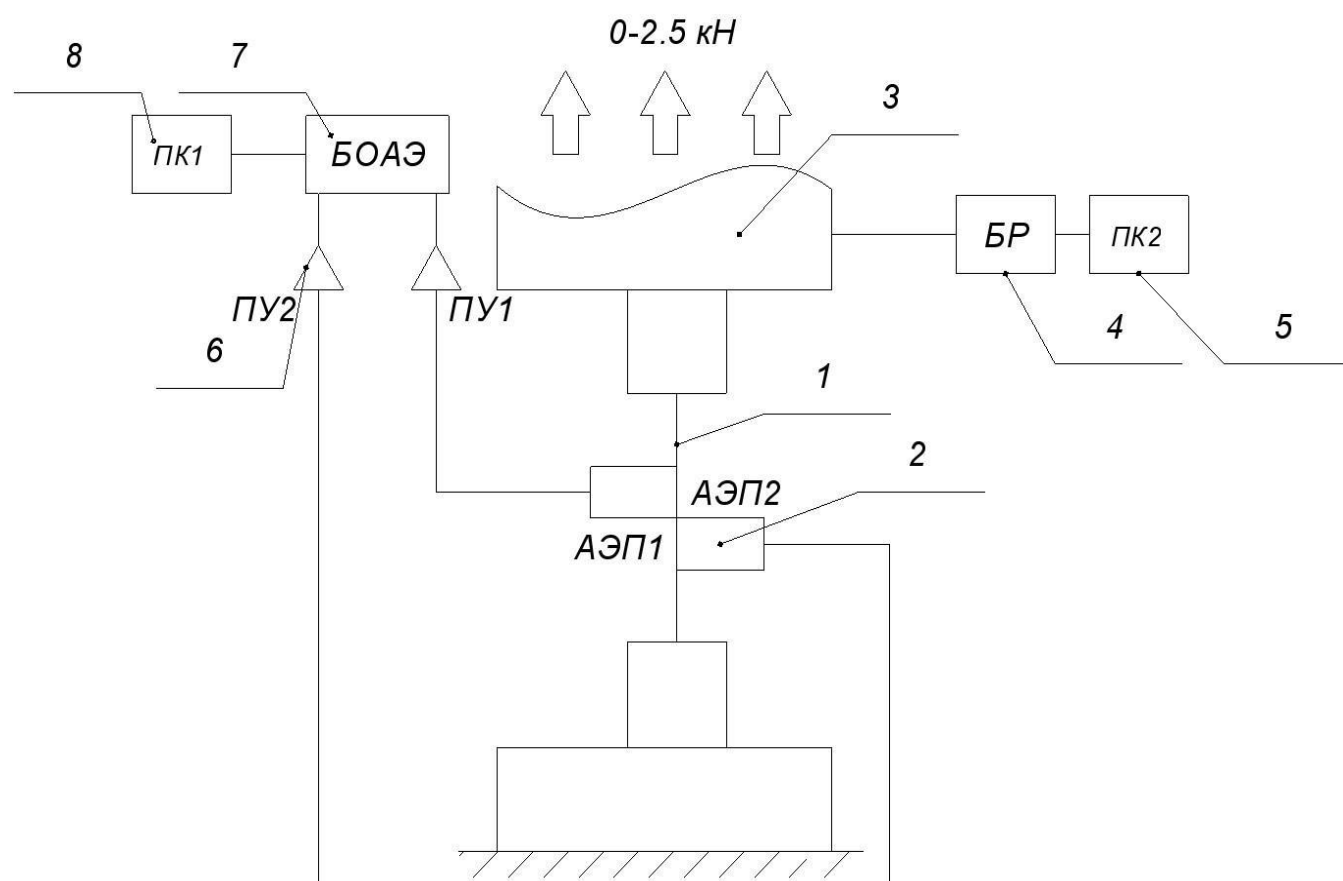


Рисунок 3.8 – Схема проведения нагружения и регистрации первичных параметров АЭ

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

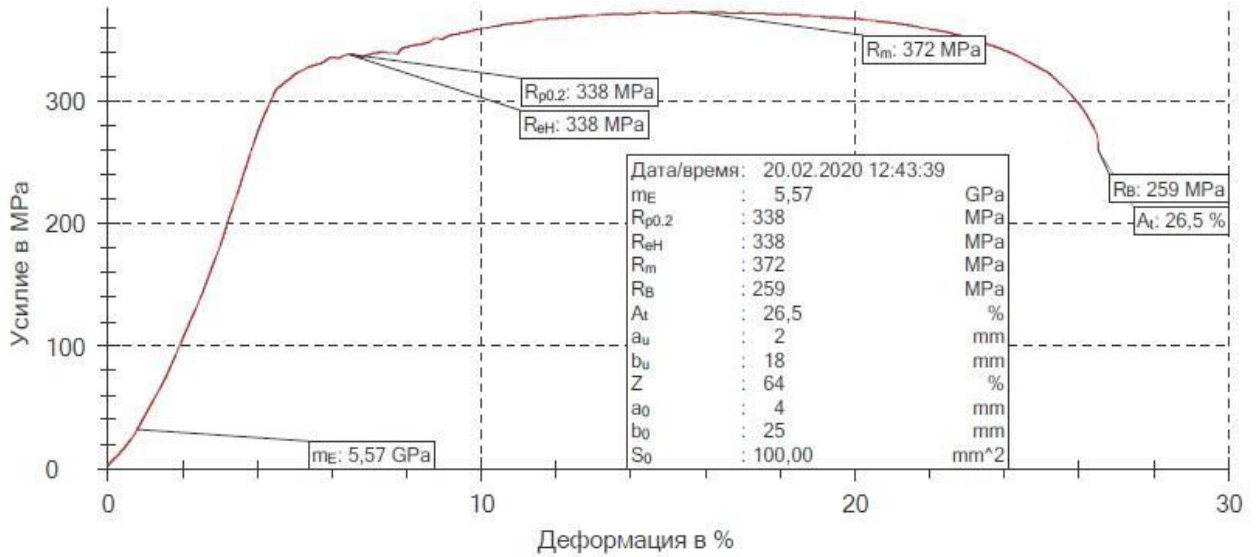


Рисунок 3.9 – Графия зависимости усилия от деформации одного из образцов, доведенного до разрушения

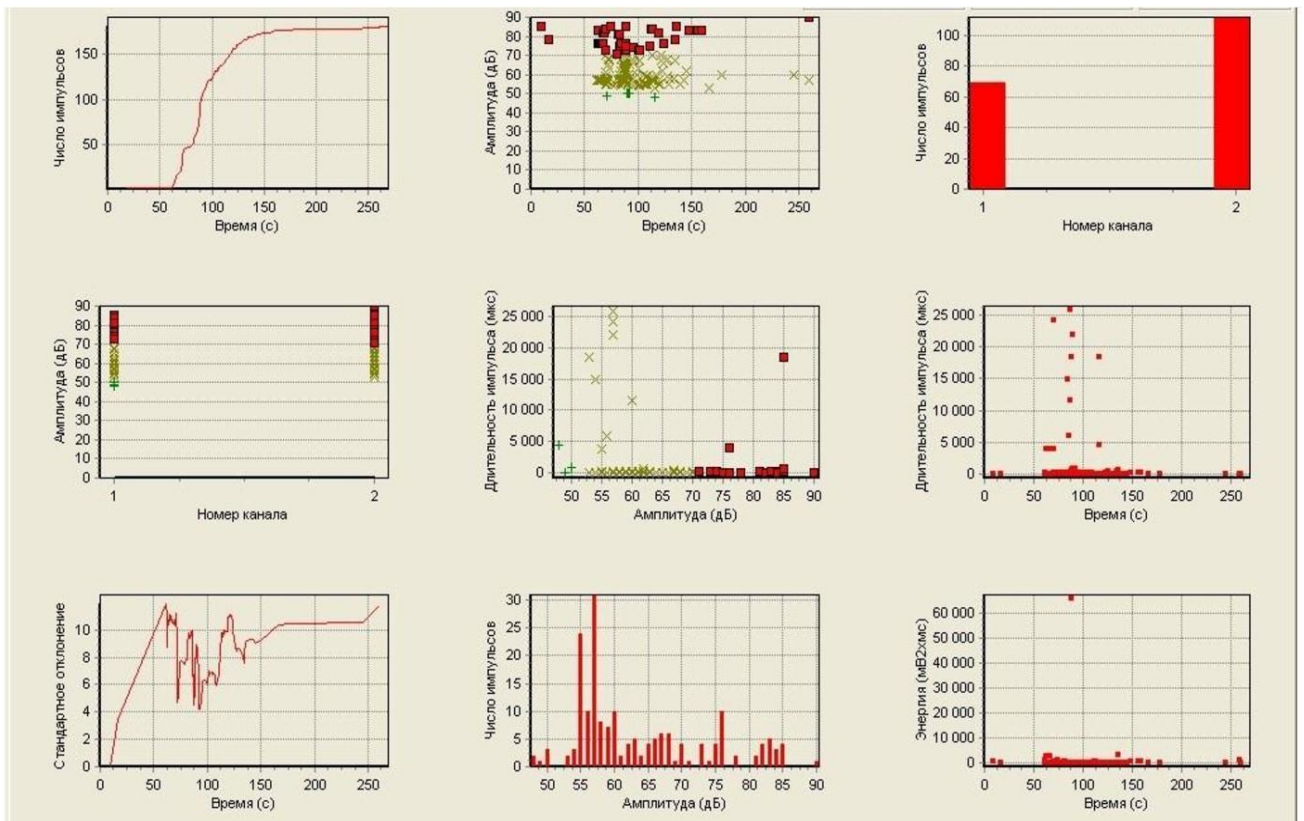


Рисунок 3.10 – Результаты регистрации первичных параметров АЭ для одного из образцов

3.3 Обработка полученных результатов по оценке влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения и их анализ

В результате проведенных исследований были получены первичные данные, которые подверглись дальнейшей обработке. Этот этап включал тщательный анализ и вычисление средних значений стандартных акустико-эмиссионных показателей для каждого из исследуемых образцов. Для обеспечения точности и достоверности результатов также были рассчитаны значения среднеквадратичного отклонения для каждой группы данных. Это позволило определить величину рассеяния значений и выявить возможные аномалии или отклонения в процессе эксперимента. Процедура расчета данных охватывала весь этап нагружения, начиная с момента появления первых сигналов после приложения нагрузки и вплоть до завершения испытаний. Такой подход обеспечил всесторонний анализ поведения материалов под нагрузкой и позволил собрать максимальное количество информации об изменениях характеристик акустической эмиссии. Все полученные значения были систематизированы и сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Средние значения первичных АЭ параметров, зарегистрированных на полном этапе нагружения

	Исходный	ТО	Фаска	УЗО шва	УЗО ОШЗ
Активность	4,87 ± 0,13	8,75 ± 0,08	5,70 ± 0,82	4,75 ± 0,97	3,88 ± 0,07
Амплитуда, дБ	60,4 ± 0,11	59,0 ± 0,62	59,8 ± 0,85	62,3 ± 1,39	63,0 ± 0,53
Число выбросов	107,7 ± 7,9	82,3 ± 8,7	102,8 ± 13,3	122,8 ± 2,21	106,3 ± 25,2
Число импульсов	449 ± 72,1	1422 ± 198,4	633 ± 111,8	398 ± 75,4	341 ± 26,1
Длительность, мс	2807 ± 641	4111 ± 496	2844 ± 675	2623 ± 613	2368 ± 419
MARSE, (мВ ² ·мс)	82662 ± 18524	112618 ± 13458	75059 ± 15791	67152 ± 18941	71591 ± 8279

Исходя из полученных результатов видно, что стандартные акустико-эмиссионные показатели отражают влияние упрочняющих воздействий только для термообработанных образцов. Влияние упрочняющих воздействий на суммарное число импульсов показало, что воздействие термической обработки сварных соединений привело к увеличению числа сигналов АЭ и уменьшению их амплитуды в связи с увеличением длительности сигналов. Обычно, для уменьшения шумоподобных сигналов АЭ после термообработки в условиях промышленных испытаний проводят предварительное нагружение, однако в условиях лабораторных исследований данной итерации не проводилось. В этой связи можно предположить, что если бы проводилось предварительное нагружение после термообработки с последующей нагрузкой образцов, то влияние упрочняющих воздействий на сварные соединения оценить стандартными АЭ показателями не представлялось бы возможным. Для каждой из групп был посчитан коэффициент вариации, показывающий относительное отклонение от среднего. Для исходных образцов средний коэффициент вариативности всех шести стандартных акустико-эмиссионных показателей равен 11,8 %, для образцов с фаской - 15%, для образцов, подвергнутых ультразвуковому упрочнению сварного шва и околошовной зоны, составляет 15,8% и 10,5% соответственно. Полученные значения соответствует средней степени рассеивания значений. Для термообработанных образцов среднее значение равно 8,5%, что свидетельствует о низкой степени рассеивания значений. Зависимости числа импульсов АЭ для каждой из групп упрочняющих воздействий от времени и нагрузки представлены на рисунке 3.11.

Амплитудный критерий также показал неоднозначные результаты. Наличие конструктивного упрочнения в виде фаски и термообработка показали уменьшение среднего значения амплитуды относительно исходных образцов, в то время как ультразвуковая обработка шва и околошовной зоны продемонстрировала увеличение. Энергетический критерий показал, что больше всего энергии было выделено при исследовании термообработанных образцов, подтверждается количественным увеличением показателя MARSE. Для остальных типов обработок

полученные значения были в пределах разброса. Наибольшая длительность сигналов, как видно из таблицы, говорит о влиянии пластических деформаций на акустические сигналы, что подтверждает последствия термообработки, выраженной в увеличении пластичности основного металла. Пластичность также подтверждается результатами механических испытаний, так как образцы, подвергнутые термическому воздействию, имели наибольшее удлинение. Исходя из этого, можно сделать вывод о корректности проведенной термообработки.

Зависимость числа импульсов АЭ от нагрузки

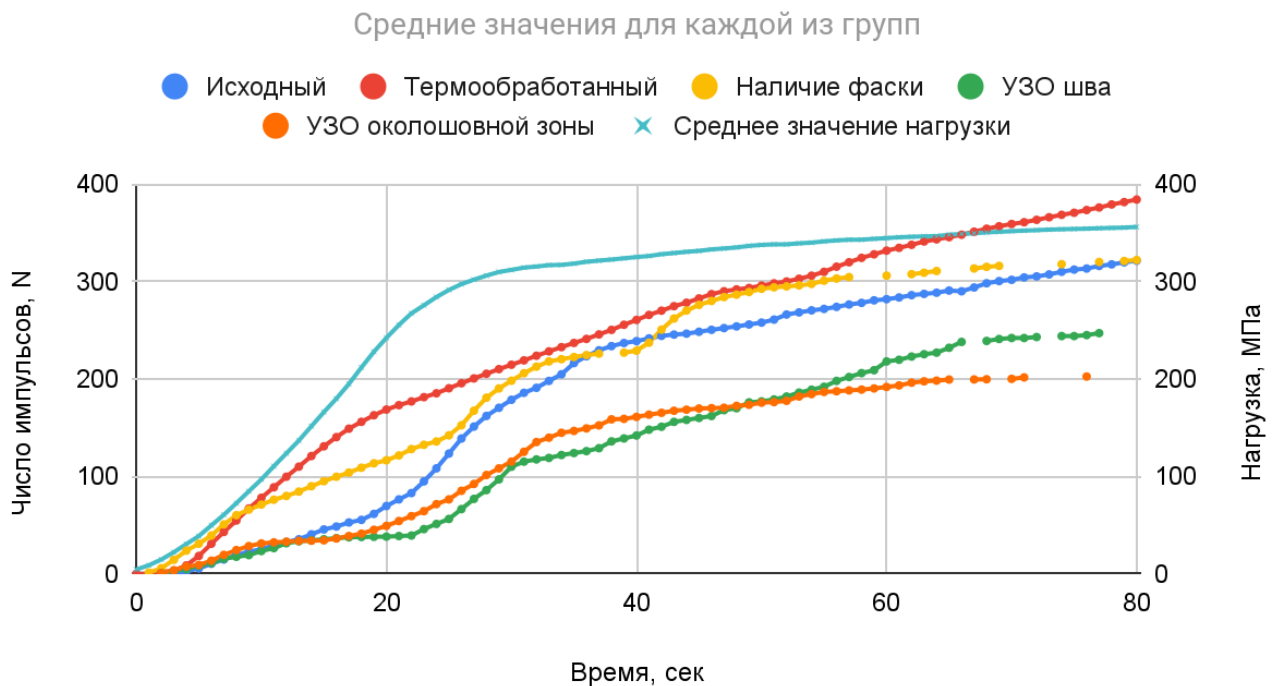


Рисунок 3.11 – Зависимость числа импульсов акустической эмиссии от времени и нагрузки для пяти групп образцов

Из-за высокого разброса значений стандартных акустико-эмиссионных показателей и их недостаточной информативности для оценки влияния упрочняющих обработок, воздействующих на сварные соединения, в данной работе предлагается использование ранее предложенного показателя. Этот показатель, благодаря своей чувствительности к изменениям микроструктуры материала, позволяет более точно оценить влияние упрочняющих воздействий. Акустико-эмиссионный показатель G_{AE} тесно связан со структурой и внутренними напряжениями сварных соединений, которые изменяются под воздействием

упрочняющих обработок [71, 120]. Для его определения строились зависимости числа импульсов АЭ от механических напряжений, полученных в результате нагружения. Такой подход позволяет выявить изменения в микроструктуре, вызванные упрочняющими обработками, и оценить их влияние на сварные соединения.

Процесс определения предложенного показателя проводился на кинетически однородном участке, который начинается с момента приложения нагрузки и продолжается до предела текучести. Этот участок соответствует рабочим напряжениям, испытываемым промышленными объектами в условиях эксплуатации. Важно отметить, что значения напряжений в конце этапа нагружения для определения предложенного показателя не превышали 300-320 МПа.

Сигналы, зарегистрированные в процессе нагружения, исходили из зоны сварного соединения, что подтверждается отсутствием сигналов на образце, выполненном без сварного соединения. Кроме того, результат регистрации согласуется с разрушающими испытаниями, полученными другим исследователем [1], где определялись координаты источников АЭ сигналов, подтверждающие факт излучения упругих колебаний из сварных соединений. Таким образом подтверждается объективность применения предложенного критерия для оценки влияния упрочняющих воздействий.

На данном этапе нагружения выделялся участок кинетически однородного разрушения. Данный этап является результатом временной фильтрации сигналов акустической эмиссии, благодаря которому появляется возможность выйти на регистрацию сигналов, связанных с теми структурными элементами, которые отвечают за ресурс объекта контроля. На данном этапе определяются те же параметры, что и по кривой усталости, что является результатом увязывания результатов измерения с параметрами надежности. Для определения данного этапа строились зависимости логарифма числа импульсов акустической эмиссии от напряжений в полулогарифмических координатах, где этап кинетически однородного разрушения характеризуется прямой линией согласно выражению

2.11. Начало однородного этапа определялось стабильностью коэффициента вариации амплитуды и заканчивалось резким ростом коэффициента перекрытия сигналов, что свидетельствует о начале роста пластических деформаций. Для более точного определения границ использовалась специализированная программа, которая путем графического сопоставления результатов имитационного моделирования разрушения (2.6) с постоянно-возрастающей нагрузкой и экспериментально полученных результатов регистрации АЭ в условиях пропорциональности ξ и $C(t)$ ($k_{AE} = \text{const}$) позволяет идентифицировать этап однородного разрушения. На рисунке 3.12 показан пример определения границ этапа однородного разрушения для одного из образцов.

После определения этапа однородного разрушения определялось значение предложенного показателя для каждого из образцов. Также находились значения площади под огибающей сигнала (параметра MARSE), представляющей собой аналог энергии (параметр энерго-статистического подхода к АЭ диагностированию) [122], усредненной амплитуды, числа импульсов и активности АЭ. Для всех значений было подсчитано среднеквадратическое отклонение. Полученные результаты представлены в таблице 3.2.

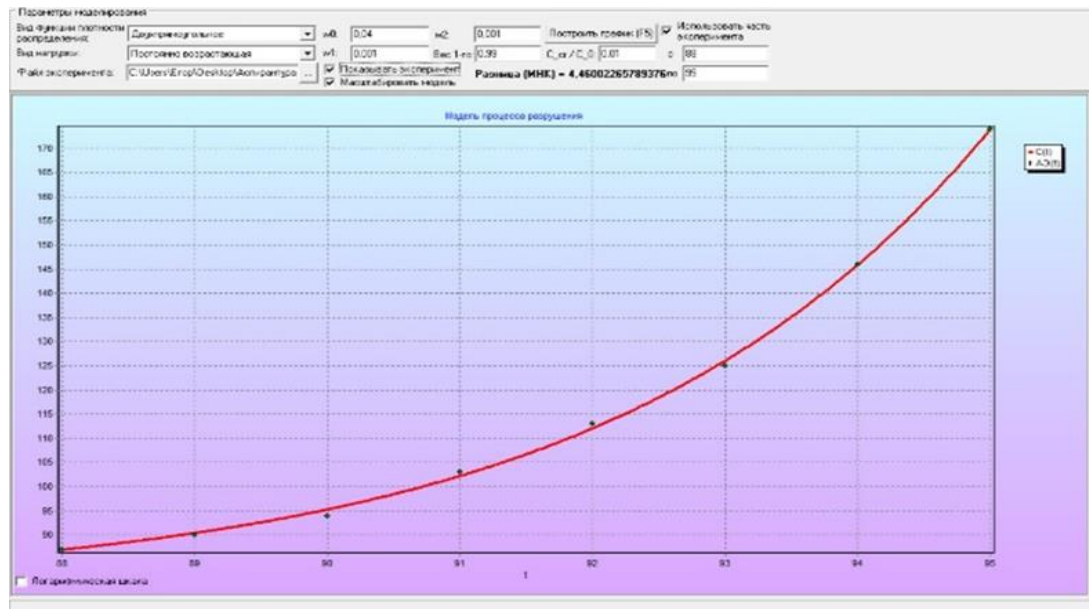


Рисунок 3.12 – Сопоставление результатов имитационного моделирования процесса разрушения (красная линия) и числа импульсов АЭ (точки) для

определения границ однородного этапа разрушения на примере одного из образцов. При условиях однородного разрушения $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$

Таблица 3.2 – Средние значения показателей оценки после влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения и стандартных акустико-эмиссионных параметров, полученных на этапе нагружения до предела текучести

	Исходный	Термо- обработка	Фаска	УЗО шва	УЗО ОПЗ
$\gamma/\text{КТ}, \text{МПа}^{-1}$	0,0050 $\pm 0,0002$	0,0015 $\pm 0,0003$	0,0029 $\pm 0,0005$	0,0040 $\pm 0,0005$	0,0056 $\pm 0,0003$
Активность, N'	7,6 $\pm 0,67$	17,3 $\pm 0,03$	11,3 $\pm 3,46$	6,9 $\pm 0,97$	6,5 $\pm 0,67$
Амплитуда, дБ	59,9 $\pm 0,23$	57,7 $\pm 0,26$	59,3 $\pm 0,74$	60,8 $\pm 1,00$	62,9 $\pm 0,51$
Число импульсов, N	266 $\pm 21,3$	585 $\pm 4,3$	369 ± 117	188 $\pm 77,1$	196 $\pm 27,4$
MARSE, $\text{мВ}^2 \cdot \text{мс}$	99713 ± 15759	140823 ± 1294	92513 ± 24557	78372 ± 33023	90438 ± 8711
Коэффициент вариации (по $\gamma/\text{КТ}$), %	3,2	17,9	18,1	11,3	6,2
$G_{\text{АЭ}}$	1	3,3	1,7	1,2	0,89

Полученные значения демонстрируют, что при сокращении участка обработки полученных сигналов на этапе нагружения до предела текучести приводит к сходным результатам стандартных параметров акустических эмиссий с полученными значениями на всем этапе нагружения. Из таблицы видно, что термическая обработка образцов приводит к увеличению энергии и количества сигналов, включая их плотность на единицу времени по сравнению с исходными образцами. В то же время результаты ультразвуковой обработки, как сварного шва, так и околошовной зоны, показывают лишь незначительные отличия стандартных АЭ показателей от исходных значений. По амплитудному критерию также

невозможно судить об изменениях при воздействии различных упрочняющих обработок. Для данной выборки также был посчитан коэффициент вариации, среднее значение которого по показателю γ/KT составляет 11,4%, что соответствует средней степени рассеивания значений относительно среднего значения, однако данная выборка также является однородной. Для стандартных акустико-эмиссионных показателей также были посчитаны средние значения коэффициента вариации. Низкое значение степени рассеяния было получено для термообработанных образцов и образцов, подвергнутых ультразвуковому упрочнению околошовной зоны, для которых значения коэффициента вариации были равны 0,6% и 8,7% соответственно. Среднее значение степени рассеяния было получено для исходных образцов со значением коэффициента 11,7%. Высокое значение степени рассеяния было получено для образцов, подвергнутых ультразвуковому упрочнению сварного шва, а также конструктивным упрочнением, где коэффициент вариации был равен 22,5% и 30,7% соответственно. Полученные данные также подтверждают зависимость стандартных акустико-эмиссионных показателей от дестабилизирующих факторов.

С целью определения влияния упрочняющих обработок на сварные соединения выделялся участок нагружения до предела текучести, на котором определялся этап однородного разрушения для нахождения предложенного показателя. В результате проведенного эксперимента и полученных результатов, можно сделать вывод о том, что термообработка показала упрочнение в 3,4 раза, наличие фаски привело к упрочнению в 1,7 раз, УЗО сварного соединения в 1,2 раза относительно исходных значений. Обработка околошовной зоны не привела к увеличению упрочнения относительно исходных значений, а наоборот, привела к разупрочнению в 0,89 раз при данных режимах выбранных упрочняющих обработок для данного металла сварного соединения.

Интерпретация полученных результатов по стандартным параметрам показывает, что самыми активными источниками сигналов АЭ явились термообработанные образцы, кроме того, из обработанных сварных соединений данного вида воздействия, было зарегистрировано больше всего сигналов с

высокими значениями суммарной энергии. Обычно, при промышленных испытаниях новых объектов проводят тестовое нагружение, что в рамках данного эксперимента не проводилось, которое в свою очередь приводит к эффекту Кайзера, то есть необходимости повышать величину нагрузки относительно тестовой. Однако, предложенные показатели показали свою состоятельность и возможность их определения в заданных условиях, что демонстрирует их устойчивость к влиянию дестабилизирующим факторам. Кроме того, так как данные показатели определяются в условиях воздействия на них дестабилизирующих факторов, то при оценке влияния упрочняющих воздействий на промышленных объектах отпадает необходимость трудоемкого и дорогого тестового нагружения после термических операций.

При разработке методики эксперимента планировалось сравнение полученного показателя и стандартных параметров АЭ с механическими характеристиками, полученных при разрыве металла (предел прочности, текучести и т.д.). Однако, в результате эксперимента разрыв образцов происходил в основном металле, в результате чего измерялись механические свойства металла, а не сварных соединений (рисунок 3.13). Так как воздействию упрочняющих обработок, кроме термообработки, были подвергнуты сварные швы, и акустическая эмиссия регистрировалась из них, было принято решение, что такое сопоставление будет некорректным. Представительным способом оценки показателей надежности сварных соединений являются усталостные испытания, так как в основном разрушение происходит по сварному шву.

Для оценки информативности предложенного метода был применен корреляционный анализ с целью выявления взаимосвязи между значениями предложенного показателей и традиционными акустико-эмиссионными показателями, а также числом циклов до разрушения образцов сварных соединений. Эти образцы были подвергнуты усталостным испытаниям на аналогичных стальных материалах, применяя те же упрочняющие обработки [16]. Полученные результаты приведены в [107] и в таблице 3.3.



Рисунок 3.13 – Вид образцов после проведения статического растяжения

Таблица 3.3 – Значение коэффициента корреляции со средними значениями предложенного показателя и стандартных параметров АЭ с числом циклов до разрушения

	Исходный	Термо- обработка	УЗО шва	Коэфф. корреляции с числом циклов до разрушения
G_{AE}	1	3,4	1,2	0,99
$\gamma/KT, \text{МПа}^{-1}$	0,0050 $\pm 0,00012$	0,0009 $\pm 0,0005$	0,0041 $\pm 0,00035$	-0,99
Активность, N'	7,6 $\pm 0,43$	17,3 $\pm 0,03$	6,9 $\pm 1,91$	0,97
Амплитуда, дБ	59,9 $\pm 0,18$	57,7 $\pm 0,21$	60,8 $\pm 0,68$	-0,90
Число импульсов, N	183 $\pm 34,5$	585 $\pm 33,3$	188 $\pm 55,4$	0,98
MARSE, $\text{мВ}^2 \cdot \text{мс}$	100512 ± 10189	140823 ± 7919	78372 ± 27288	0,87
Количество циклов до разрушения [16]	2951	10399	4246	-

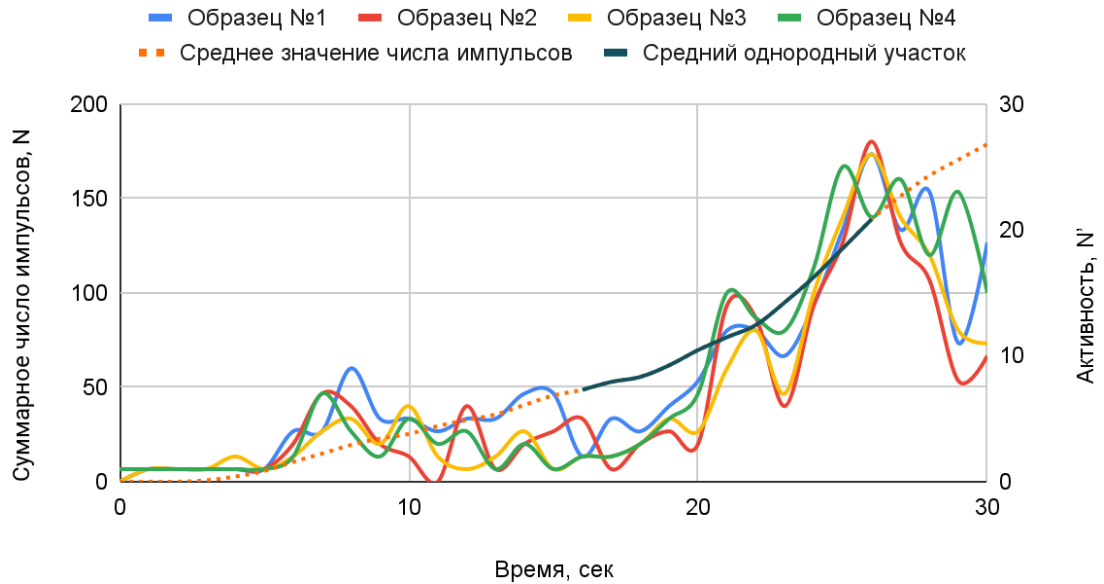
Из таблицы видно, что все параметры имеют высокое значение коэффициента корреляции с количеством циклов до разрушения, что объясняется малой выборкой. При небольшой выборке информативное значение имеет знак коэффициента корреляции. Видно, что значения предложенного показателя

удовлетворительно коррелируют с ресурсом. Это подтверждает предпочтительность использования данного показателя как критерия для оценки упрочняющего воздействия. Увеличение значений этого показателя демонстрирует увеличения ресурса сварных соединений, выраженных числом циклов до разрушения. Для данных образцов оптимальным видом упрочнения является термообработка. Однако, невозможно сказать тоже самое про традиционные критерии, в том числе и MARSE, так как данные параметры имеют положительную корреляцию с ресурсом, что показывает их несостоятельность и противоречит их физическому смыслу.

В ходе эксперимента было обнаружено необычное поведение активности акустической эмиссии, которое проявлялось в ее полном затухании или частичном уменьшении перед стадией однородного разрушения материала. Такая тенденция наблюдалась только у сварных соединений, подвергнутых упрочняющему воздействию, и не наблюдалась у исходных образцов. На рисунках 3.14 приведены зависимости числа импульсов и активности акустической эмиссии от момента начала нагружения до предела текучести материала. Из этих зависимостей видно, что активность акустической эмиссии начинает возрастать с начала нагружения и достигает максимума через 5-8 секунд в зависимости от вида упрочнения. Затем происходит резкое или постепенное уменьшение значения активности до минимума или нуля, с последующим ростом, который заканчивается примерно к 20 секунде. Это уменьшение является индикацией начала стадии однородного разрушения, которая характеризуется резким увеличением активности. Эта особенность имеет определяющее значение для идентификации предложенного показателя. Наличие такого плато на временной зависимости числа импульсов АЭ обосновывается структурными преобразованиями и снятием упрочняющими воздействиями внутренних напряжений с элементов, разрушающихся неоднородно. Поскольку эти элементы не оказывают влияния на долговечность материала, в силу их небольшого количества, не достаточного для обеспечения критической концентрации микротрещин при разрушении, то такое снятие не приводит к его упрочнению, что объясняет недоверие к методам оценки влияния

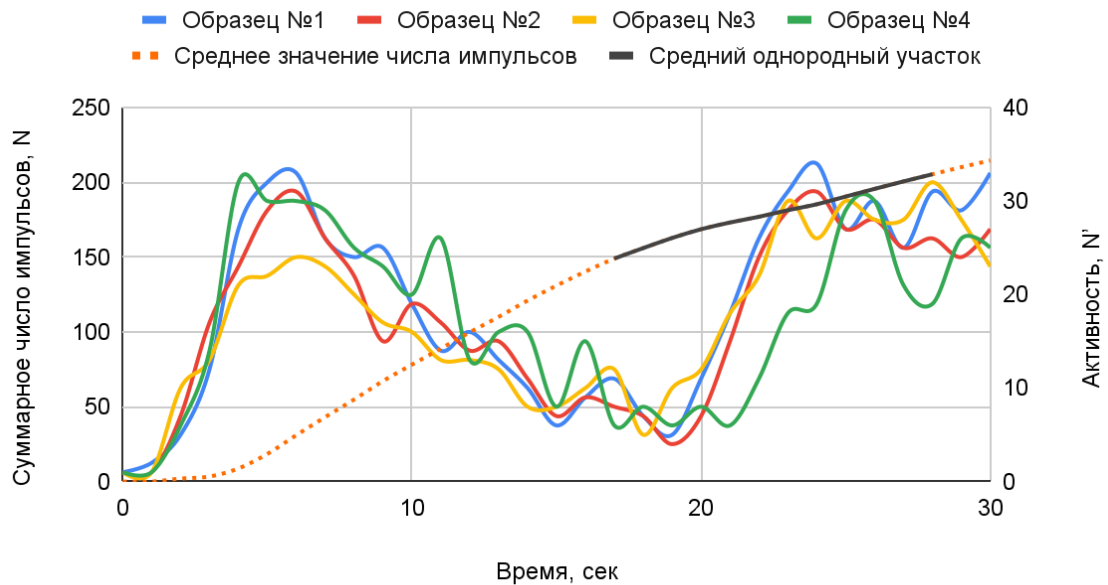
упрочняющих воздействий, основанным на контроле внутренних напряжений, которое ведётся методами отражения или рассеяния на более способствующих этому отражению или рассеянию крупных структурных элементов, обладающих меньшей прочностью.

Исходные образцы



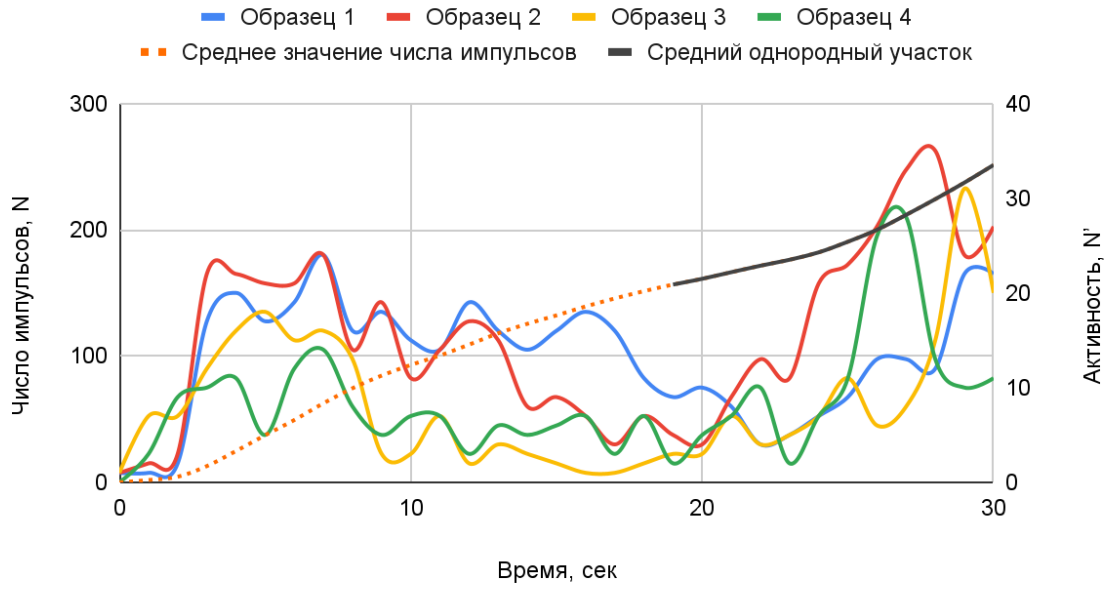
а)

Термообработанные образцы



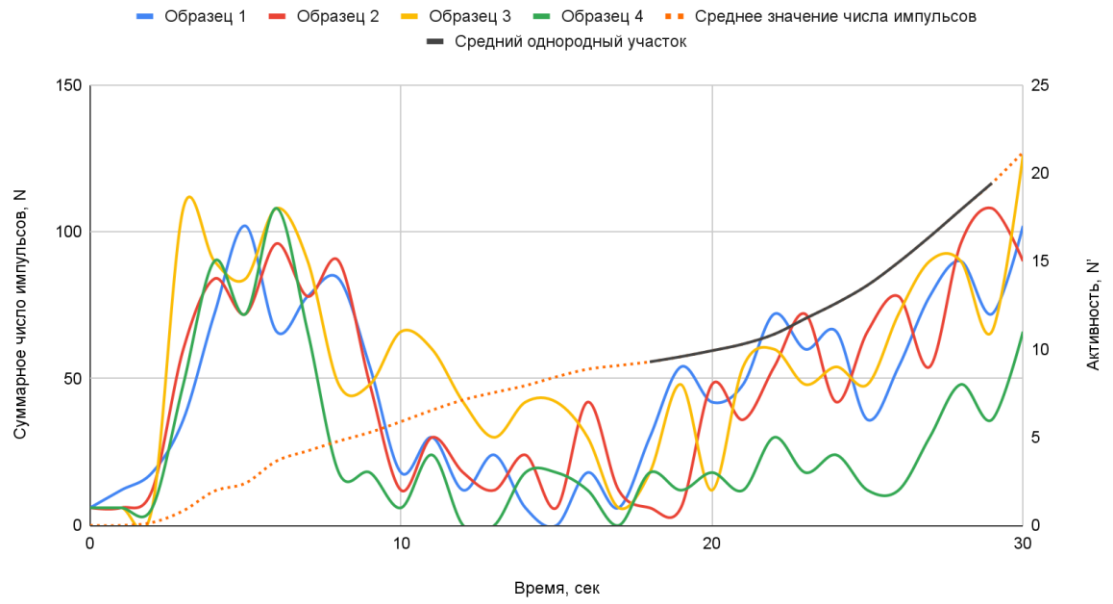
б)

Наличие фаски

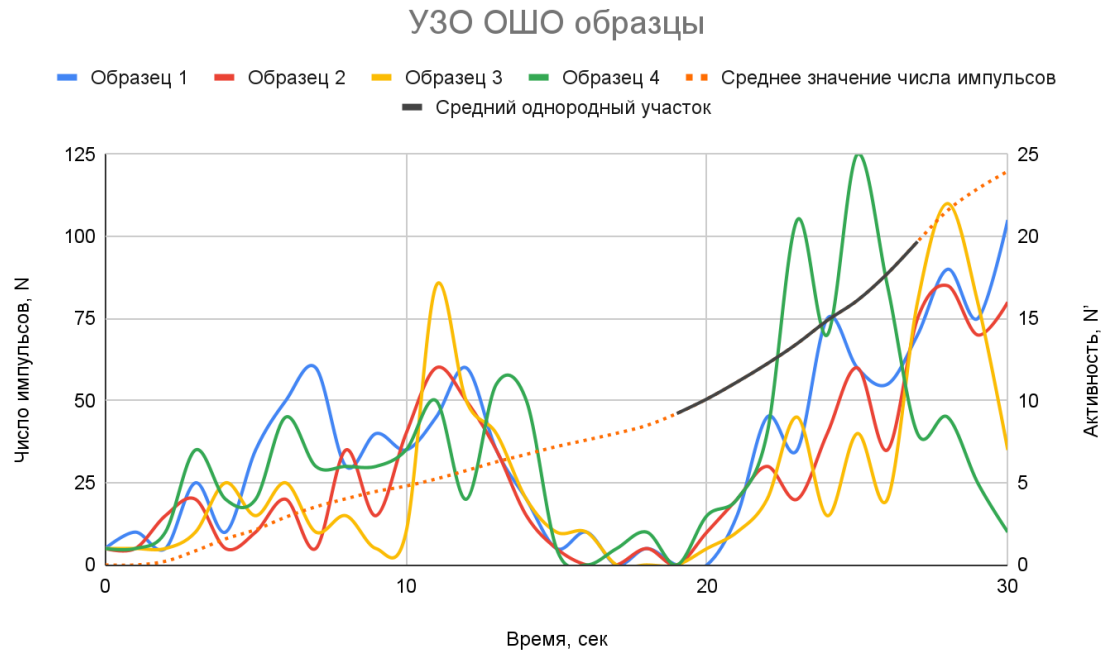


в)

УЗО сварного шва



г)



д)

Рисунок 3.14 – Зависимость суммарного числа импульсов и активности акустической эмиссии для всех видов упрочняющих воздействий, где:

- а) – исходный,
- б) – термообработка,
- в) – наличие конструкционного упрочнения,
- г) – УЗО сварного шва,
- д) – УЗО околошовной зоны

3.4 Выводы по Главе 3

1. Подготовлен и проведен эксперимент по оценке влияния упрочняющих воздействий на параметры АЭ и сварные соединения. Произведена обработка полученных результатов.

2. Экспериментально доказано, что стандартные акустико-эмиссионные показатели, такие как суммарное число импульсов, активность, амплитуда, MARSE, являются несостоятельными для оценки влияния упрочняющих обработок, воздействующих на сварные соединения.

3. Экспериментально доказано, что предложенный показатель способен оценить влияние упрочняющих воздействий в условиях неоднородного структурного и напряженно-деформированного состояния сварного соединения, что демонстрирует их устойчивость к влиянию дестабилизирующих факторов.

4. Выявлена особенность определения предложенного показателя оценки влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения, заключающаяся в полном или частичном затухании активности сигналов АЭ перед этапом кинетически однородного разрушения.

5. На основе корреляционного анализа установлено, что увеличение численного значения показателя G_{AE} , отношения угловых коэффициентов зависимости суммарного числа импульсов акустической эмиссии от нагрузки до и после воздействия упрочнения, свидетельствует об увеличении ресурса сварного соединения.

6. Термообработка привела к упрочнению сварного соединения в 3,3 раза, наличие фаски привело к упрочнению в 1,7 раз, УЗО сварного соединения в 1,2 раза относительно исходных значений. Обработка околошовной зоны не привела к увеличению упрочнения относительно исходных значений, а наоборот, привела к разупрочнению в 0,89 раз при заданных режимах выбранных упрочняющих обработок для данного металла сварного соединения.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК НА СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

4.1 Автоматизация определения степени упрочнения по сигналам акустической эмиссии

Применение метода акустической эмиссии для мониторинга промышленных объектов, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок, включая уязвимые элементы, такие как сварные соединения, подвергнутые влиянию упрочняющих воздействий, позволяет получить ценные сведения об их состоянии. Непрерывный мониторинг этих элементов создает обширные наборы данных, которые требуют применения передовых автоматизированных аналитических подходов для интерпретации результатов измерений.

В связи с этим была предложена автоматизация одного из ключевых аспектов анализа сигналов акустической эмиссии. Разработан программный алгоритм, который автоматизирует процесс определения предложенного показателя G_{AE} и соответствующего критерия для оценки влияния упрочняющих воздействий. Этот алгоритм был реализован в виде программного обеспечения, способного быстро и точно обрабатывать большие объемы данных. Автоматизация анализа сигналов АЭ значительно повышает эффективность и точность мониторинга, позволяя оперативно выявлять изменения в состоянии сварных соединений и других уязвимых элементов промышленных объектов..

Ручное определение предложенных угловых коэффициентов имеют ряд несовершенств, включающих в себя трудоемкий процесс ручного труда, который не только занимает много времени, но и подвержен человеческим ошибкам. Для этого в данной работе предлагается автоматизация данного процесса, путем реализации алгоритма, позволяющего определить предложенный угловой коэффициент и критерий упрочнения на его основе. Таким образом, реализация алгоритма стремится повысить эффективность обработки данных, являясь при этом сочетанием инноваций и практической востребованности.

Первым этапом реализации алгоритма является чтение полученных в результате нагружения данных. При этом, к процессу регистрации и записи результатов диагностического нагружения предъявляются рекомендации, описанные в главе 2. Помимо требований нормативных документов по применению метода акустической эмиссии, требований к датчикам, их расположению и калибровке, процесс нагружения должен быть корректным с постоянной скоростью роста нагрузки для минимизации влияния неопределенности на результат измерения. Кроме того, должны быть приняты меры для снижения влияния шума на результаты регистрации сигналов. Запись акустических сигналов осуществляется в текстовом формате с содержанием всей информации, предусмотренной конкретной аппаратурой. Данная программа предназначена для обработки результатов, полученных с помощью акустико-эмиссионной системы СДАЭ-16(2). На первом этапе осуществляется чтение записанных при нагружении файлов, при этом пользователь самостоятельно указывает их расположение и количество файлов. Текстовый документ преобразуется в удобный для обработки формат датафрейма, при этом название текстового файла является уникальным идентификатором и добавляется в качестве отдельного столбца для осуществления дальнейшей обработки. При наличии данных о нагружении в текстовом виде пользователь указывает их расположение для дальнейшего чтения данных.

Вторым этапом является идентификация границ этапа однородного разрушения для нахождения значений угловых коэффициентов до и после обработки. Этот процесс включает в себя несколько ключевых шагов, обеспечивающих точное определение начала и окончания данного этапа. Для определения начала этапа однородного разрушения формируется дополнительный столбец с активностью акустических сигналов, который рассчитывается как количество сигналов в единицу времени. Эта метрика позволяет выделить момент, когда активность акустической эмиссии затухает до нулевых или около нулевых значений. Окончание этапа однородного разрушения определяется с помощью коэффициента перекрытия сигналов, который рассчитывается как суммарная

длительность сигналов в единицу времени. Для нахождения границы окончания этапа анализируется момент времени, при котором значение коэффициента перекрытия сигналов резко возрастает относительно предыдущих значений в 3 и более раз. Этот момент резкого роста считается точкой окончания этапа однородного разрушения. Для точного определения начальной точки этапа однородного разрушения формируется зависимость активности акустической эмиссии от времени. Эта зависимость ограничена окончанием этапа, определенного ранее. На данной зависимости определяется значение времени при минимальном значении экстремума, игнорируя первые пять секунд нагружения, чтобы исключить влияние начальных неустойчивых процессов. В случае невозможности автоматического определения границ, пользователю предоставляется возможность ручного ввода данных на основе выведенных графиков.

Следующей стадией является определение угловых коэффициентов в обозначенных границах для двух состояний. Этот процесс включает несколько последовательных шагов, направленных на точное вычисление необходимых параметров. В первую очередь определяются значения исходных данных, что включает в себя анализ акустико-эмиссионных сигналов в пределах ранее установленных границ этапа однородного разрушения. На этом этапе производится детальный расчет угловых коэффициентов для исходных сварных соединений, чтобы установить базовые значения показателей. Затем аналогичные расчеты проводятся для сварных соединений, подвергнутых влиянию упрочняющих обработок. Это необходимо для нахождения предложенного показателя, который отражает изменения в структуре и свойствах материала под воздействием упрочняющих обработок. Данная итерация выполняется для каждого измерения акустической эмиссии, обеспечивая всесторонний анализ всех собранных данных.

Последней стадией является определение критерия упрочнения. На этом этапе анализируются полученные угловые коэффициенты и сравниваются между собой для выявления влияния упрочняющих обработок. Этот критерий позволяет оценить степень улучшения механических свойств сварных соединений под

воздействием различных упрочняющих методов. Схематичное представление алгоритма приведено на рисунке 4.1, где наглядно отображены все этапы процесса, начиная от сбора и обработки данных до конечного анализа и интерпретации результатов. Этот структурированный подход обеспечивает высокую точность и надежность оценок, позволяя сделать обоснованные выводы о влиянии упрочняющих обработок на сварные соединения.

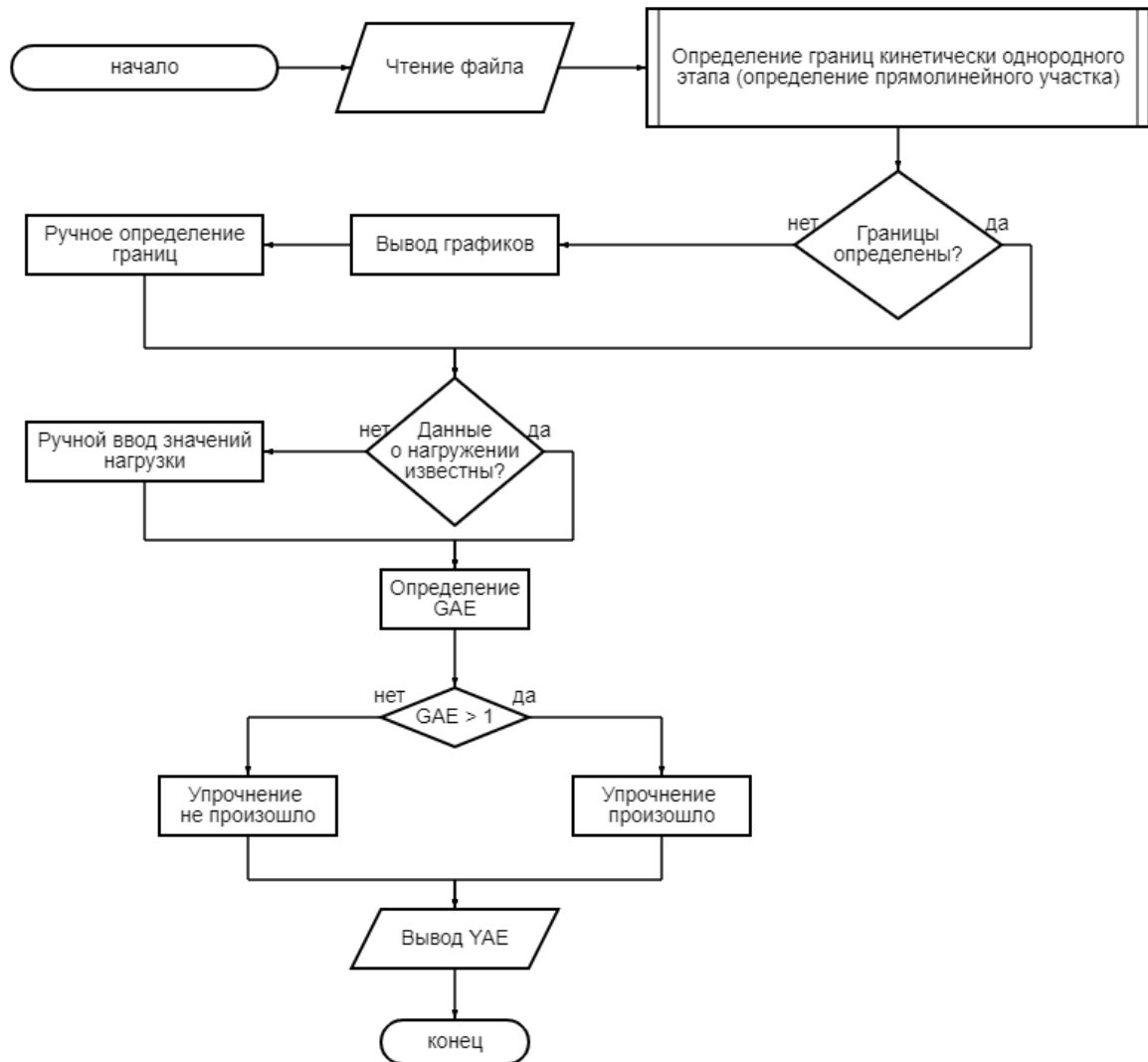


Рисунок 4.1 – Блок-схема реализации алгоритма автоматизированного определения влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения

4.2 Методика по контролю сварных соединений, подверженных влиянию упрочняющих обработок

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложен проект методики по оценке влияния воздействия упрочняющих обработок на сварные соединения и алгоритм его реализации. Реализация данного проекта предполагается для оценки влияния упрочняющих обработок на сварные соединения, которые способствуют увеличению сопротивляемости разрушению или деформациям и приводят к повышению механических характеристик сварных соединений, а также к увеличению их долговечности. Алгоритм оценки осуществляется на основе нескольких этапов.

В первую очередь происходит определение цели упрочняющего воздействия на сварные соединения, а также механической характеристики, потенциальное повышение которого планируется как результат этого воздействия. Механическая характеристика должна быть связана с необратимым повышением сопротивляемости разрушению или остаточной деформации сварного соединения. Кроме того, определяется промышленный объект, внедрение упрочняющей обработок на котором планируется осуществлять. Промышленный объект должен работать в условиях повторно-переменных нагрузок, в частности к ним можно отнести сосуды давления или подъемно-транспортные машины и механизмы. Исходя из конфигурации объекта контроля подготавливаются сварные соединения для проведения исследований, которые изготавливаются из того же материала, тем же методом сварки и конфигурацией, при этом соблюдаются габаритные размеры, что и у самого объекта контроля. Если возможно, то сварные соединения могут быть вырезаны непосредственно из самого объекта контроля. Изготовление сварных соединений происходит в соответствии с нормативными документами, выбор которых зависит от конфигурации и вида сварки. Кроме того, определяется вид диагностической нагрузки, где для образцов достаточно стандартного исследования на статическое растяжение. В случае испытаний промышленных образцов нагружение происходит рабочей средой.

После определения целей, объектов и характеристики упрочнения происходит выбор способа повышения заданной характеристики. Определяется упрочняющее воздействие, направленное непосредственно на повышение заданной механической характеристики сварного соединения. Упрочняющая обработка выполняется в соответствии с нормативными документами в случае стандартных упрочняющих воздействий. Если требуется оценить влияние новой упрочняющей технологии, то ее обработка производится в полном соответствии с заявленной технологией. Воздействие упрочняющих обработки осуществляется непосредственно на подготовленные образцы сварных соединений, либо на сварные швы на самом объекте контроля, подверженных влиянию повторно-переменных нагрузок.

После воздействия упрочняющих технологий на сварные швы, расположенных на образцах, либо на объекте контроля, происходит подготовка сварных соединений и установка преобразователей акустической эмиссии. Установка акустико-эмиссионных преобразователей осуществляется непосредственно вблизи сварного соединения, подвергнутого влиянию упрочняющего воздействия, примерно 2-4 см от сварного шва. Установка преобразователей осуществляется на предварительно очищенную поверхность с нанесенной контактной жидкостью. Для проведения диагностического нагружения достаточно двухканальной акустико-эмиссионной аппаратуры, однако данные рекомендации не запрещают использование многоканальной аппаратуры. Требования к преобразователям и к аппаратуре представлены в нормативных документах, в частности ПБ 03-593-03 "Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов". Требования к персоналу также представлены в вышеизложенном документе. Кроме того, персонал должен быть аттестован в соответствии с действующими нормативными документами, в частности СДАНК-02-2020 "Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля".

После подготовки образцов или объекта контроля и установки преобразователей акустической эмиссии, производится подготовка к

диагностическому напряжению, необходимому для возникновения упругих колебаний в сварных швах. Для сваренных образцов в качестве диагностического нагружения выбирается статическое растяжение, которое регламентируется ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Для проверки упрочнения непосредственно на промышленном объекте диагностическое нагружение производится рабочей средой (жидкости, газы и т.д.) выше на 5-10% от P_p , где P_p – рабочая нагрузка данного объекта контроля. Перед проведением нагружения производится калибровка акустико-эмиссионных преобразователей методами абсолютных или относительных измерений, изложенных в РД 03-300-99 «Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов». Нагружение производится с постоянной скоростью роста механических напряжений, в процессе которых фиксируются сигналы акустической эмиссии, которые впоследствии подвергаются обработке для определения степени упрочнения конкретного упрочняющего воздействия.

После определения вида нагрузки происходит диагностическое нагружение, в процессе которого регистрируются сигналы акустической эмиссии. Для определения степени упрочнения упрочняющего воздействия необходимо в ходе лабораторных исследований необходимо провести серию испытаний образцов контрольной группы и серию образцов подверженных влиянию упрочняющих обработок. В случае диагностического нагружения промышленного объекта определение степени упрочнения происходит по результатам нагружения до воздействия упрочняющей обработки и после нее. Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществляется в процессе полного цикла нагружения. Координаты источников вычисляются по разнице прихода времен сигналов на акустико-эмиссионные преобразователи. Для уменьшения влияния помех следует применять частотную, амплитудную и временную фильтрации. Результаты регистрации акустической эмиссии и данные по нагружению записываются в виде табличных данных.

После регистрации данных акустической эмиссии и данных по нагружению переходят к обработке результатов и определению степени упрочнения. Оценка степени упрочнения происходит по акустико-эмиссионному показателю G_{AE} . Для этого строятся зависимости числа импульсов акустической эмиссии от механических напряжений, полученных в результате исследований. После этого определяются границы кинетически однородного участка (прямолинейный участок на графике). Начало этапа следует за полным или частичным затуханием активности сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных ниже предела текучести. Активность определяется как отношение суммы числа импульсов в единицу времени. В случае отсутствия спада активности начало однородного участка определяется по кинетическому признаку. Для этого строится зависимость числа импульсов акустической эмиссии от механических напряжений в полулогарифмических координатах и начало участка определяется началом прямолинейного участка. Конец участка упругих колебаний определяется на основе признака упругих деформаций и характеризуется резким скачкообразным повышением коэффициента перекрытия сигналов. Либо определение окончания этапа однородных колебаний определяется исходя из графической интерпретации в полулогарифмических координатах. Именно прямолинейный участок является паттерном для определения влияния упрочняющих воздействий на сварные соединения, так как соотносится с показателями надежности на основе корреляционной зависимости. После определения углового коэффициента для контрольной группы образцов, и образцов, подверженных влиянию упрочняющего воздействия, определяется показатель G_{AE} как отношение угловых коэффициентов контрольной группы к упрочненным. По данному соотношению определяется качество упрочняющего воздействия. Аналогично действуют при определении степени упрочнения на реальном объекте, только соотношение определяется до и после упрочняющего воздействия.

После определения предложенного показателя производят статистическую обработку полученных результатов известными методами статистического анализа

для подтверждения надежности и достоверности полученных данных. Схематично рекомендации представлены на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Структурная схема методики по оценке влияния упрочняющих обработок на сварные соединения

В заключении данных рекомендаций формируют отчет, в котором указывается материал и конфигурация сварного соединения, описание образцов и объекта контроля, технические характеристики упрочняющего воздействия, время и параметры обработки, вид, параметры и условия нагружения, сведения об акустико-эмиссионной аппаратуре и схеме установки преобразователей, сведения об зарегистрированных данных акустической эмиссии, полученные значения предложенного показателя со статистической обработкой полученных результатов, эффективность каждой упрочняющей технологии для данного материала, рекомендации по применению данных видов обработок для данных сварных соединений.

4.3 Выводы по 4 главе

1. Разработан и реализован метод определения степени упрочнения упрочняющих обработок сварных соединений и алгоритм его реализации. Этот метод позволяет точно оценивать изменения в механических свойствах сварных соединений под воздействием различных упрочняющих обработок, обеспечивая высокую точность и достоверность получаемых результатов.

2. Разработана методика по автоматизированной оценке влияния упрочняющих обработок, позволяющая оценить степень упрочнения по предложенному показателю. Внедрение этой методики способствует повышению эффективности мониторинга и анализа состояния сварных соединений, а также облегчает процесс принятия решений по их эксплуатации и дальнейшему совершенствованию упрочняющих методов.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов [и др.]. – Новосибирск : Новосибирское отделение издательства «Наука», 2018. – 272 с.
2. Алешин, Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений : Учебное пособие / Н. П. Алешин. – Москва : Машиностроение, 2006. – 368 с.
3. Алешин, Н. П. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вовилкин; ред. Алешин Н. П. – Москва : Машиностроение, 1989. – 455 с.
4. Андреева, Л. П. Применение метода акустической эмиссии для контроля образования микротрещины в точечном тонколистовом сварном соединении / Л. П. Андреева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – Т. 2. – № 65. – С. 8-14.
5. Андрейкин, А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкин, Н. В. Лысак. – Киев : Наук. думка, 1989. – 176 с.
6. Антонов, А. А. Проблемы экспериментальных измерений напряженного состояния в сварных конструкциях / А. А. Антонов // Промышленный сервис. – 2016. – Т. 2. – № 59. – С. 27-30.
7. Артемов, И. И. Акустическая эмиссия в условиях «скрытого» подрастания микротрещин / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – Т. 4. – С. 92-95.
8. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2-х томах. Том 1. / М. Л. Бернштейн. – Москва : Металлургия, 1968. – 596 с.
9. Бехер, С. А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учебное пособие / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. – Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2013. – 145 с.
10. Бида, Г. В. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук // Дефектоскопия. – 2000. – Т. 10. – С. 3-27.
11. Болдырев, А. И. Экспериментальные исследования состояния

поверхностного слоя после электрохимикомеханической обработки / А. И. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 10. – С. 15-20.

12. Боровская, Я. С. Влияние циклического нагружения на величины остаточных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений / Я. С. Боровская, С. И. Елеонский, В. С. Писарев // Ученые записки ЦАГИ. – 2018. – Т. 49. – № 6. – С. 64-82.

13. Бочвар, А. А. Основы термической обработки сплавов : Учеб. пособие для ВТУЗов / А. А. Бочвар. – Москва : Metallurgizdat, НКЧМ СССР, Гос. научно-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1940. – 298 с.

14. Бураков, И. Н. Методика прогнозирования работоспособности сварных соединений металлоконструкций методом акустической эмиссии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. Н. Бураков. – Санкт-Петербург, 2004. – 189 с.

15. Вайнберг, В. Е. Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии / В. Е. Вайнберг, А. Ш. Кантор, Р. Г. Лупашку // Дефектоскопия. – 1976. – Т. 3. – С. 89–96.

16. Вержбицкий, К. Д. Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем дополнительной обработки сварных соединений нижнего пояса : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : диссертация на соискание ученой степени канд / К. Д. Вержбицкий. – Санкт-Петербург, 2019. – 103 с.

17. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А. М. Лепихин, Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, А. П. Черняев; ред. Ю. И. Шокин. – Новосибирск : Новосибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия "Академический научно-издательский и книгораспространительский центр «Наука», 2003. – 174 с.

18. Влияние размера зерна на упрочнение сплава ВТ1-0, имплантированного ионами алюминия / А. В. Никоненко, Н. А. Попова, Е. Л. Калашников, М.П. Никоненко, И. А. Курзина // Фундаментальные проблемы

современного материаловедения. – 2014. – Т. 11. – № 4. – С. 437-443.

19. Волков, С. С. Обработка сварных соединений ультразвуковыми колебаниями / С. С. Волков, Д. С. Розанов, С. А. Королев // Вестник машиностроения. – 2019. – Т. 3. – С. 68-70.

20. Галкин, Д. И. Современный подход к визуальному и измерительному контролю сварных соединений / Д. И. Галкин, М. П. Клейзер, А. Е. Шубочкин // Ползуновский альманах. – 2022. – Тт. 4-2. – С. 55-60.

21. Глезер, А. М. Не дислокационные моды пластической деформации твердых тел / А. М. Глезер // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2003. – Т. 67. – № 6. – С. 810-817.

22. ГОСТ 16037–80 «Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». – Москва : ИПК издательство стандартов, 1981. – 40 с.

23. ГОСТ 18295-72. Обработка упрочняющая. Термины и определения. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 5 с.

24. ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». – Москва : Стандартиформ, 1986. – 50 с.

25. ГОСТ 31244-2004. Контроль неразрушающий. Оценка физико-механических характеристик материала элементов технических систем акустическим методом. Общие требования : межгосударственный стандарт : дата введения 2010-04-01. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 7 с.

26. ГОСТ 3242–79 «Соединения сварные. Методы контроля качества». Дата введения — 01.01.1981. – Москва : Стандартиформ, 1981. – 10 с.

27. ГОСТ Р 57180–2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры». – Москва : Стандартиформ, 2019. – 25 с.

28. Грешников, В. А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. В. Дробот. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 272 с.

29. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – Москва : Наука, 1976. – 229 с.
30. Гринберг, Б. А. Новые методы упрочнения упорядоченных сплавов / Б. А. Гринберг, В. И. Сюткина. – Москва : Металлургия, 1985. – 185 с.
31. Гулевский, А. В. Обнаружение устойчивого роста трещин методом акустической эмиссии / А. В. Гулевский // Автоматическая сварка. – 1984. – Т. 5. – С. 16-21.
32. Дмитриев, А. А. Цифровая обработка сигналов акустической эмиссии при исследовании сварных соединений в металлических сплавах / А. А. Дмитриев, В. В. Поляков, Е. А. Колубаев // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2020. – Т. 4. – № 1. – С. 32-40.
33. Донин, А. Р. Расчет долговечности сварных соединений по активности акустической эмиссии / А. Р. Донин // Дефектоскопия. – 1980. – Т. 6. – С. 52-57.
34. Дорохова, Е. Г. Разработка методики идентификации источников акустической эмиссии при контроле сварных трубопроводов на основе комплексных информативных параметров : специальность 05.02.11 «Методы контроля и диагностика в машиностроении» : автореферат диссертации на соис / Е. Г. Дорохова. – Москва, 2000. – 16 с.
35. Дуров, Д. С. Устранение дефектов сварки на границе сплавления методами поверхностного пластического деформирующего упрочнения / Д. С. Дуров, Д. И. Диденко, Т. А. Рыбинская // Тяжелое машиностроение. – 2009. – Т. 8. – С. 26-29.
36. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – URL: <https://gteaudit.ru/ezhegodnye-otchety-o-deyatelnosti> (дата обращения: 30.06.2024). – Текст : электронный.
37. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 240 с.
38. Журков, С. Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров // Докл. АН СССР. – 1981.

– Т. 259. – № 6. – С. 1350–1353.

39. Иванов, В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.

40. Иванов, В. И. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 томах : том 7: В 2 кн. Кн. 1 / В. И. Иванов, И. Э. Власов; ред. В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2008. – 829 с.

41. Кавун, В. И. Повышение прочности и долговечности неразъемных корпусных соединений с применением метода магнитно-импульсной обработки / В. И. Кавун, А. В. Кавун // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2011. – Т. 2. – № 5. – С. 108-115.

42. Кашубский, А. Н. Идентификация конструкционных материалов методами неразрушающего контроля физико-механических характеристик и структурных параметров : специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : автореферат диссертации / А. Н. Кашубский. – Красноярск, 2006. – 20 с.

43. Кимстач, А. В. Методы контроля и диагностика остаточных напряжений в сварных соединениях при ультразвуковой обработке : специальность 05.02.11 «Методы контроля и диагностика в машиностроении» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Кимстач. – Санкт-Петербург, 2004. – 24 с.

44. Кинетический подход к прогнозированию методом акустической эмиссии прочности и долговечности адгезионных соединений металл-полимер / А. Я. Башкарев, В. С. Куксенко, В. В. Носов, В. А. Петров // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 301. – № 3. – С. 595 – 598.

45. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : Справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, Гусенков. А.П. – Москва : Научно-техническое издательство «Машиностроение», 1985. – 224 с.

46. Колмыков, Д. В. О методах упрочняющей обработки стальных изделий / Д. В. Колмыков, В. В. Катенев, Е. А. Косинов // Auditorium. – 2016. – Т. 4. – № 12. – С. 54-56.

47. Комплексный неразрушающий контроль качества термообработки изделий из алюминиевого сплава АК4-1 / А. С. Бедарев, В. В. Муравьев, А. Л. Рубин, А. В. Шарко // Дефектоскопия. – 1993. – Т. 3. – С. 12-18.
48. Корнилова, А. В. Исследование процесса накопления повреждаемости в деталях кузнечно-прессового оборудования и инструмента магнитными методами / А. В. Корнилова, И. М. Идармачев // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2. – № 16. – С. 187-191.
49. Коротков, А. Н. Анализ методов обработки сварных швов / А. Н. Коротков, Д. М. Дубинкин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – Т. 3. – С. 28-30.
50. Кудрявцев, И. В. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. В 5-ти т. Том 1. / И. В. Кудрявцев. – Москва : Машиностроение, 1967. – 497 с.
51. Кудрявцев, И. В. Усталость сварных конструкций / И. В. Кудрявцев, Н. Е. Наумченков. – Москва : Издательство «Машиностроение», 1976. – 272 с.
52. Лазерный наклеп для повышения усталостной прочности / Ю. Ж. Исаенко, М. В. Осипов, В. Н. Пузырев [и др.] // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2012. – Т. 5. – № 73. – С. 32-33.
53. Ларионов, В. В. Прочность сварных стальных конструкций при малоцикловом нагружении / В. В. Ларионов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – Т. 8. – С. 70-79.
54. Лашенко, Г. И. Технологические возможности вибрационной обработки сварных конструкций (Обзор) / Г. И. Лашенко // Автоматическая сварка. – 2016. – Т. 7. – С. 28-34.
55. Ляхова, Е. Н. Разработка методики прогнозирования работоспособности критически нагруженных конструкций на основе использования явления акустической эмиссии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. Н. Ляхова. – 2012. – 143 с.
56. Мамонтов, В. А. Исследование влияния шероховатости переходных поверхностей зубьев колес, упрочняемых поверхностной закалкой ТВЧ, на изгибную выносливость / В. А. Мамонтов, А. Саламех, А. Р. Рубан // Вестник

Астраханского государственного технического университета. – 2007. – Т. 2. – № 37. – С. 64-67.

57. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, Ю. В. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.]; ред. А. С. Зубченко. – Москва : Машиностроение, 2003. – 784 с.

58. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность : в 2-х ч. / Н. А. Махутов; ред. К. В. Фролов, В. В. Москвичев. – Новосибирск : Наука, 2005. – 493 с.

59. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М. А. Мельгуй; ред. Н. Н. Зацепин. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.

60. Недзведская, О. В. Количественные оценки возможностей неразрушающего контроля на базе явления акустической эмиссии / О. В. Недзведская, Г. А. Буденков, А. Ю. Котоломов // Дефектоскопия. – 2001. – Т. 6. – С. 50-67.

61. Недосека, А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. – Киев : Индпром, 2001. – 815 с.

62. Нефедьев, Е. Ю. Изучение связи сигналов акустической эмиссии с размерами микротрещин и размерами структурных элементов стали / Е. Ю. Нефедьев, Л. О. Стояновский // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – Т. 12. – С. 230-242.

63. Нефедьев, Е. Ю. Применение машинного обучения для выявления дефектов методом акустической эмиссии при сварке конструкций ответственного назначения / Е. Ю. Нефедьев, Л. О. Стояновский // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2022. – Т. 11. – С. 173-184.

64. Николаев, Г. А. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Том 1 / Г. А. Николаев; ред. Н. А. Ольшанский. – Москва : Машиностроение, 1978. – 504 с.

65. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования / В. В. Носов. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2016. – 376 с.

66. Носов, В. В. Методология акустико-эмиссионной оценки прочности

как основа эффективности неразрушающего контроля / В. В. Носов // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – Т. 3. – № 65. – С. 7-13.

67. Носов, В. В. Методология оценки прочности конструкционных материалов, работоспособности и механического состояния технических объектов на основе использования явления акустической эмиссии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В. В. Носов. – Санкт-Петербург, 1997. – 330 с.

68. Носов, В. В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов / В. В. Носов // Дефектоскопия. – 2016. – Т. 7. – С. 52-67.

69. Носов, В. В. Прогнозирование работоспособности сложно нагруженных металлических конструкций: монография / В. В. Носов. – Саарбрюккен : LAP Lambert Academic Publishing, 2021. – 180 с.

70. Носов, В. В. Методика акустико-эмиссионной оценки нанохарактеристик прочности конструкционных и машиностроительных материалов объектов / В. В. Носов, **Е. В. Григорьев** // Контроль. Диагностика. – 2019. – Т. 9. – С. 44-57.

71. 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.

72. Носов, В. В. Метод акустической эмиссии: учебное пособие / В. В. Носов, А. Р. Ямилова. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2017. – 304 с.

73. Обзор методов контроля качества сварных соединений / А. А. Таланин, А. М. Мазанов, Л. А. Закалюкина [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2017. – С. 186-188.

74. Опыт местной термообработки замыкающих сварных швов

крупногабаритных сосудов давления / Т. И. Титова, С. А. Бочаров, О. Н. Журавлева [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2023. – Т. 9. – С. 23-29.

75. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г. Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарев. – Москва : Наука: Физматлит, 1996. – 240 с.

76. Оценка влияния различных видов термообработки на свойства металла сварных швов труб, сваренных контактной сваркой токами высокой частоты / Г. В. Нестеров, О. А. Задубровская, П. В. Пошибаев [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – Т. 4. – № 62. – С. 8-11.

77. Павлов, В. Ф. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность гладких образцов из стали 45 / В. Ф. Павлов, М. А. Сагитов // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – 1977. – Т. 3. – С. 88-92.

78. Палаев, А. Г. Патент № 2805006 С1 Российская Федерация, МПК В23К 9/02. Устройство для снижения остаточных напряжений : № 2023116690 : заявл. 26.06.2023 : опубл. 10.10.2023 / А. Г. Палаев, А. А. Красников. – заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», .

79. Палаев, А. Г. Повышение надежности стальных трубопроводов за счет снятия остаточных внутренних напряжений сварных соединений методом ультразвуковой обработки / А. Г. Палаев, М. Н. Назарова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – Тт. 5-2. – С. 401-405.

80. ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов». – 2003. – 55 с.

81. Перспективные методы получения упрочняющих покрытий / М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев [и др.]. – Барнаул : ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), 2016. – 182 с.

82. Петров, В. А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов / В. А. Петров, В. И. Веттегрень. – Санкт-Петербург : Политехника, 1993. – 475 с.
83. Понамарева, Е. А. Перспективные методы неразрушающего контроля сварных соединений / Е. А. Понамарева, А. В. Анастасьев // Конструкторское бюро. – 2021. – Т. 6. – С. 71-78.
84. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества сварного шва в процессе его изготовления / В. П. Гомера, Е. Ю. Нефедьев, А. Д. Смирнов, Д. Н. Ковалев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2016. – Т. 5. – С. 376-389.
85. Применение метода акустической эмиссии и цифровой корреляции изображений при выявлении диффузионных прослоек разнородных сварных соединений / В. А. Барат, А. Ю. Марченков, А. Ю. Поройков [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – Т. 10. – С. 73-75.
86. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел: монография / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – Москва : Издательство “Наука”, 1974. – 560 с.
87. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали / Е. Ю. Нефедьев, В. А. Волков, С. В. Кудряшов [и др.] // Дефектоскопия. – 1986. – Т. 3. – С. 41-44.
88. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 336 с.
89. Степанова, Л. Н. Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа / Л. Н. Степанова, К. В. Канифадин, С. А. Лазненко // Дефектоскопия. – 2010. – Т. 1. – С. 73-82.
90. Степанова, Л. Н. Разработка методики браковки дефектов многопроходной сварки по распределению основных параметров сигналов акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, И. С. Рамазанов, В. В. Киреенко // Дефектоскопия. – 2014. – Т. 11. – С. 57-70.

91. Тажибаев, А. Р. Методы выявления и снижения остаточных напряжений в сварных соединениях / А. Р. Тажибаев, Г. И. Тажибаева, А. В. Бикбулатова // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – Т. 5. – № 38. – С. 45-53.
92. Трипалин, А. С. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты / А. С. Трипалин, С. И. Буйло. – Ростов-на-Дону : Издательство Ростовского государственного университета, 1986. – 160 с.
93. Троицкий, В. А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин / В. А. Троицкий. – Киев : Общество с ограниченной ответственностью «Феникс», 2002. – 300 с.
94. Троицкий, В. А. Новые возможности радиационного контроля качества сварных соединений / В. А. Троицкий // Автоматическая сварка. – 2015. – Т. 7. – № 743. – С. 56-60.
95. Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали / А. В. Гончар, В. А. Ключников, В. В. Мишакин, М. С. Аносов // Дефектоскопия. – 2021. – Т. 7. – С. 28-36.
96. Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности : Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» и LXIII Международной конференции, Тольятти, 13–17 сентяб. – Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2021. – 328 с.
97. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. – Пер. с англ. – Москва : Мир, 1972. – 408 с.
98. Циммерман, Р. Металлургия и материаловедение: Справочник / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – пер. с нем. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 480 с.
99. Шматов, А. А. Методы упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов / А. А. Шматов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – Т. 8. – С. 59-63.
100. Шубочкин, А. Е. Развитие и современное состояние вихретокового

метода неразрушающего контроля: монография / А. Е. Шубочкин. – Москва : Издательский дом “Спектр”, 2014. – 288 с.

101. Agletdinov, E. A New Method of Low Amplitude Signal Detection and Its Application in Acoustic Emission / E. Agletdinov, D. Merson, A. Vinogradov // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 73.

102. Blinc, R. Sustainable development and global security / R. Blinc, A. Zidansček, I. Šlaus // *Energy*. – 2007. – Vol. 32. – № 6. – P. 883-890.

103. Dunegan, H. Acoustic emission-a new nondestructive testing tool / H. Dunegan, D. Harris // *Ultrasonics*. – 1969. – Vol. 7. – № 3. – P. 160-166.

104. Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment / T. Okawa, H. Shimanuki, Y. Funatsu [et al.] // *Welding in the World*. – 2013. – Vol. 57. – № 2. – P. 235-241.

105. Effects of heat and vibration treatments for welding on residual stresses and mechanical properties / D. S. M. Serrati, R. M. Silva, J. G. G. Wiezel [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 128. – № 3-4. – P. 1473-1481.

106. Experimental and Numerical Simulation to Study the Reduction of Welding Residual Stress by Ultrasonic Impact Treatment / J. Chen, J. Chu, W. Jiang [et al.] // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – № 4. – P. 837.

107. **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.

108. Hadjipanayis, G. C. Nanophase hard magnets / G. C. Hadjipanayis // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1999. – Vol. 200. – № 1-3. – P. 373-391.

109. Heidrich, D. Fatigue Strength of Rivet Resistance Spot Welding Technique in Comparison with Self-Piercing Riveting for Multi-material Body-in-White Structure / D. Heidrich, F. Zhang, X. Fang // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – Vol. 30. – № 5. – P. 3806-3821.

110. Hobbacher, A. F. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components : IIW Collection / A. F. Hobbacher. – Cham : Springer International

Publishing, 2016.

111. Hrivňák, I. A review of the metallurgy of heat treatment of welded joints / I. Hrivňák // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 1985. – Vol. 20. – № 3. – P. 223-237.

112. Improving of Acoustic Emission Signal Detection for Fatigue Fracture Monitoring / A. Danyuk, I. Rastegaev, E. Pomponi [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 176. – P. 284-290.

113. Kang, H. T. Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments / H. T. Kang, Y.-L. Lee, X. J. Sun // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 497. – № 1-2. – P. 37-43.

114. Liu, J. Recent development of thermally assisted surface hardening techniques: A review / J. Liu, C. Ye, Y. Dong // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. – 2021. – Vol. 2. – P. 100006.

115. Magomedova, D. K. The dependence of mechanical properties of Al-6101 alloy on geometry of the samples with a groove during tensile tests / D. K. Magomedova, D. V. Gunderov, A. M. Mavlutov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1967. – № 1. – P. 012023.

116. 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.

117. Nitschke-Pagel, T. Application of the Local Fatigue Strength Concept for the Evaluation of Post Weld Treatments / T. Nitschke-Pagel, H. Wohlfahrt, K. Dilger // *Welding in the World*. – 2007. – Vol. 51. – № 11-12. – P. 65-75.

118. Parshukov, L. I. Electron beam bonding and local heat treatment welded seams from hot strength alloys / L. I. Parshukov, F. Z. Gilmutdinov // *Proceedings of VIAM*. – 2017. – Vol. 5. – № 5. – P. 3-3.

119. Priymak, E. Effect of Post-Weld Heat Treatment on The Mechanical Properties and Mechanism of Fracture of Joint Welds Made by Thompson Friction Welding / E. Priymak, A. Atamashkin, A. Stepanchukova // *Materials Today*:

Proceedings. – 2019. – Vol. 11. – P. 295-299.

120. 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.

121. RAVI, S. Influences of post weld heat treatment on fatigue life prediction of strength mis-matched HSLA steel welds / S. RAVI, V. BALASUBRAMANIAN, S. NEMATNASSER // International Journal of Fatigue. – 2005. – Vol. 27. – № 5. – P. 547-553.

122. Stepanova, L. N. Using Amplitude Analysis of Acoustic Emission Signals under Cyclic and Static Loading of Steel Samples / L. N. Stepanova, M. M. Kuten, A. L. Bobrov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57. – № 9. – P. 753-761.

123. The influence of heat treatment on the behavior of fatigue crack growth in welded joints made of S355 under bending loading / D. Rozumek, J. Lewandowski, G. Lesiuk, J. A. Correia // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 131. – P. 105328.

124. The physical and mechanical properties and local deformation micromechanisms in materials with different dependence of hardness on the depth of print / Y. I. Golovin, A. I. Tyurin, E. G. Aslanyan [et al.] // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59. – № 9. – P. 1803-1811.

125. Ultrasonic and eddy-current study of plastic deformation in austenitic-steel welds / A. V. Gonchar, O. N. Bizyaeva, V. A. Klyushnikov, V. V. Mishakin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52. – № 10. – P. 610-616.

126. Zaoui, M. Effect of heat treatments on the residual stresses in a welded joint / M. Zaoui, N. Menasri // World Journal of Engineering. – 2014. – Vol. 11. – № 2. – P. 117-122.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов исследования



Инженерно-экспертное предприятие - Акционерное общество «РАТТЕ» (АО «РАТТЕ») 199004, Санкт-Петербург, Проспект Средний В.О., дом 4, литер А, помещение 6Н, комната 42
 тел./факс (812) 645-40-97, (812) 645-40-99. e-mail: psm@mail.ru, psm@ratte.ru
 инн 7825662223 кпп 780101001 ОГРН 1037816026170 web: www.ratte.ru, www.ratte.spb

Лицензия Ростехнадзора на право проведения экспертизы промышленной безопасности технических устройств №00-ДЭ-001467

Утверждаю



Генеральный директор
 АО «РАТТЕ»

Бортяков Д.Е.

Дата « 12 » июня 2024 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
 кандидатской диссертации

Григорьева Егора Витальевича

по научной специальности

2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Рабочая комиссия АО «РАТТЕ» в составе:

Председатель: генеральный директор Бортяков Д.Е.;

Члены комиссии: начальник лаборатории НКиД, к.т.н. Грачев А.А., технический директор Плотников Г.В.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование метода контроля влияния упрочняющих обработок сварных соединений на основе результатов регистрации сигналов акустической эмиссии», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы и внедрены в производственной деятельности АО «РАТТЕ» при проведении промышленной экспертизы в виде рекомендаций по совершенствованию методов неразрушающего контроля металлоконструкций и проведения экспертизы промышленной безопасности технических объектов и устройств, выполняющих силовые функции.

Использование указанных результатов позволяет: оптимизировать производственные и ремонтные технологии; сократить затраты на проведение работ в 1,5 раза при проведении промышленной экспертизы технических объектов.

Председатель комиссии

Генеральный директор,
 к.т.н., доцент

Бортяков Д.Е.

Члены комиссии:

Начальник лаборатории НКиД, к.т.н.

Грачев А.А.

Технический директор

Плотников Г.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2775855

**СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩИХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Носов Виктор Владимирович (RU), Григорьев Егор
Витальевич (RU)*

Заявка № 2021134591

Приоритет изобретения **26 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **11 июля 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **26 ноября 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

