

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Ожиганов Евгений Анатольевич

**ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДЕГРАДАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ
УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель

Коновалов Сергей Валерьевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», проректор по научной и инновационной деятельности

Официальные оппоненты

Литовченко Игорь Юрьевич

доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией материаловедения сплавов с памятью формы, г. Томск.

Потекаев Александр Иванович

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры общей экспериментальной физики, г. Томск

Защита состоится «11» июня 2025 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «__» марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.03
доктор технических наук

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'G' followed by a horizontal stroke and a small loop.

Гынгазов С.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время несмотря на разработку и внедрение большого количества новых материалов, основными материалами, применяемыми в промышленности, остаются конструкционные углеродистые и низколегированные стали. Эксплуатация промышленного оборудования зачастую проходит в экстремальных условиях: при повышенных механических нагрузках, под воздействием агрессивных сред, коррозионного и эрозийного износа.

Надёжность и долговечность промышленного оборудования, изготовленного из конструкционных сталей, напрямую зависит от своевременности и качества проведения работ по оценке их состояния. Известно, что традиционные испытания не всегда способны выявить существующие повреждения металла и деградацию его свойств, что зачастую приводит к крупным авариям и разрушениям в процессе эксплуатации.

Кроме разрушающих и неразрушающих методов испытаний, для оценки состояния основного металла и сварных швов применяют «стресс-тест». В результате его должно происходить снижение локальных остаточных напряжений и деформаций, возникших при производстве и монтаже, локализация и торможение развития трещиноподобных дефектов, а также установление реального запаса прочности по отношению к рабочим нагрузкам. Однако, вопреки ряду исследований, вопрос обеспечения эффективности этих испытаний изучен недостаточно, а назначение величин испытательных нагрузок не учитывает множество факторов (структурное состояние основного и наплавленного металла, поля внутренних напряжений, влияние дефектов сварных соединений и др.) и эмпирично.

Для успешного выбора параметров испытаний конструкционных сталей, необходимо знание структурных и фазовых превращений в процессе их проведения. Таким образом, установление закономерностей изменения структурно-фазовых состояний и внутренних напряжений конструкционных сталей при деформации, актуально и имеет большое практическое значение.

Степень разработанности темы. Несмотря на немалое количество работ, таких ученых как: Н.П. Алёшин, С.А. Баранникова, А.А. Батаев, О.В. Башков, В.Е. Громов, В.И. Данилов, Р.И. Дмитриенко, В.Г. Дубинский, Л.Б. Зуев, В.И. Иванов, В.В. Ключев, Э.В. Козлов, Н.А. Конева, Л.С. Лившиц, Э.Л. Макаров, В.В. Муравьев, В.Е. Панин, Ю.Н. Сараев, Н.А. Семашко, И.В. Семенова, Н.Н. Сергеева, А.Н. Смирнов, А.Л. Углов, М.В. Чукчалов, М.Я. Шабанов, Л.В. Шашкова, В.Я. Шнеерсон и др., посвященных определению связей между деградацией структурно-фазового состояния и свойств металла от параметров внешних воздействий (в том числе процесса сварки), возможности применения акустических методов при для оценки изменений в структуре металла, анализу влияния параметров испытаний на механические и эксплуатационные характеристики сталей – отсутствуют обобщенные методики, позволяющие выбрать наиболее рациональные параметры испытаний и критерии оценки степени деградации металла.

Научный подход к решению проблемы испытаний требует исследования и определения количественных значений допустимо возможной степени деформации, а также оценки ее влияния на структуру и фазовый состав основного металла и сварного шва, а также характеристики акустической эмиссии. Особую практическую значимость имеет разработка методики проведения испытаний промышленного оборудования и критериев оценки состояния металла по результатам этих испытаний.

Цель работы – установление закономерностей деградации структурно-фазового состояния и механических свойств конструкционных сталей марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС при различных нагрузках и степенях упруго-пластической деформации.

Для достижения выбранной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) Исследовать структурно-фазовое и напряженно-деформированное состояние в наплавленном металле и зоне термического влияния при различных нагрузках (степенях упруго-пластической деформации), а также оценить влияние на них дефектов сварных соединений.
- 2) Установить зависимости степени упруго-пластической деформации на формирование структуры, фазового состава и полей внутренних напряжений исследуемых углеродистых и низколегированных сталей.
- 3) Оценить влияние степени деформации и дефектов сварных соединений на количественные и качественные изменения характеристик акустической эмиссии.
- 4) Обосновать величину предельных нагрузок (степени деформации) при проведении стресс-испытаний исследуемых углеродистых и низколегированных сталей.
- 5) Разработать критерий оценки степени деформации по изменениям характеристик сигнала акустической эмиссии при проведении стресс-испытаний, позволяющий анализировать деградацию механических свойств основного металла и сварных соединений трубопроводов при длительной эксплуатации.
- 6) Выполнить практическую апробацию результатов исследования.

Методология и методы исследования. Работа выполнена на основе физических методов материаловедения, разрушающих и неразрушающих испытаний: механические испытания по ГОСТ 6996-66 (на универсальной разрывной машине *Walter+Bai AG LFM-125*), регистрация акустико-эмиссионных сигналов (АЭ-система *A-Line 32D*), просвечивающая дифракционная электронная микроскопия на тонких фольгах (электронный микроскоп ЭМ-125), рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-7). Статистическая обработка результатов исследования проводилась в программах *Microsoft Office Excel* и *Statistica*.

Научная новизна:

- 1) Установлено количественное значение максимально допустимой степени деформации для сварных соединений, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС.
- 2) Установлено, что содержание в сварных швах искусственных дефектов (графитных и силикатных неметаллических включений) приводит к разрушению и

частичному исчезновению перлитной составляющей и увеличивает долю фрагментированной структуры в феррите, а также приводит к снижению величин значений структуры (ρ , $\rho_{\pm}$, σ_l , σ_d) во всех морфологических составляющих.

3) Установлена связь величин амплитуд полей внутренних напряжений в зоне линии сплавления с условиями введения тепловой энергии при сварке. Эти значения выше у сварных соединений, выполненных стационарной дугой, по сравнению со сваркой модулированным током.

4) Обоснованы величины предельных нагрузок при испытаниях тонкостенных и толстостенных трубопроводов.

5) Разработаны новый критерий оценки степени деформации по изменениям характеристик сигнала акустической эмиссии при проведении стресс-испытаний трубопроводов и новый метод оценки остаточного ресурса по фактору потери запаса прочности.

Теоретическая и практическая значимость работы. В результате анализа амплитуд полей внутренних напряжений, структуры и фазового состава в металле сварных соединений и параметров АЭ-сигнала установлены предельно допустимая степень деформации при проведении испытаний. Установлено влияния условий введения тепловой энергии при сварке и наличия дефектов на структуру и фазовый состав сварных соединений. Разработан метод определения предельной степени деформации при стресс-испытаниях сварных соединений, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей, основанный на цифровом анализе сигналов АЭ в режиме реального времени. Разработаны методические указания по проведению стресс-испытаний трубопроводов. Разработана методика расчета остаточного ресурса трубопровода по фактору потери запаса прочности. Предложенный метод проведения стресс-испытаний используется ЗАО «НТЦ «Экспертиза», ООО «Сибнефтьсервис».

Научные результаты работы используются студентами и магистрами, обучающимся по направлению «Машиностроение» в Кузбасском государственном техническом университете имени Т.Ф. Горбачева.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Характер влияния степеней пластической деформации углеродистых и низколегированных сталей марок Ст3сп, 10, 09Г2С, 17ГС при различных условиях введения тепловой энергии и наличия внутренних дефектов (неметаллических силикатных и графитных включений) сварки, на структуру и фазовый состав в наплавленном металле и зоне термического влияния, проявившийся в отличие величин полей внутренних напряжений (ручная дуговая сварка модулированным током формирует в зоне линии сплавления поля внутренних напряжений с амплитудами ниже, чем после ручной дуговой сварки стационарной дугой).

2) Зависимости, принятые в основу формулы определения предельного испытательного давления между нагрузками, соответствующими степени деформации 3% и нагрузками предела текучести, на основании которых рассчитан коэффициент превышения испытательного давления над пределом текучести. Применимость формул определения предельного испытательного давления для тонкостенных и толстостенных трубопроводов.

3) Критерий оценки предельной нагрузки при испытаниях, основанный на математическом анализе параметров АЭ-сигнала, для различных стадий деформационного упрочнения. Методологический подход к анализу причин возможных отклонений с уровнем критерия от соответствующего испытательного давления, а также комплекс мероприятий по подтверждению этих причин. Возможность определения остаточного ресурса сварных конструкций по фактору снижения запаса прочности, определяемого по критерию оценки предельной нагрузки.

Степень достоверности исследований и апробация работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач и обоснованным выбором материала; использованием научно-обоснованных расчетных схем, алгоритмов и процедур компьютерного анализа результатов; большого количества экспериментально полученных данных, с использованием современных методов физики конденсированного состояния, и отсутствие расхождений с результатами других исследователей; согласованностью полученных данных с общепризнанными теоретическими представлениями физики конденсированного состояния; результатами внедрения представленных методических решений в промышленность.

Материалы диссертационной работы докладывались на VI, VII и XIII Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых «Россия молодая» (Кемерово, 2014, 2015 и 2021), II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Перспективные материалы в технике и строительстве» (Томск, 2015), XIII и XIV Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2016-2017), III Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (Томск, 2016), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2016), Международной научно-практической конференции «Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий» (Новокузнецк, 2021), III Международная научно-практическая конференция «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (Кемерово, 2022).

Комплексные исследования проводились при частичной финансовой поддержке гранта РНФ «Разработка физических моделей превращения субструктур, изменения полей внутренних напряжений и акустических характеристик в сварных соединениях металлических материалов при длительных температурно-силовых воздействиях» (№14-19-00724).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 20 научных публикациях, в том числе в 8 изданиях ВАК РФ и 2 журналах, индексируемых базой *Scopus* и *Web of Science*, а также 1 монографии.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, методам исследования, научной новизне и содержанию соответствует, п. 1 «Экспериментальное изучение физической

природы и свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твердом (кристаллы, поликристаллы), так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» и п. 7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния» паспорта специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (технические науки).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка литературы из 195 источника. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, включает 28 рисунков и 9 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость, приведены результаты и апробация работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава «Анализ процессов деградации структуры и свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей» является обзорной. В ней проведен обзор физических процессов, происходящих в сталях при сварке, эксплуатационные воздействия, влияющие на изменение структуры и деградацию свойств металла. Дан анализ эффективности действующих методов испытаний состояния промышленного оборудования. На основании выводов проведенного обзора и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе «Методика испытаний и исследования» описан комплекс методик проведения исследований: параметров АЭ, микроструктуры металла, а также амплитуд полей внутренних напряжений при испытаниях с различными степенями деформации и способами сварки при наличии (отсутствии) искусственных дефектов.

Для экспериментов были выбраны стали марок: СтЗсп (ГОСТ 380-2005), 10 (ГОСТ 1050-2013), 09Г2С и 17ГС (ГОСТ 19282-2014). Эти стали были выбраны из-за того, что в настоящее время большая часть металлоконструкций в промышленности изготовлены из углеродистых и низколегированных сталей. Влияние модуляции тока на амплитуду внутренних напряжений и структурно-фазовое состояние оценивали сравнением результатов исследований образцов выполненных: ручной дуговой сваркой (РДС) и сваркой модулированным током (РДСМТ). Для имитации условий реальных производственных объектов, а также исследования влияния макродефектов сварных соединений на параметры АЭ, микроструктуру и поля внутренних напряжений при испытаниях с различными степенями деформации, часть образцов изготавливали с искусственными дефектами (неметаллические включения).

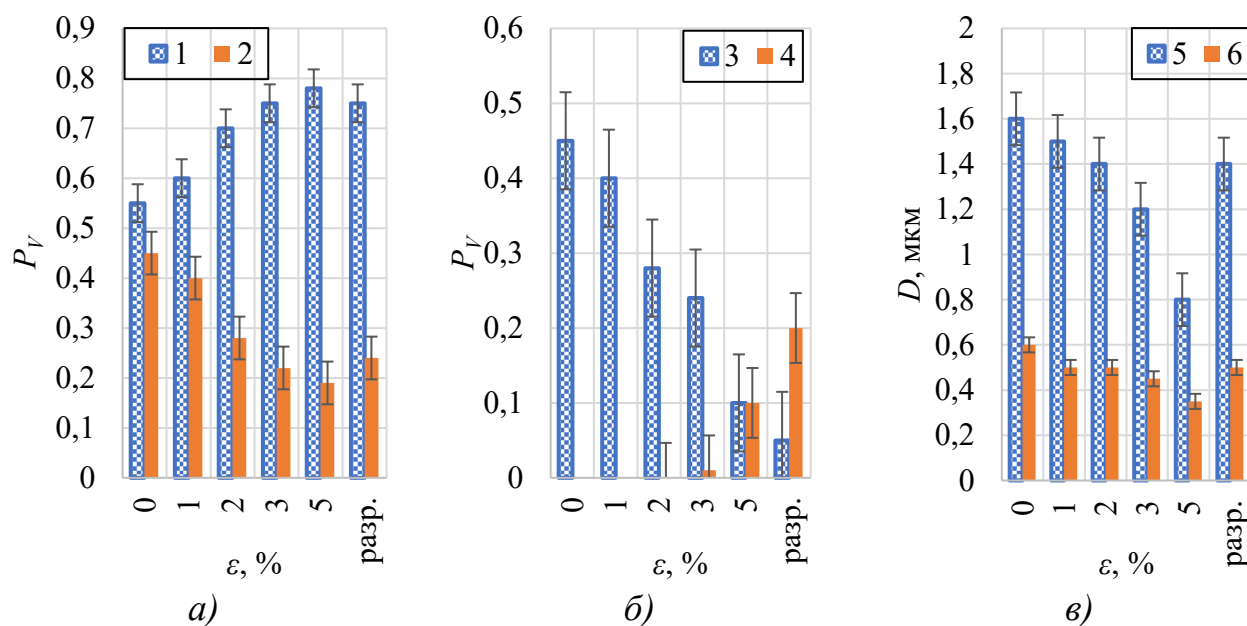
Для исследования динамики накоплений микроповреждений в основном и наплавленном металле, их локализации и анализа, в процессе пластической деформации производилась регистрация сигналов АЭ. Готовые образцы подвергали пластической деформации (одноосному растяжению) с различной степенью – 1, 2, 3, 5%, и разрушению.

Изучение структуры и фазового состава проводилось методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии на тонких фольгах.

Все полученные данные, на каждом из этапов исследования, подвергались статистическому анализу.

В третьей главе «Исследование структуры основного металла и сварных соединений, характеристик сигналов акустической эмиссии после различных степеней деформации углеродистых и низколегированных сталей» приведены результаты исследования микроструктуры, фазового состава и локальных полей внутренних напряжений основного и наплавленного металла после проведения испытаний образцов различной степени упруго-пластической деформации ε (1, 2, 3, 5% и разрушения), а также характеристики изменения АЭ-сигнала в процессе деформации.

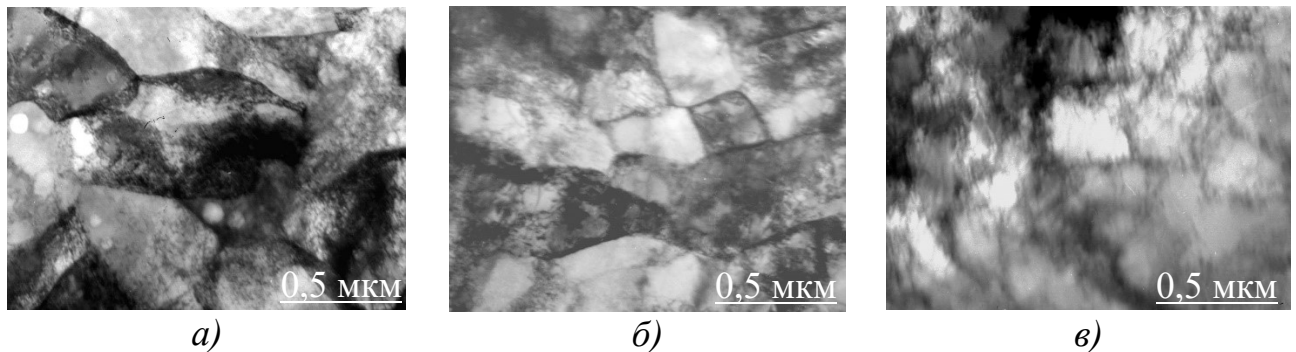
По мере увеличения степени упруго-пластической деформации ε (рисунок 1) объемная доля ферритной составляющей матрицы увеличивается, а перлитной убывает. Совершенный пластинчатый перлит постепенно заменяется на разрушенный. Средний размер фрагментов в зернах феррита убывает (рисунок 2), причем продольный размер фрагментов уменьшается более интенсивно, чем поперечный.



а) объемная доля зерен феррита (1) и перлита (2); б) объемная доля зерен пластинчатого неразрушенного (3) и разрушенного (4) перлита; в) средний продольный (5) и средний поперечный (6) размер фрагментов феррита
Рисунок 1 – Изменение объемных долей P_V (а-б) и среднего размера фрагментов феррита D (в) от степени пластической деформации ε в основном металле сварного шва стали марки СтЗсп.

По мере увеличения деформации ($\varepsilon = 0 \div 5\%$) средняя величина скалярной плотности дислокаций ρ возрастает незначительно. Более интенсивно происходит увеличение избыточной плотности дислокаций $\rho_{\pm}$. В ферритных зернах поведение ρ и $\rho_{\pm}$ такое же, как и в среднем по материалу. Объемная доля ферритных зерен уже

в исходном состоянии металла значительно превышает объемную долю перлитных зерен, а с увеличением ε феррита становится все больше. Поэтому величина и поведение ρ и $\rho_{\pm}$ в материале в целом определяется ферритной составляющей матрицы.



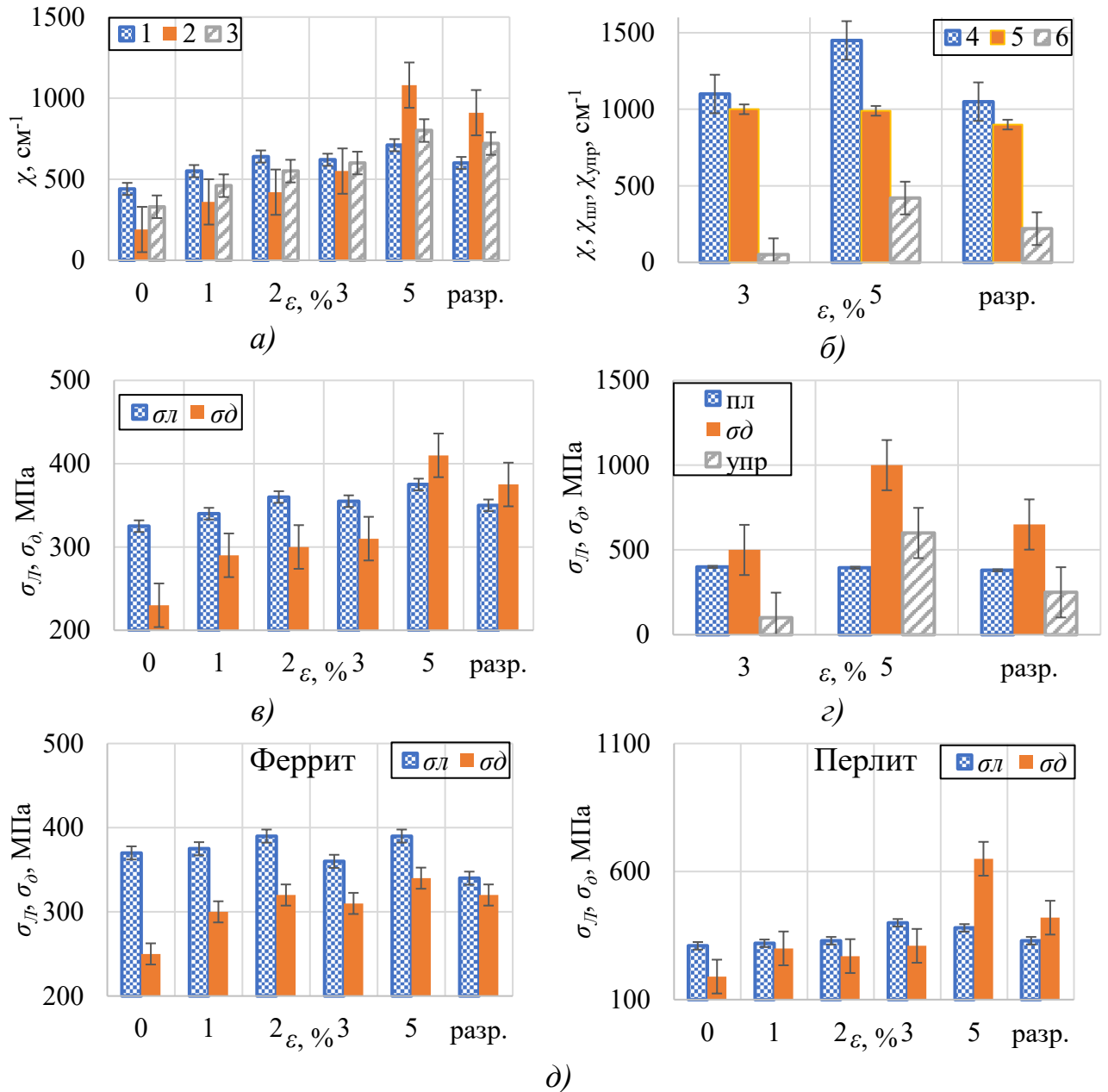
a) $\varepsilon = 0$; *б)* $\varepsilon = 5\%$; *в)* $\varepsilon = 12\%$.

Рисунок 2 – Фрагментированная субструктура в металле шва. Электронно-микроскопическое изображение. Сталь марки 09Г2С

В исходном состоянии величины ρ и $\rho_{\pm}$ в перлитной составляющей матрицы ниже, чем в ферритной. Однако уже на начальном этапе деформации ($\varepsilon \leq 1\%$) наблюдается их увеличение. В интервале $\varepsilon = 1 \div 3\%$, величина ρ практически не изменяется, а величина $\rho_{\pm}$ продолжает возрастать, приближаясь к значению ρ . Дальнейшее увеличение деформации ($\varepsilon = 3 \div 5\%$) приводит к интенсивному увеличению ρ и $\rho_{\pm}$, эти параметры, становятся выше, чем в ферритных зернах, и практически сравниваются. Дислокационная структура в перлитной составляющей при $\varepsilon = 5\%$ практически полностью поляризована, т.е. практически все дислокации являются избыточными.

Доля разрушенного перлита возрастает до разрушения образца. Величина скалярной плотности дислокаций ρ в разрушенном перлите максимальна и превышает среднее значение по материалу. Избыточная плотность дислокаций $\rho_{\pm}$, определенная из ширины экстинкционных контуров, равна скалярной ($\rho = \rho_{\pm}$). Это означает, что в разрушенном перлите дислокационная структура полностью поляризована, и в этих местах материала имеет место упруго-пластический изгиб кристаллической решетки. Именно в таких местах наиболее вероятно зарождение разрушения.

Величина амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки χ (рисунок 3, *a*) в исходном состоянии ($\varepsilon = 0$) в зернах феррита выше, чем в зернах перлита. При $\varepsilon = 3\%$ их величины практически сравниваются. При увеличении ε до 5% в перлите величина χ быстро увеличивается, в то время как в феррите она изменяется слабо. То есть воздействие деформации при $\varepsilon < 3\%$ на, находившихся в более напряженном состоянии (при $\varepsilon = 0$), ферритные зерна приводит к выравниванию внутренних напряжений по всему образцу, а при увеличении $\varepsilon > 3\%$ более напряженными оказываются зерна перлита.



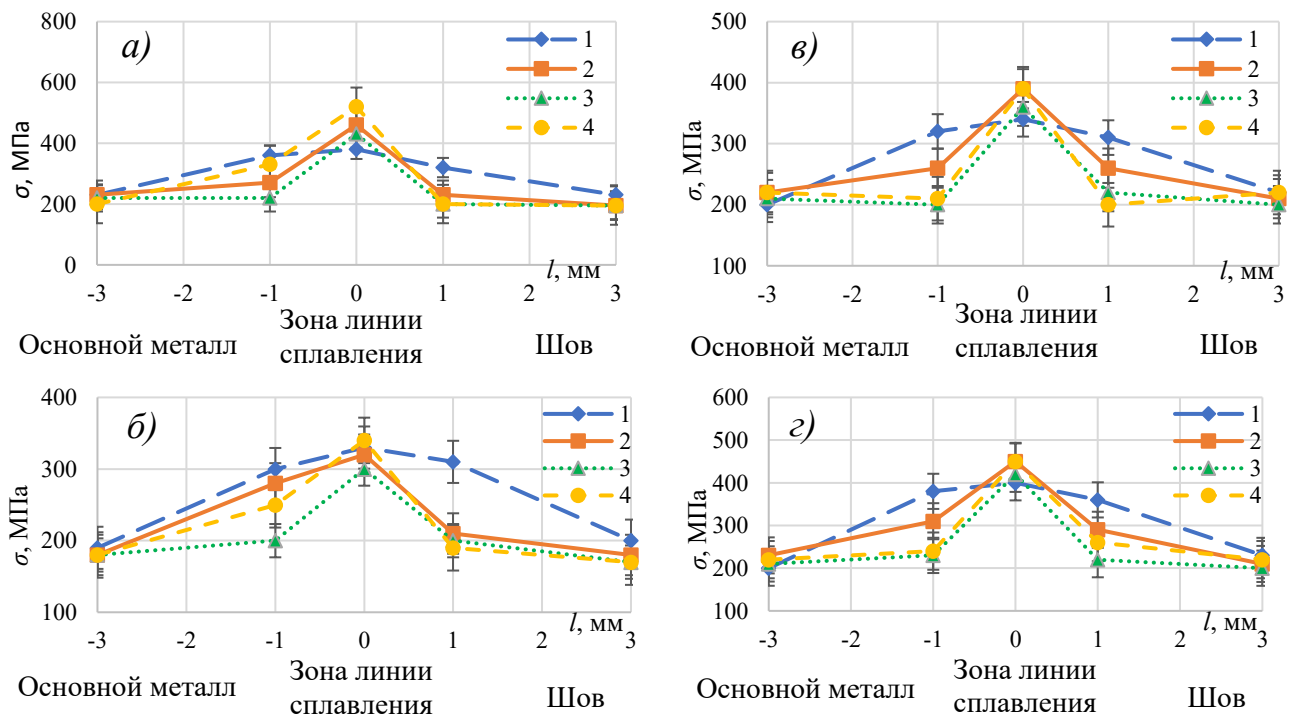
а) амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки χ в феррите (1), перлите (2), и в среднем по материалу (3); б) амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки χ в разрушенном перлите (4) и в его составляющих (5 – пластической и 6 – упругой); в) средние значения внутренних напряжений по материалу напряжения сдвига σ_l и локальных напряжений σ_d ; г) пластическая и упругая составляющие σ_d в разрушенном перлите; д) внутренние напряжения в морфологических составляющих перлита и феррита.

Рисунок 3 – Влияние степени пластической деформации ε основном металле сварного шва стали марки СтЗсп на величину амплитуды кривизны-кручения кристаллической решетки и внутренние напряжения.

Средняя величина упругой составляющей $\chi_{\text{упр}}$ амплитуды кривизны-кручения в разрушенном перлите (рисунок 3, б) в момент её образования небольшая, а интенсивность изменения её величины, по мере увеличения ε , такая же, как среднего значения χ в разрушенном перлите. Величина пластической

составляющей $\chi_{пл}$ при разных степенях ε в 2,5÷5 раз больше $\chi_{упр}$. Интенсивность изменения этой величины по мере увеличения степени пластической деформации ε в пределах существования структуры разрушенного перлита изменяется слабо, но имеет значение, превышающее среднее значение χ по всему материалу. Хотя объемная доля разрушенного перлита невелика и вклад в материал она оказывает небольшой, но именно в таких участках начинается разрушение.

Средняя по материалу амплитуда напряжений сдвига σ_l слабо изменяется при увеличении ε . При $\varepsilon < 3\%$ амплитуда моментных (локальных) напряжений σ_∂ увеличивается, оставаясь ниже σ_l . При $\varepsilon = 3\%$, когда в матрице основного металла образуется разрушенный перлит, величина σ_∂ интенсивно увеличивается, и вплоть до разрушения становится и остается $\sigma_\partial > \sigma_l$. В зернах феррита средние величины σ_l и σ_∂ слабо зависят от степени пластической деформации, но всегда сохраняется $\sigma_l > \sigma_\partial$ (рисунок 3, д); в зернах перлита происходят более заметные изменения в поведении σ_l и σ_∂ . При деформации $\varepsilon < 3\%$, когда пластинчатый перлит еще не разрушается, внутренние напряжения возрастают с одинаковой скоростью, однако величина σ_l все время выше, чем σ_∂ . В интервале деформации $\varepsilon = 3\div 5\%$, когда уже интенсивно разрушаются пластины цементита в перлите, σ_∂ резко возрастает и становится больше величины σ_l (рисунок 3, д). В неразрушенном перлите σ_l и σ_∂ слабо зависят от степени пластической деформации, а их величины практически одинаковы (рисунок 3, д). Основной вклад в величину σ_l в разрушенном перлите вносит упругая составляющая (рисунок 3, з), причем по мере увеличения степени пластической деформации этот вклад становится все более значителен.



1 – напряжения сдвига во фрагментированном феррите; 2 – моментные (локальные) напряжения во фрагментированном феррите; 3 – моментные (локальные) напряжения в распавшемся перлите; 4 – напряжения сдвига в распавшемся перлите
Рисунок 4 – Распределение внутренних напряжений по ширине сварного шва при РДС для сталей марок СтЗсп (а), 10 (б), 09Г2С (в), 17ГС (г)

Влияние РДС на структурно-фазовое состояние ЗТВ сварных соединений. В зоне линии сплавления значительно возрастают амплитуды локальных напряжений σ_d (рисунок 4). Имеет место упругопластический изгиб, в то время как на расстоянии 1,0 мм от линии сплавления изгиб кристаллической решетки был чисто пластическим.

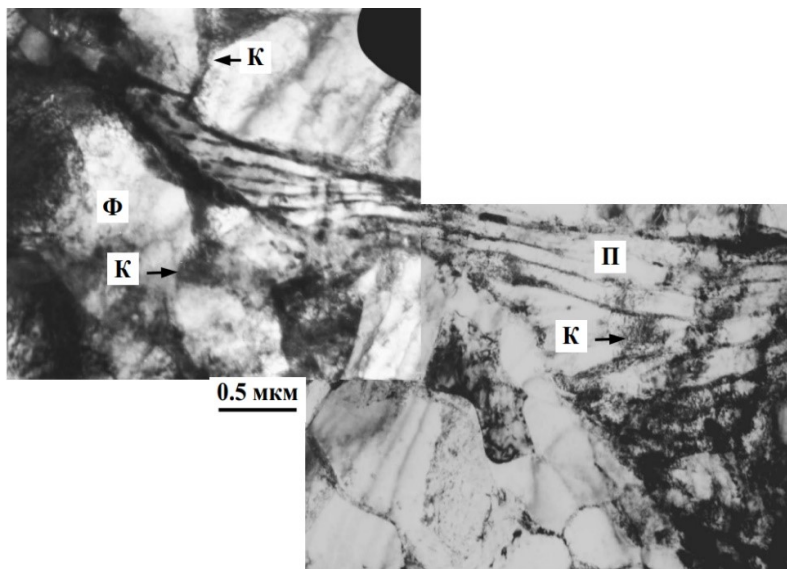


Рисунок 5 – Микроструктура металла стали марки СтЗсп в ЗТВ на расстоянии 1,0 мм от границы шва. РДС. Ф – зерно феррита, П – перлита, К – изгибный экстинкционный контур.

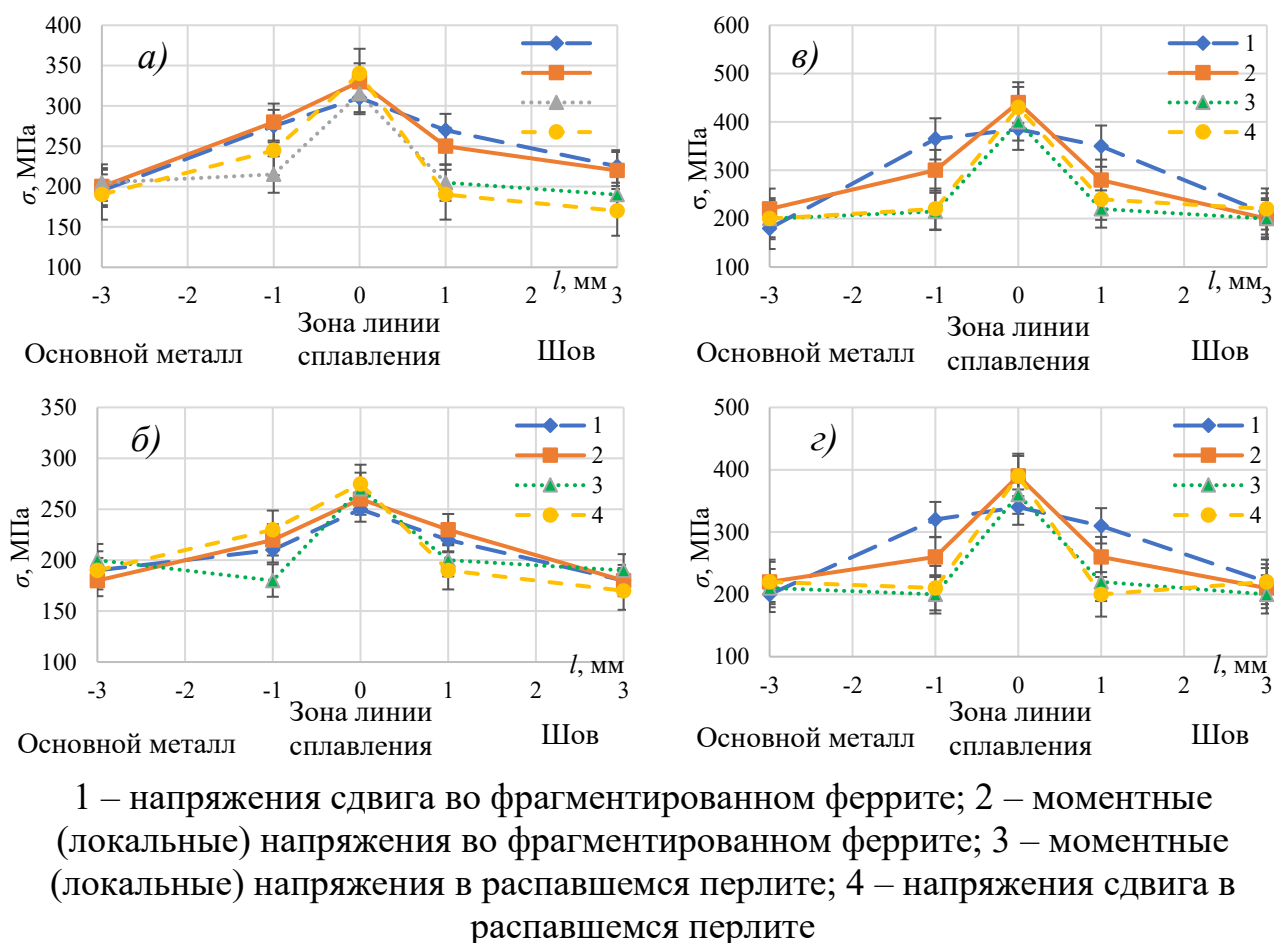


Рисунок 6 – Распределение внутренних напряжений по ширине сварного шва при РДСМТ для сталей марок СтЗсп (а), 10 (б), 09Г2С (в), 17ГС (г)

Чем ближе матрица основного металла находится к линии сплавления, тем более напряженным становится ее состояние: скалярная плотность дислокаций возрастает, появляется упругая составляющая в изгибе кристаллической решетки, и амплитуда дальнедействующих напряжений σ_0 начинает превышать напряжение сдвига σ_d .

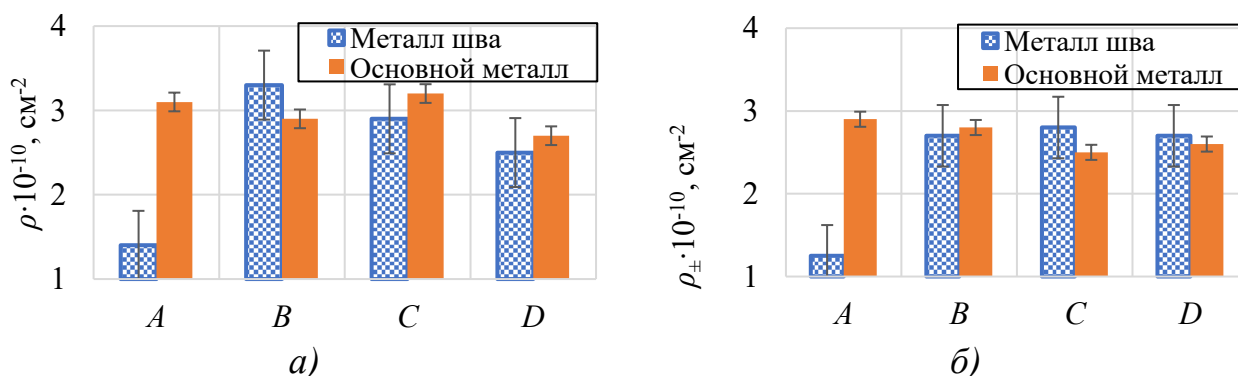
Дислокационная структура во всех морфологических составляющих материала шва в основном представлена плотными дислокационными сетками. В перлите величины напряжений сдвига и локальных напряжений небольшие и практически одинаковые.

Структура металла в зоне термического влияния при РДСМТ практически такая же, как и после РДС. Перлит пластинчатый. По мере приближения к линии сплавления (1,0 мм) появляются перлитные зерна с поврежденным перлитом (рисунок 5). Распределение амплитуд внутренних напряжений по ширине сварного шва при РДСМТ изображены на рисунке 6.

В зоне линии сплавления характер структуры существенно иной. В структуре перлита, как и при РДС, происходит разрушение цементитных пластин до отдельных частиц наноразмерной величины. Доля неразрушенного пластинчатого перлита составляет 75÷85%, что значительно больше, чем после ручной дуговой сварки. Существенно возрастает скалярная плотность дислокаций. В зоне линии сплавления имеет место упругопластический изгиб.

Введение искусственных дефектов при РДС приводит к тому, что в структуре основного металла объемная доля нефрагментированного феррита уменьшается. Перлит отсутствует полностью. В структуре материала шва присутствует фрагментированный феррит и мартенсит.

Введение искусственных дефектов при РДСМТ в структуре основного металла присутствует доля нефрагментированного феррита по сравнению с РДС уменьшается до 15%, а фрагментированного – увеличивается до 85%. В структуре материала шва введение искусственных дефектов также уменьшает объемную долю феррита (как фрагментированного – 55%, так и нефрагментированного – 15%) и увеличивает долю пластинчатого перлита (неразрушенного – 10%, разрушенного – 10%) и мартенсита.

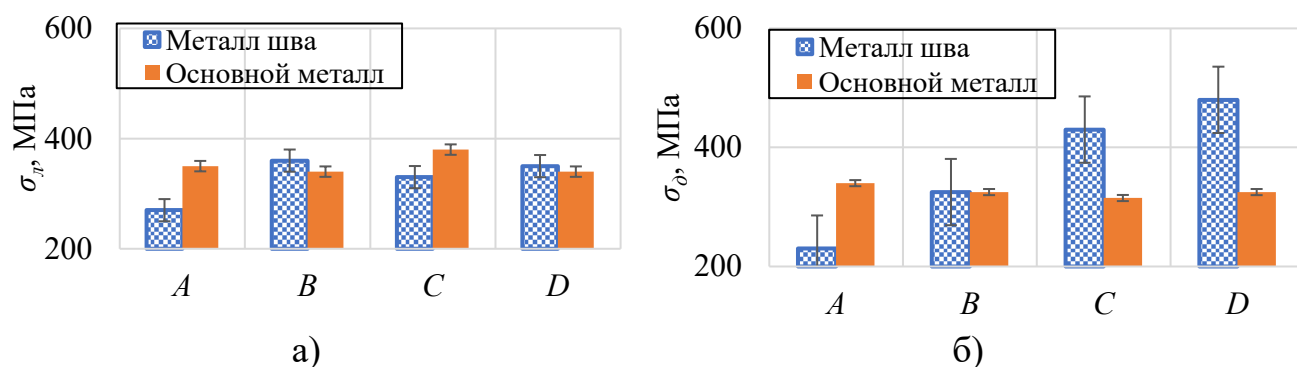


А – РДС; В – РДС с введением искусственных дефектов; С – РДСМТ; D – РДСМТ с введением искусственных дефектов.

Рисунок 7 – Влияние искусственных дефектов на средние по материалу скалярную (а) и избыточную (б) плотность дислокаций.

Введение в металл шва искусственных дефектов при РДС приводит к резкому увеличению ρ (рисунок 7). В основном металле величина средней плотности дислокации слабо зависит от способа сварки.

Дислокационная структура при всех способах сварки как в основном металле, так и в металле шва поляризована. Об этом свидетельствует присутствие в структуре изгибных экстинкционных контуров.



А – РДС; В – РДС с введением искусственных дефектов; С – РДСМТ; D – РДСМТ с введением искусственных дефектов.

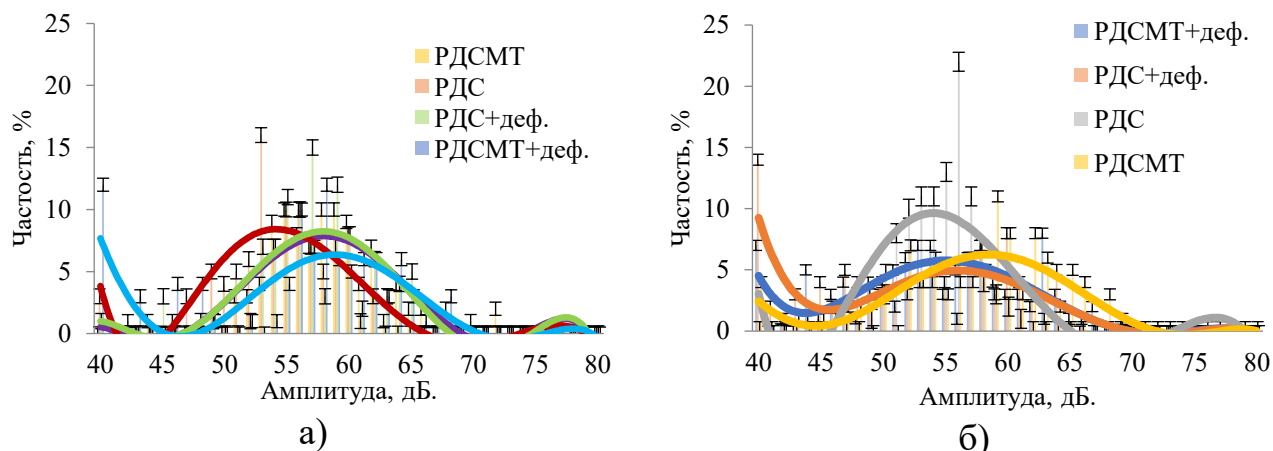
Рисунок 8 – Влияние искусственных дефектов на среднюю по амплитуду внутренних напряжений сдвига σ_l (а) и далекодействующих напряжений σ_d (б).

В металле шва при сварке способами РДС и РДС с введением искусственных дефектов (рисунки 7 и 8) $\rho > \rho_{\pm}$ и $\sigma_l > \sigma_d$, то есть изгиб кристаллической решетки носит пластический характер. При РДСМТ и РДСМТ с введением искусственных дефектов $\rho < \rho_{\pm}$ и $\sigma_l < \sigma_d$, это означает, что изгиб кристаллической решетки при данных методах сварки является упругопластическим. Структура стали после РДС характеризуется самыми низкими значениями ρ , $\rho_{\pm}$, σ_l и σ_d . Это приведет к самому низкому вкладу в упрочнение на пределе текучести материала шва по сравнению с другими способами сварки. Введение искусственных дефектов при РДС увеличивает все количественные параметры структуры (ρ , $\rho_{\pm}$, σ_l и σ_d).

В основном металле независимо от способа сварки скалярная плотность дислокаций ρ больше избыточной $\rho_{\pm}$ и амплитуда напряжений сдвига σ_l превышает амплитуду внутренних далекодействующих напряжений σ_d , то есть при всех способах сварки изгиб кристаллической решетки носит пластический характер.

Аппроксимация амплитудных распределений импульсов АЭ для малых значений $\varepsilon \leq 2\%$ показывает соответствие зарождению и распространению полос Чернова-Людерса, а для значений $\varepsilon > 2\%$ отвечает деформационному упрочнению. В бездефектных образцах выполненных РДС, деформированных до 2%, зарегистрированы низкоамплитудные импульсы (55 дБ), у образцов, сваренных РДСМТ амплитуда значительно больше (на 4 дБ) (рисунок 9, а). В образцах с дефектами амплитуды одинаковы (57 дБ). При деформации $\varepsilon > 2\%$, у бездефектных образцов выполненных РДС амплитуда достигает 54 дБ, то есть практически такая же, как и $\varepsilon \leq 2\%$. При общей деформации $\varepsilon > 2\%$ наибольшая амплитуда (рисунок 9, б) зафиксирована у образцов, сваренных РДСМТ (57 дБ). У образцов с дефектами амплитуды сигналов АЭ близки по величине (54-55 дБ), но дисперсия амплитуд

сигналов больше, чем у дефектных образцов, деформированных $\varepsilon \leq 2\%$. Данный факт указывает на увеличение числа различных низкоэнергетических источников АЭ.



а) до 2%; б) - свыше 2%.

Рисунок 9 – Аппроксимация распределений величин амплитуды сигналов АЭ при деформации ε .

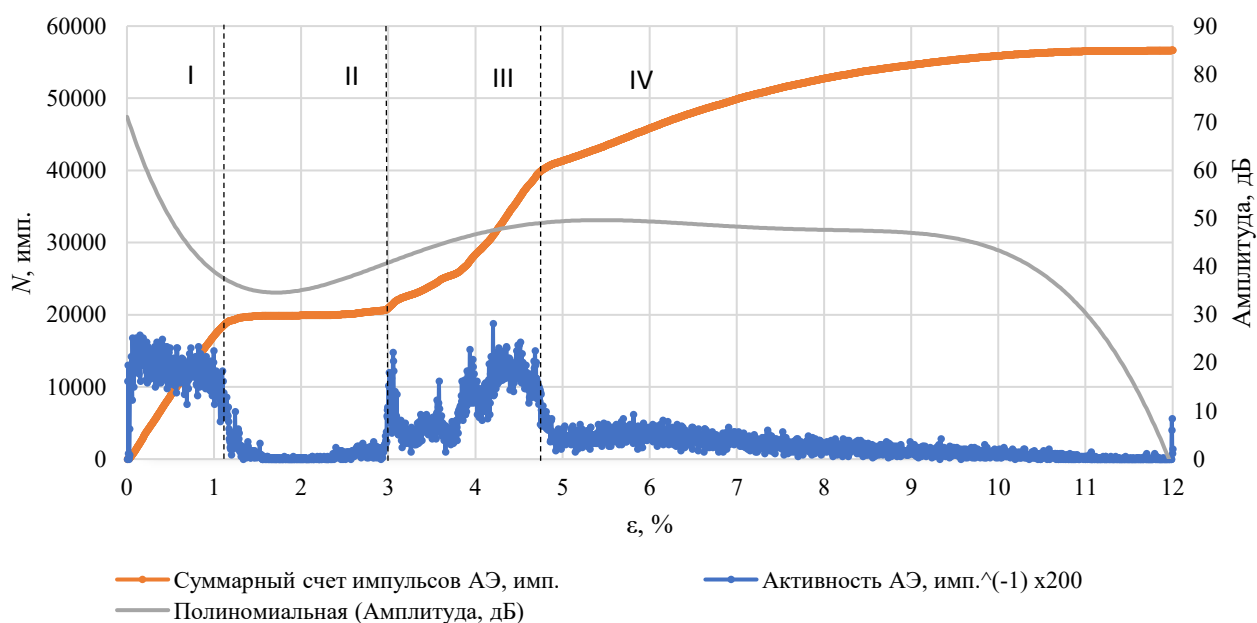
При изменении степени деформации большая часть источников сигналов АЭ сконцентрирована по краям образца, около мест крепления, в области наибольшей концентрации напряжений. С увеличением нагрузки, при локализации по разности времен прихода (РВП) АЭ-сигнала, количество этих сигналов растет. После преодоления площадки текучести, на стадии деформационного упрочнения сигналы АЭ начинают фиксироваться в ЗТВ, то есть в зоне будущего разрушения. На этапе текучести ($\varepsilon = 2 \div 3\%$) приращения количества источников сигналов АЭ на диаграмме локаций практически не происходит. Малое количество слоцированных по РВП импульсов при разрушении образца объясняется общим снижением активности АЭ (рисунок 10) на стадии параболического упрочнения.

При локализации по затуханию амплитуды АЭ картина немного отличается: с увеличением нагрузки, амплитуда АЭ сигналов увеличивается, на этапе текучести (как и при локализации по РВП) увеличение амплитуды сигнала незначительно. Однако, в местах крепления зажимов приращение амплитуды АЭ сигналов под действием нагрузки изменяется мало. На этапе разрушения значения амплитуды максимально.

В четвертой главе «Моделирование критерия и величины предельной степени деформации углеродистых и низколегированных сталей» проведен анализ влияния упруго-пластических деформаций на качественные характеристики АЭ, разработан критерий определения критической нагрузки при проведении СИ по изменениям этих характеристик, определено предельное давление СИ трубопроводов.

Сигнал АЭ является отображением процесса разрушения не только макро- (образование и развитие трещин), но и микроуровня (образование, движение и аннигиляция дислокаций). Активность АЭ напрямую связана с характером пластической деформации, резкое изменение активности АЭ при увеличении деформации, свидетельствует об изменении механизма деформации. Анализ

кривых изменения параметров АЭ при деформации исследуемых образцов (рисунок 10), которые являются типовыми для углеродистых конструкционных сталей, показал определенные закономерности.



I – этап макроупругих деформаций; II – этап легкого скольжения (текучести);
III – этап линейного упрочнения; IV – этап параболического упрочнения

Рисунок 10 – Изменение АЭ характеристик при нагружении образцов из стали 09Г2С, выполненных РДСМТ до разрушения.

Регистрация АЭ в области упругих деформаций (рисунок 10, область I), объясняется появлением в материале пластически деформируемых микрообъемов уже при низкой нагрузке. Данный этап характеризуется возрастанием суммарного счета, высокой активностью АЭ и убыванием (возрастанием) амплитуды сигнала при постоянной скорости деформации.

Резкое изменение кривой N с увеличением нагрузки и снижение значений амплитуды, говорит о смене механизмов деформации стали от упругих к пластическим. По достижении предела упругости, происходит спад активности АЭ. Данный этап характеризуется снижением роста числа импульсов, снижением активности АЭ и убыванием амплитуды сигнала при постоянной скорости деформации.

По достижению площадки текучести (стадии легкого скольжения) из-за отсутствия активности АЭ, суммарный счет практически не увеличивается, средняя амплитуда сигнала имеет минимальные значения. По окончании площадки текучести начинают увеличиваться активность АЭ сигналов, суммарный счет и амплитуда.

После прохождения площадки текучести, начинается участок линейного упрочнения (рисунок 10, III). Этот участок характеризуется ростом суммарного счета и амплитуды сигнала, а также скачками активности сигнала АЭ.

Переход от линейного к параболическому упрочнению характеризуется максимальной (на этих двух этапах) амплитудой сигнала, снижением активности и

суммарного счета импульсов АЭ. На этапе параболического упрочнения происходит плавное снижение активности, амплитуды и суммарного счета импульсов АЭ сигнала, вплоть до разрушения образцов.

Полученные зависимости справедливы для упруго-пластического растяжения образцов из исследуемых углеродистых конструкционных сталей. Эти зависимости отражают стадийность процесса деформации через изменения параметров АЭ сигнала. На основе математических закономерностей изменения параметров АЭ сигнала, для исследуемых марок сталей, разработан четырехпараметрический трехуровневый критерий определения стадии пластической деформации по параметрам АЭ сигнала (таблица 1). Данный критерий позволяет качественно оценить степень пластической деформации при стресс-испытаниях трубопроводов (по всей области локации АЭ), что особенно важно для труб с различным утонением стенки.

Каждый из параметров (активность, амплитуда и суммарный счет, а также производные от них) является легко вычисляемым современными программно-аналитическими средствами характеристикой. После вычисления эти параметры группируются и логически соотносятся к тому или иному уровню критерия.

Уровню *A* критерия, соответствует деформациям начала перехода к этапу лёгкому скольжению (предел текучести). Данный уровень является предварительным, и сигнализирует нам о скором достижении заданной нагрузки при СИ. Уровню *B* критерия, соответствует деформациям площадки текучести. Данный уровень, показывает достижение заданного уровня нагрузки при СИ. Уровню *C* критерия, соответствует деформациям перехода от легкого скольжения к линейному упрочнению. При достижении данного уровня, необходимо немедленно остановить испытания и сбросить давление, поскольку испытательное давление превышает заданное.

Таблица – 1

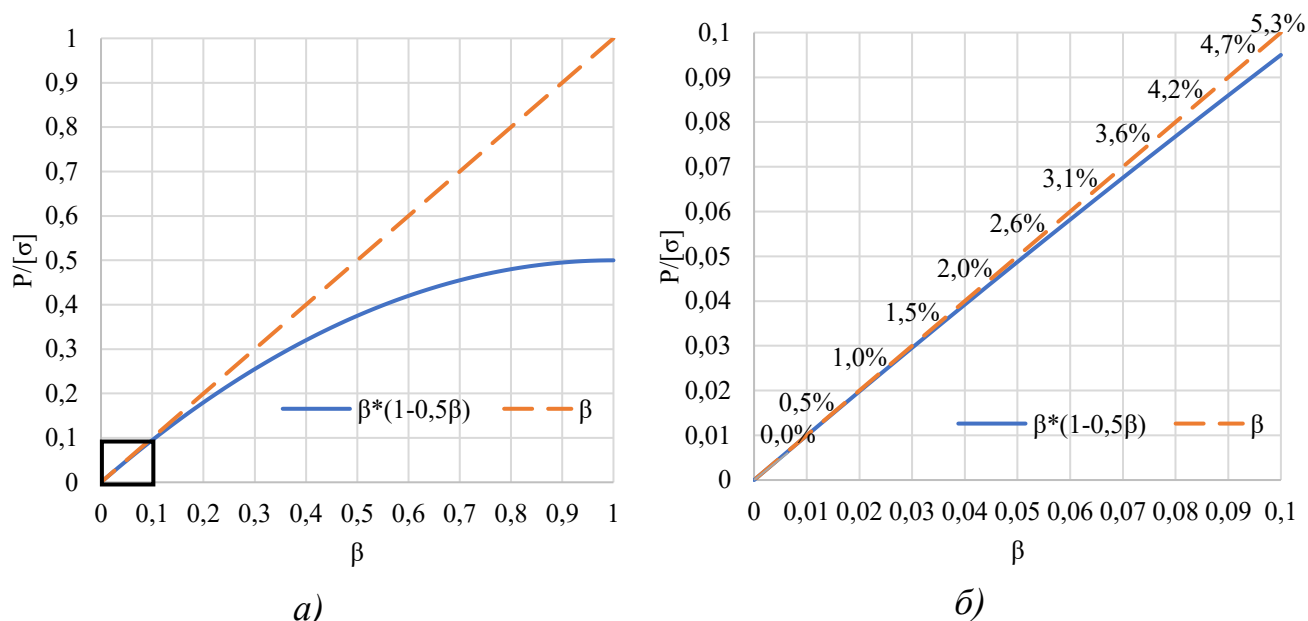
Критерий определения стадии пластической деформации по параметрам АЭ сигнала

Уровень критерия	Стадия пластической деформации	Параметры АЭ сигнала				Необходимые условия
		$N''(\varepsilon)$	$\bar{U}'(\varepsilon)$	$\bar{U}''(\varepsilon)$	$\frac{\dot{N}_{\Sigma i+1}}{\dot{N}_{\Sigma i}}$	
<i>A</i>	Предел текучести (I→II)	< 0		-	≤ 1	$\varepsilon > 0$ $\dot{\varepsilon} = const > 0$
<i>B</i>	Площадка текучести (II)	0		> 0	1	
<i>C</i>	Переход к линейному упрочнению (II→III)	> 0		-	> 1	

где, N – суммарный счет импульсов АЭ, имп.; $\dot{N}_{\Sigma}$ – активность акустической эмиссии, имп.; $\bar{U}$ – средняя квадратическая амплитуда АЭ сигнала, дБ; $\dot{\varepsilon} = \varepsilon'(t)$ – скорость деформации, с⁻¹.

Необходимыми условиями при реализации данного критерия на практике являются испытания растяжением (для трубопроводов – внутренним давлением), с постоянной скоростью нагружения (деформации). Параметр второй производной

от амплитуды $\bar{U}''(\varepsilon)$ является дополнительным и служит для повышения точности критерия, поскольку вычисляем только на площадке текучести.



а) по всем толщинам; б) процентное, на участке малых толщин $\beta \leq 0,1$
 Рисунок 11 – Расхождение формул испытательного давления для тонкостенных (прерывистая линия) и толстостенных (сплошная линия) трубопроводов.

Получены корреляционные зависимости между нагрузками соответствующим степени деформации 3% и нагрузками предела текучести. На основании этих зависимостей рассчитан коэффициент превышения испытательного давления над пределом текучести при проведении стресс-испытаний, равный 1,06.

Проанализирована сходимость формул определения испытательного давления для тонкостенных и толстостенных трубопроводов (рисунок 11). Применение формулы Барлоу обосновано при соотношении толщины стенки к наружному радиусу трубопровода β не более 0,05, при этом погрешность расчета испытательного давления будет компенсироваться погрешностями средств измерения давления, а также от девиаций пластических свойств металла.

Рассчитана формула, предельного испытательного давления трубопроводов из исследованных углеродистых и низколегированных сталей марок СтЗсп, 10, 09Г2С и 17ГС:

$$P_{\text{СИ}} \leq 1,06\sigma_{\text{т}}\beta \cdot \begin{cases} 1, & \text{при } \beta \leq 0,05; \\ (1 - 0,5\beta), & \text{при } \beta > 0,05. \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести, МПа; β – коэффициент отношения толщины стенки s к наружному радиусу R трубопровода, $0 < \beta < 1$.

В пятой главе «Применение результатов диссертационного исследования для диагностики сварных швов и основного металла трубопроводов» приведена статистика аварий промышленного оборудования, разработаны методические рекомендации по проведению стресс-испытаний трубопроводов, разработана

методика расчета остаточного ресурса оборудования по фактору потери запаса прочности, а также опыт проведения стресс-испытаний трубопровода на ОПО.

Проведена апробация результатов настоящей работы на трубопроводе азота ООО ПО «ТОКЕМ», участке теплотрассы г. Ленинск-Кузнецкого ЗАО «НТЦ «Экспертиза», технологических трубопроводов Анжерской нефтегазовой компании ООО «Сибнефтьсервис». Результаты работы использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева».

В заключении перечислены основные результаты работы.

В приложениях приведены справки об использовании и апробации результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что морфологическими составляющими в исследуемых сталях (марок СтЗсп, 10, 09Г2С, 17ГС) независимо от способа сварки в структуре основного металла являются пластинчатый перлит и феррит, в структуре металла шва пластинчатый перлит, феррит и мартенсит; их объемная доля зависит от способа сварки.
2. В тонкой структуре зоны термического влияния сварки, у линии сплавления и в сварном шве выявлены изгибные экстинкционные контуры, свидетельствующие о наличии внутренних напряжений, причем число контуров возрастает по мере приближения к линии сплавления. Сварка модулированным током углеродистых сталей формирует в зоне линии сплавления поля внутренних напряжений с амплитудами ниже, чем после сварки стационарной дугой, что способствует повышению качества сварных соединений, выполняемых этим способом в сложных условиях.
3. Установлено, что в исследованных способах сварки изгиб-кручение кристаллической решетки основного металла и в металле шва при сварке стационарной дугой (в том числе с искусственными дефектами) носит пластический характер, а при сварке модулированным током (в том числе с искусственными дефектами) – упруго-пластический, что является основным различием в структуре основного металла и металла шва. Введение искусственных дефектов (неметаллические силикатные и графитные включения) в структуре основного металла приводит к разрушению и исчезновению перлитной составляющей, в структуре металла шва – уменьшает объемную долю феррита и увеличивает долю перлита.
4. Зона ожидаемого разрушения образцов: по разности времен прихода сигналов акустической эмиссии, выявляется только, когда степень общей деформации более 3%, однако на этапе предразрушения локализация источников акустической эмиссии значительно уменьшается. Зона ожидаемого разрушения образцов по затуханию амплитуды сигналов акустической эмиссии четко выявляется на всем протяжении деформирования, вплоть до разрушения. Влияние искусственных дефектов в сварных соединениях из конструкционных сталей, независимо от способа сварки, проявляется в виде снижения уровня напряжения начала стадии микропластичности, уменьшения средних амплитуд сигналов акустической

эмиссии в этом интервале нагрузок и возрастания дисперсии амплитуд сигналов акустической эмиссии.

5. Установлено, что испытания сварных соединений углеродистых сталей, выполненных сваркой стационарной дугой и модулированным током (даже при наличии дефектов, типа неметаллических включений) необходимо проводить при нагрузках, приводящих к деформациям не превышающих 3%.

6. Получены корреляционные зависимости между нагрузками соответствующим степени деформации 3% и нагрузками предела текучести. На основании этих зависимостей рассчитан коэффициент превышения испытательного давления над пределом текучести при проведении стресс-испытаний, равный 1,06. Проанализирована сходимость формул определения испытательного давления для тонкостенных и толстостенных трубопроводов. Применение формулы Барлоу обосновано при соотношении толщины стенки к наружному радиусу трубопровода не более 0,05.

7. Методом математического анализа получены зависимости изменения параметров акустической эмиссии от степени деформации. Данные зависимости индивидуальны для каждого этапа деформации и являются акустическим отображением стадийности процесса деформации для исследуемых конструкционных сталей.

8. На основе математических закономерностей изменения параметров акустической эмиссии сигнала, для исследуемых марок сталей, разработан четырёхпараметрический трехуровневый критерий определения стадии пластической деформации по параметрам сигнала акустической эмиссии. Данный критерий позволяет качественно оценить степень пластической деформации при стресс-испытаниях трубопроводов, что особенно важно для труб с различным утонением стенки.

9. Разработаны методические рекомендации, позволяющие применять критерий определения степени деформации по изменениям характеристик акустико-эмиссионного сигнала при проведении стресс-испытаний, повышающий надёжность работы трубопровода при длительной эксплуатации. Предложен способ определения остаточного ресурса трубопровода по фактору потери запаса прочности.

Список основных публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Смирнов А.Н., **Ожиганов Е.А.** Акустическая эмиссия при различных степенях деформации и способах сварки стали СтЗсп // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 6 – С. 68-72.
2. Смирнов А.Н., **Ожиганов Е.А.**, Бакланов Д.Н., Кузнецов А.Г., Кузнецов Г.Г. Анализ методик проведения испытаний оборудования, работающего под давлением (краткий обзор) // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 2 (108). – С. 101-106.
3. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., **Ожиганов Е.А.**, Абабков Н.В., Князьков В.Л. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений // Сварка и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 25-28.

4. **Ожиганов Е.А.**, Попова Н.А., Смирнов А.Н., Никоненко Е.Л., Сизоненко Н.Р., Конева Н.А., Козлов Э.В. Изменение структуры и фазового состава в материале сварного шва стали СтЗсп под действием пластической деформации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения* – 2016. – Т. 13 – №2. – С. 191-197.
5. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Князьков В.Л., Абабков Н.В., **Ожиганов Е.А.** Влияние режимов сварки углеродистых сталей на амплитуду полей внутренних напряжений и структурно-фазовое состояние в зоне термического влияния // *Деформация и разрушение материалов*. – 2017. – № 6 – С. 28-33.
6. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., **Ожиганов Е.А.**, Данилов В.И., Орлова Д.В., Конева Н.А. Особенности упругопластического перехода в сварных соединениях стали 09Г2С, выполненных дуговой сваркой при различных режимах тепловложения // *Сварка и диагностика*. – № 4. – 2017. – С. 15-20.
7. **Ожиганов Е.А.**, Коновалов С.В. Акустическое отображение стадийности процесса деформации конструкционной стали 09Г2С // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 43-48.
8. **Ожиганов Е.А.**, Коновалов С.В., Панченко И.А., Баженова М.М. Влияние дефектов на структурно-фазовое состояние сварных соединений и параметры сигналов акустической эмиссии в конструкционных сталях // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2023. – № 4(46). – С. 21-29.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных Web of Science, Scopus:

1. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Abakov N.V., **Ozhiganov E.A.**, Koneva N.A., Popova N.A. Acoustic Evaluation of the Stress-Strained State of Welded Carbon Steel Joints after Different Modes of Heat Input // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2018. – Vol. 54, No. 1. – P. 37-43.
2. Smirnov A.N., **Ozhiganov E.A.**, Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2015. – Vol. 51, No. 11. – P. 705-712.

Монографии

1. Смирнов А.Н., Князьков А.Ф., Князьков В.Л., Конева Н.А., **Ожиганов Е.А.**, Абабков Н.В., Данилов В.И., Попова Н.А. Сварка модулированным током. Структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений в сварных соединениях конструкционных сталей – М.: Инновационное машиностроение; Кемерово: Сибирская издательская группа. 2017. – 328 с.

Тезисы докладов и статьи в материалах Международных и Всероссийских конференций

1. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Абабков Н.В., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., **Ожиганов Е.А.**, Конева Н.А. Влияние длительных температурно-силовых воздействий на структурно-фазовое состояние сварного шва в стали СтЗсп // В сборнике: Перспективные материалы в технике и строительстве: ПМТС 2015.

Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Томск. – 2015. – С. 52-55.

2. **Ожиганов Е.А.**, Попова Н.А., Никоненко Е.Н. Влияние деформации на структуру и фазовый состав зоны термического влияния сварного шва стали СтЗсп // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. 2016. – С. 202-204.

3. Смирнов А.Н., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., **Ожиганов Е.А.**, Абабков Н.В., Конева Н.А. Влияние способа сварки на структурно-фазовое состояние сварного шва стали 09Г2С // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017) сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Кемерово. 2017. – С. 152-159.

4. **Ожиганов Е.А.**, Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Смирнов А.Н. Влияние способа сварки на структуру и фазовый состав зоны термического влияния сварного шва стали 09Г2С // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2017. – С. 249-251.

5. **Ожиганов Е.А.**, Коновалов С.В., Смирнов А.Н. Критерий предельной деформации при стресс-испытаниях трубопроводов из конструкционных сталей // Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2021. – С. 27-28.

6. **Ожиганов Е.А.** Оценка остаточного ресурса трубопроводов из конструкционных сталей при проведении стресс-испытаний // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов III Международной научно-практической конференции, 19-21 апреля 2022 года / под ред. А.Н. Смирнова. – Кемерово : КузГТУ, 2022. – С. 214-217.

Публикации в других изданиях

1. **Ожиганов Е.А.**, Бакланов Д.Н., Кузнецов А.Г., Кузнецов Г.Г. Применение методов НК при экспертизе технических устройств опасных производственных объектов – В кн.: Экспертиза промышленной безопасности в Сибирском федеральном округе: сборник трудов под ред. А.Н. Смирнова. – М.: Машиностроение, 2015. – С. 78-84.

2. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., **Ожиганов Е.А.**, Калашников М.П., Конева Н.А. Влияние способа сварки на структурно-фазовое состояние зоны термического влияния сварного соединения стали 09Г2С – В кн.: Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс: сборник трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 266-276.

3. Смирнов А.Н., Попова Н.А., **Ожиганов Е.А.**, Никоненко Е.Л., Абабков Н.В., Калашников М.П., Конева Н.А. Формирование структурно-фазового состояния в сварном шве при деформации – В кн.: Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс: сборник научных трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 153-166.