

На правах рукописи

АБРОСИМОВА Анжелика Анатольевна

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

**Специальность: 05.05.04 – Дорожные, строительные и
подъемно-транспортные машины**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ).

Научный руководитель: **ГОРДИЕНКО Валерий Евгеньевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **СОКОЛОВ Сергей Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
кафедра «Транспортные и технологические системы», профессор;

АФАНАСЬЕВ Александр Сергеевич,
кандидат военных наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра
«Транспортно-технологические процессы и машины», заведующий.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита диссертации состоится «14» ноября 2017 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.02** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, ауд. 340-К.

Тел./Факс: (812) 316–58–72, e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/abrosimova-anzhelika-anatolevna>.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.223.02
кандидат технических наук, доцент

Олещенко Елена Михайловна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К одной из важнейших современных задач повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатируемых строительных машин (СМ) относится задача обеспечения надлежащего технического состояния (ТС) их сварных металлических конструкций (МК), составляющих до 80 % от общей массы машин.

Оценка технического состояния металлоконструкций с учетом их фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) представляет определенные трудности из-за значительного числа эксплуатационных факторов, оказывающих существенное влияние на работоспособность и приводящих к ряду негативных последствий (возникновение зон накопленных повреждений, эксплуатационных дефектов, коррозионных повреждений, структурных изменений металла, локальных зон концентрации напряжений и пр.).

Значительное осложнение в такой оценке привносит наличие сварных соединений, характеризующихся различными зонами (сварной шов, зона сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации, основной металл), и дающих до 80 % отказов и аварий, хотя сама доля сварных соединений не превышает 1,0...1,5 % от общего объема металла конструкций. Это объясняется тем, что сварным соединениям, полученным сваркой плавлением, присуща структурная и механическая неоднородность различных зон, а также наличие высоких остаточных напряжений и опасных локальных зон концентрации напряжений (КН).

Выявление таких локальных зон КН в основном металле и зонах сварных соединений представляет собой отдельную трудоемкую задачу, определяемую незначительностью их размеров, особенностями доступа к исследуемым зонам контроля, необходимостью подготовки поверхности контроля, несовершенством применяемых методов и методик. В то же время, отсутствие информации о величинах фактических действующих напряжений в этих зонах весьма снижает значимость последующих поверочных расчетов и достоверность оценки технического состояния сварных металлоконструкций в целом.

Восстановление прочностных свойств металла в ослабленных зонах концентрации напряжений известными методами является трудной практической задачей (существенные затраты и трудоемкость, риск снижения работоспособности конструкции в целом), а необходимость существенного снижения структурной и механической неоднородности различных зон сварных соединений и выравнивание механических свойств сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) со свойствами основного металла, является весьма важным

Учитывая вышесказанное, задача оценки степени опасности и повышения прочности сварных соединений с учетом структурной и механической неоднородности металла на основе развития методов и разработки методик оценки и восстановления прочностных свойств металла, имеет существенное значение в области обеспечения долговечности, надежности и эксплуатационной безопасности строительных машин и является актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации посвящены многие работы

видных отечественных и зарубежных ученых.

Проблемам расчета при проектировании, диагностике и оценке остаточного ресурса посвящены работы таких авторов, как Акулов Н.С., Афанасьев А.С., Бардышев О.А., Вершинский А.В., Волков С.А., Гордиенко В.Е., Гохберг М.М., Евтюков С.А., Коровин С.К., Куркин С.А., Лившиц В.Л., Липатов А.С., Попов В.А., Соколов С.А. и др. При этом к фундаментальным основам методов анализа сопротивления разрушению сварных металлоконструкций следует отнести труды академиков Фролова К.В., Махутова Н.А., Серенсена С.В. и ряда других.

Значительное внимание, уделяемое сварным конструкциям, эксплуатируемым в условиях агрессивных внешних воздействий и температур, привело к рассмотрению вопросов оценки влияния механической неоднородности на несущую способность сварных элементов, повышению однородности механических свойств сварных соединений и снижению остаточных напряжений в работах Бахши О.А., Винокурова В.А., Стеклова О.И., Худякова М.А., Поярковой Е.В., Куркина С.А., Николаева Г.А., Земзина В.Н. и ряда других авторов.

Рассмотрение основных факторов, способствующих образованию холодных трещин в сварных соединениях отражено в научных трудах Бахши О.А., Куркина С.А., Махненко В.И., Николаева Г.А., Яковлева П.Г., показано, что причины хрупкого разрушения сварных соединений заключаются в ряде причин: интенсивном росте зерна, образовании закалочных структур на участке перегрева из-за высокой скорости охлаждения, высоком уровне напряжений, высокотемпературной химической неоднородности материала и повышенном содержании водорода.

Направлению существенного повышения прочности и снижения металлоемкости изделий и конструкций посвящены фундаментальные работы по термоциклической обработке (ТЦО) Богачева И.Н., Лихачева В.А., Давиденкова И.Н., Федюкина В.К. и других известных авторов.

Тем не менее, ряд вопросов в этой сфере не нашел достаточного освещения:

- влияние механической неоднородности зон сварных соединений на несущую способность сварных конструкций;
- влияние в материалах структурных изменений, вызванных деформационным и термическим воздействием, на изменение прочностных свойств металла и возникновение локальных зон концентрации напряжений;
- влияние внешних воздействий на целевое формирование структуры заданной степени дисперсности, снижение неоднородности сварных соединений, восстановления и повышения прочности металла в ослабленных локальных зонах.

Цель и задачи исследования.

Цель диссертационной работы – разработка методики оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели в диссертационной работе обоснованы и поставлены следующие научно-технические задачи:

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования по выявлению взаимосвязи структурного состояния металла, величин действующих напряжений и магнитного параметра при контроле основного металла и зон сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния) в процессе циклического упругопластического деформирования, с учетом влияния химического состава,

исходного структурного состояния конструкционных сталей и толщины немагнитного защитного покрытия металлических конструкций.

2. Выявить влияние степени прошедшей пластической деформации на структурные изменения и величину магнитного параметра в контролируемых зонах сварных соединений, для повышения объективности диагностики эксплуатируемых сварных металлоконструкций в выявленных опасных локальных зонах концентрации напряжений.

3. Разработать режимы контролируемой термоциклической обработки, обеспечивающие снижение структурной неоднородности и сближение равнопрочности металла зон сварного соединения с учетом степени прошедшей в них пластической деформации, с целью повышения работоспособности сварных соединений.

4. Разработать методику оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации с целью обеспечения объективности выводов о техническом состоянии и предложений по осуществлению ремонтно-восстановительных и регламентных работ.

5. Разработать рекомендации по проведению постоянного и периодического магнитного мониторинга в опасных локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе их эксплуатации с целью предотвращения аварий и отказов.

Объект исследования – сварные соединения металлоконструкций строительных машин, обладающие структурной и механической неоднородностью.

Предмет исследования – методы и методики оценки и повышения прочности металла сварных соединений металлоконструкций строительных машин.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлена связь между действующими напряжениями, магнитным параметром контроля и структурой металла сварных соединений из конструкционных ферромагнитных сталей с положительной константой магнитострикции в условиях циклического упругопластического деформирования с учетом структурной и механической неоднородности сварных соединений, химического состава и исходного структурного состояния сталей.

2. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния термоциклической обработки на структурную и механическую неоднородность зон сварных соединений (сварной шов, зона сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации, основной металл) малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3, разработаны оптимальные режимы термоциклической обработки (температура нагрева $t_{\text{нагр}}=770$ °С, количество циклов $n=5$) с поэтапным магнитным контролем структурных изменений для снижения структурной неоднородности и повышения равнопрочности всех зон сварных соединений за счет формирования в них более мелкозернистых структур с повышенными прочностными свойствами, применимые для повышения прочности металла в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений.

3. Выявлено влияние пластической деформации металла в различных зонах сварных соединений на структурные изменения и характер изменения петли магнитного гистерезиса, требующее учета для повышения достоверности выявления и контроля в локальных зонах концентрации напряжений.

4. Разработана методика оценки и повышения прочности сварных соедине-

ний металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД 004–16–01, включающая выявление, оценку степени опасности и повышение прочностных свойств металла в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений, с учетом разработанных графических и аналитических зависимостей.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов и методик оценки и повышения прочности сварных конструкций строительных машин в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений с учетом структурной и механической неоднородности зон сварных соединений и степени прошедшей пластической деформации.

Практическая значимость работы состоит в использовании:

1. Оптимальных режимов поэтапной контролируемой пассивным феррозондовым методом термоциклической обработки конструкционных сталей в различных зонах сварных соединений, в том числе в тех зонах, где прошла пластическая деформация металла на ту или иную степень, с целью снижения структурной неоднородности, получения мелкозернистых структур и за счет этого повышения прочностных свойств на 12...15 %, что позволяет рекомендовать их применение для повышения прочности металла в ослабленных локальных зонах КН, а также при контроле формирования мелкозернистых структур в промышленных условиях.

2. Методики оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД 004–16–01, включающей выявление, оценку степени опасности и повышение прочностных свойств металла в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений с учетом разработанных графических и аналитических зависимостей, способствующей обеспечению долговечности, надежности и эксплуатационной безопасности, повышению эффективности и производительности диагностики технического состояния, а также снижению материальных затрат на эксплуатацию и ремонт сварных конструкций на 15...18 %.

3. Рекомендаций по проведению постоянного и периодического магнитного мониторинга в выявленных локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений металлоконструкций строительных машин, позволяющих дополнить и повысить объективность результатов периодического обследования технического состояния, а также снизить вероятность отказов и аварий при своевременном выполнении рекомендации по технической эксплуатации и ремонтно-восстановительных мероприятий.

4. Научных положений, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, в практике экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов (при обследовании, оценке технического состояния), в промышленных условиях при термообработке сварных узлов и элементов конструкций, а также при разработке практических и лекционных курсов учебных дисциплин в образовательном процессе ВУЗов.

Методология диссертационного исследования базируется на результатах теоретических и экспериментальных исследований ученых и специалистов в области расчета, диагностики технического состояния и эксплуатации сварных металлических конструкций строительных машин.

Методы исследования. Задачи исследования решены путем применения апробированных разрушающих и неразрушающих методов: квазистатических механических испытаний, термической и термоциклической обработки, измерения микротвердости, пассивного феррозондового контроля ферромагнитных материалов с положительной константой магнитострикции, металлографического анализа, численных методов расчета, прикладной статистики и интерпретации статистических данных. При оценке технического состояния сварных конструкций эксплуатируемых строительных машин использовались экспериментальные данные, полученные на лабораторных и сварных образцах из конструкционных сталей 08пс и Ст3 в состоянии поставки, после пластической деформации на разную степень, термической и термоциклической обработки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Взаимосвязь структурного состояния металла зон сварных соединений из конструкционных сталей 08пс и Ст3 с величиной действующих напряжений и магнитного параметра в процессе циклического упругопластического деформирования, с учетом толщины немагнитного защитного покрытия металлических конструкций.

2. Разработанные режимы контролируемой термоциклической обработки, обеспечивающие снижение структурной и механической неоднородности и повышения равнопрочности металла в различных зонах сварных соединений.

3. Влияние степени холодной пластической деформации и последующей термоциклической обработки на структурные и магнитные параметры сварного шва, зоны термического влияния, основного металла конструкционных сталей.

4. Разработанная методика оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин МУ РД СПбГАСУ 004-16-01, включающая в себя выявление и оценку степени опасности локальных зон концентрации напряжений, а также получения в них мелкозернистых структур с повышенными прочностными свойствами.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины, а именно п. 5 «Методы повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации машин, машинных комплексов и систем».

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечивается: корректностью поставленных задач; выбором распространенных марок сталей; применением метрологически поверенного и откалиброванного оборудования (приборов) и инструментов; применением апробированных методов и методик исследований; достоверностью и представительностью исходных, расчетных и экспериментальных данных, сравнением теоретических положений и опытных данных с результатами исследований известных авторов.

Апробация результатов. Основные научные положения, выводы и рекомендации по материалам диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах: на 70 научной конференции «Актуальные проблемы строительства» (СПб, 2014), на 57 Международной конференции «Актуальные проблемы строительства» (СПб, 2015), на 71-ой научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов ФБГОУ ВО СПбГАСУ (СПб, 2015), на 69-ой межвузовской научно-практической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПб, 2016), на 72-й научной конференции «Актуальные проблемы строительства» (СПб, 2016), на 70-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПб, 2017), а также использованы в практике оценки технического состояния подъемно-транспортных машин и оборудования (ЗАО «РАТТЕ», 2017) и в учебном процессе на кафедрах технологии конструкционных материалов и метрологии, технологии строительных материалов и метрологии, наземных транспортно-технологических машин СПбГАСУ (2013–2017).

Публикации. Основные положения диссертационного исследования отражены в 15 научных публикациях общим объемом 19,7 п.л., лично автором – 9,35 п.л., в состав которых входят 1 монография, 9 работ, опубликованных в научных журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, основных выводов и результатов исследований и списка литературы, включающего 118 наименований. Диссертация изложена на 173 страницах основного текста, содержит 73 рисунка, 15 таблиц и 4 приложения.

Во введении приведено краткое изложение состояния вопроса, аргументирована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ по проблеме обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных металлоконструкций строительных машин, особенностей структурной и механической неоднородности зон и участков сварных соединений, влияние дефектов на их работоспособность и восстановление работоспособности сварных металлоконструкций за счет различных способов усиления.

Во второй главе рассмотрены методические основы исследований, методы, методики и средства проведения экспериментов, контроля структуры и механических свойств сварных соединений и основного металла. Экспериментальные исследования проводились на лабораторных и сварных образцах в исходном и деформированном состояниях, после термической и термоциклической обработок.

Контроль структурных изменений в конструкционных сталях 08пс и Ст3 проводился с применением методов пассивного феррозондового контроля, металлографического анализа и измерения микротвердости металла. Металлографические исследования проводились на инвертированных металлографических микроскопах Carl Zeiss Axio Observer и Leica DMI5000, оснащенными системами количественного анализа изображений «Thixomet» для создания электронного панорамного изображения объекта исследования.

Механические свойства (прочность, пластичность, микротвердость) определяли по стандартным методикам. Прочность и пластичность определяли на разрывной машине FPZ 100/1 в упругопластической области при циклическом ступенчатом нагружении. Для измерения микротвердости различных зон сварных соединений использовался универсальный твердомер фирмы Zwick/Roel. Термиче-

ская и термоциклическая обработка проводились в муфельных печах СНОЛ 8.2/1100 и СНОЛ 30/1100 с микропроцессорным программным управлением.

При проведении исследований были реализованы математические методы планирования эксперимента по плану ПФЭ 2^3 . В качестве факторов, влияющих на магнитный параметр H_p (А/м), были выбраны: z_1^- – минимальная температура нагрева в цикле, °С, z_1^+ – максимальная температура нагрева в цикле, °С; z_2^- – минимальное количество циклов ТЦО, n ; z_2^+ – максимальное количество циклов ТЦО, n ; z_3^- – минимальное значение действующих напряжений, МПа, z_3^+ – максимальное значение действующих напряжений, МПа.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по оценке степени опасности различных зон и участков сварных соединений, косвенному определению в них величин действующих напряжений, обоснованию и разработке оптимальных режимов ТЦО, позволяющих обеспечить получение мелкозернистых структур с заданной степенью дисперсности с целью снижения структурной и механической неоднородности металла и повышения равнопрочности различных зон сварных соединений с учетом влияния прошедшей пластической деформации.

В четвертой главе приведены результаты разработки методики оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД СПбГАСУ 004–16–01, рассмотрены вопросы применения диагностического магнитного мониторинга с выдачей рекомендаций по мониторингу в локальных зонах КН сварных соединений.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлена связь между действующими напряжениями, магнитным параметром контроля и структурой металла сварных соединений из конструкционных ферромагнитных сталей с положительной константой магнитострикции в условиях циклического упругопластического деформирования с учетом структурной и механической неоднородности сварных соединений, химического состава и исходного структурного состояния сталей.

Ранее было показано, что наиболее распространенными местами разрушений сварных металлоконструкций являются сварные соединения, обладающие структурной и механической неоднородностью. На рис. 1 показана одна из типичных панорам микроструктур сварного соединения из малоуглеродистой стали Ст3. Видно, что сварной образец обладает ярко выраженной структурной неоднородностью: литая дендритная структура в сварном шве, очень крупнозернистая в зоне сплавления с участком перегрева, более мелкозернистая в зоне полной перекристаллизации и в состоянии заводской поставки у основного металла. В связи с этим вопрос первоочередности контроля той или иной зоны сварного соединения, оказывающей наибольшее негативное влияние на работоспособность сварной конструкции, представляет значительный научный и практический интерес.

В процессе оценки степени опасности различных зон сварных соединений сварных образцов со снятой выпуклостью в процессе их циклического упругого деформирования была установлена взаимосвязь между действующими напряжениями, структурным состоянием металла и контролируемым магнитным параметром в исследуемых зонах сварного соединения. Показано, что наименьшие изме-

нения параметра H_p присущи зоне основного металла, максимальные – зоне сплавления с участком перегрева и несколько менее значительные изменения величины H_p – сварному шву, что свидетельствует о наличии в этих зонах более высоких действующих напряжений, чем в зоне основного металла (рис. 2).

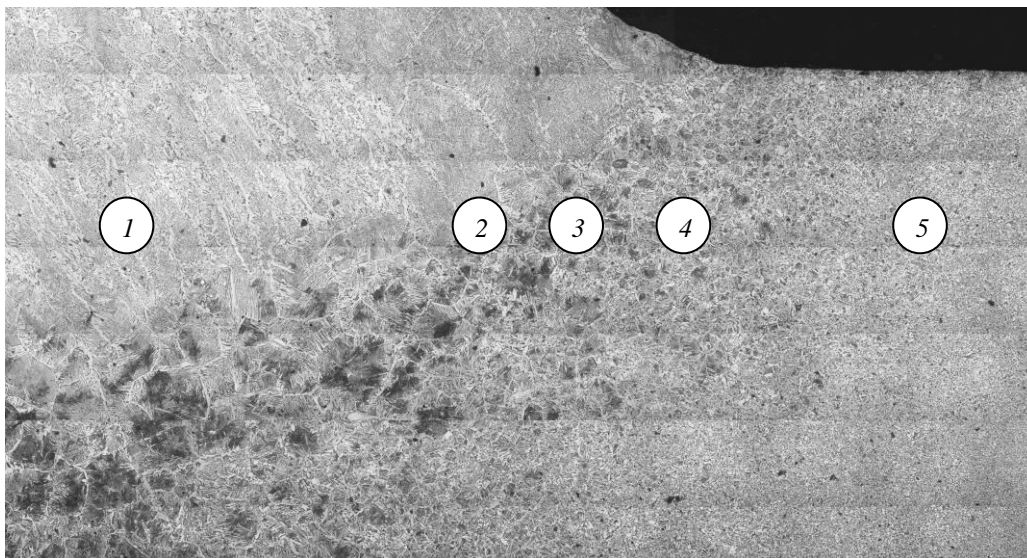


Рис. 1. Панорама микроструктуры стыкового сварного соединения из стали Ст3, х50:
 1 – сварной шов; 2 – зона сплавления основного металла с участком перегрева;
 3 – участок перегрева; 4 – зона полной перекристаллизации; 5 – основной металл

Таким образом, наиболее опасным местом сварного соединения является зона сплавления сварного шва с основным металлом и примыкающим к нему участком перегрева, что позволяет рекомендовать проведение первоочередного контроля в зоне сплавления с участком перегрева и во вторую – сварной шов.

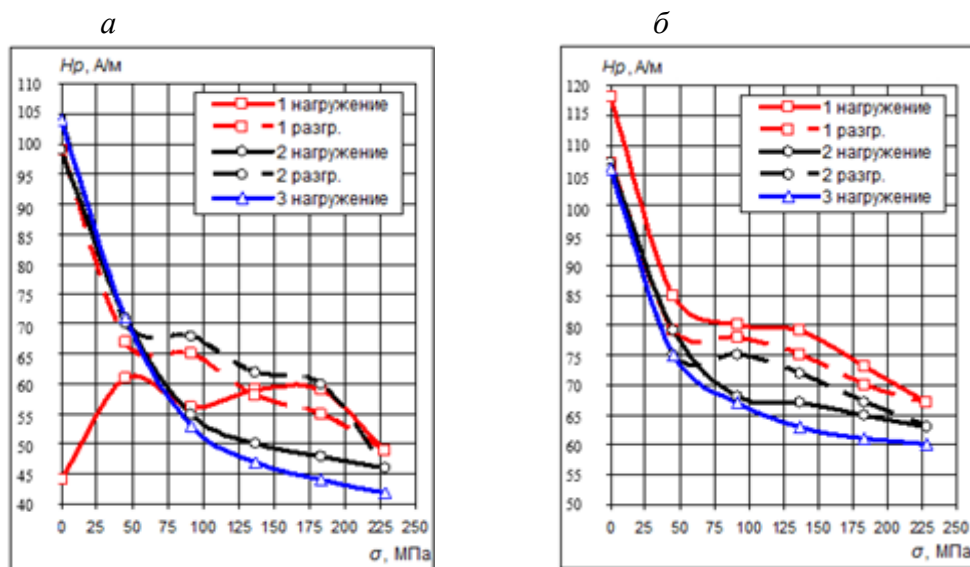


Рис. 2. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния H_p от действующих напряжений в сварном стыковом соединении из стали Ст3 со снятой выпуклостью:
 (а) – в зоне сплавления основного металла со сварным швом; (б) – в зоне основного металла

С целью повышения объективности оценки технического состояния сварных МК эксплуатируемых строительных машин, были проведены экспериментальные исследования по косвенной оценке влияния действующих напряжений на магнитный параметр контроля в основном металле и других зонах сварных соединений с различной исходной структурой, характерной для сварных конструкций эксплуа-

тируемых машин.

В процессе циклического упругопластического нагружения–разгрузки образцов из сталей 08пс и Ст3 с различной структурой (состояние заводской поставки, крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная) была установлена взаимосвязь между действующими напряжениями σ , величинами магнитного параметра H_p и исходной структурой.

Установлено, что во всех случаях в упругой области деформирования с увеличением действующих напряжений магнитный параметр H_p уменьшается, а в пластической области деформирования – возрастает. При снятии внешней нагрузки образуется петля магнитного гистерезиса, при этом конечные значения магнитного параметра H_p после снятия внешней нагрузки в пластической области деформирования значительно отличаются от исходных, а его форма в значительной степени зависит от исходной структуры: крупнозернистой (рис. 3), мелкозернистой и после холодной пластической деформации (рис. 4), что необходимо учитывать при контроле основного металла и зон сварных соединений.

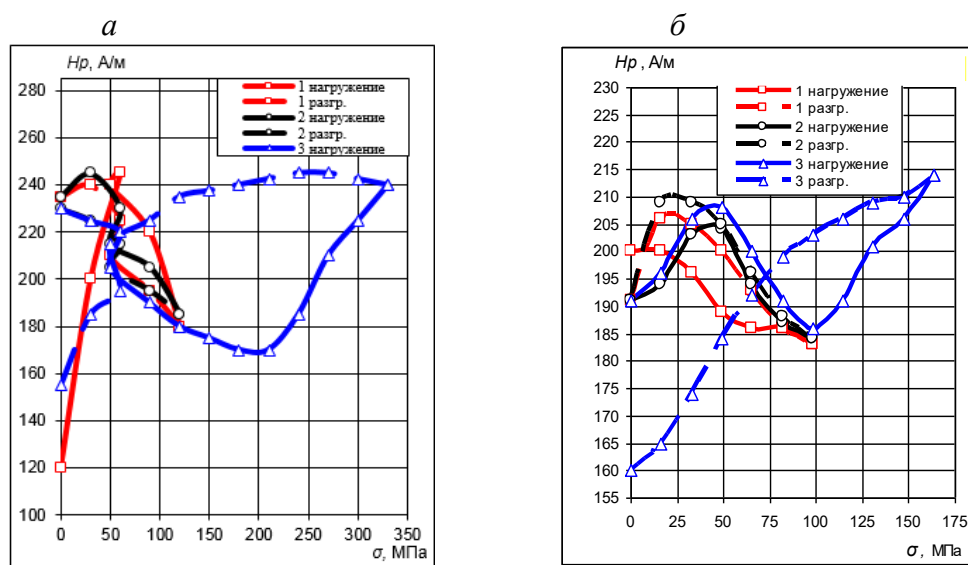


Рис. 3. Зависимость $H_p(\sigma)$ при деформации образцов из сталей Ст3 и 08пс в состояниях заводской поставки (а) и после отжига при 900 °С (б) соответственно

Многие сварные металлоконструкции имеют защитные покрытия, в связи с чем возникает необходимость его удаления при применении многих неразрушающих методов контроля и последующего восстановления по окончании работ, что влечет привлечение значительных людских и материальных затрат. Кроме того, значительная шероховатость сварного шва также ограничивает применение многих методов контроля. Поэтому в работе в первую очередь проведены исследования по оценке влияния толщины защитного немагнитного покрытия на изменение магнитного параметра контроля H_p .

Исследования показали, что при толщине защитного немагнитного покрытия до 2 мм изменение величин магнитного поля рассеяния H_p варьируется в пределах 17...25 % (рис. 5). Это позволяет рекомендовать разработанную методику магнитного контроля как при выборочном, так и при сплошном сканировании поверхности сварных соединений во всех без исключения зонах, а также труднодоступных местах и закрытых контурах металлоконструкций без удаления немагнитного защитного покрытия толщиной до 2 мм и предварительной подготовки поверхности сварных соединений.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила представить полученные зависимости в аналитическом виде. Установлена линейная зависимость между коэффициентами уравнений a , b , c и начальным значением магнитного параметра H_{p0} .

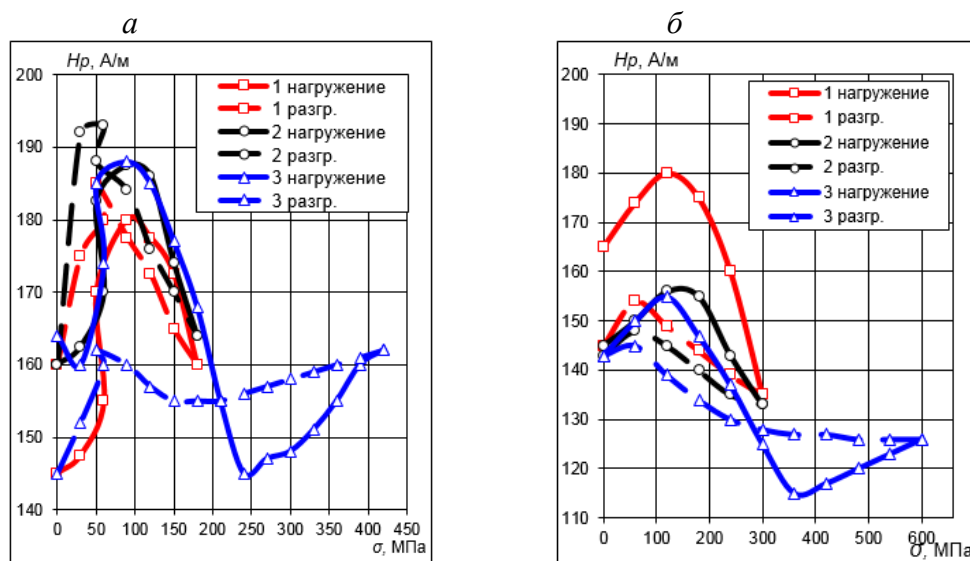


Рис. 4. Зависимость $H_p(\sigma)$ при деформации образцов из стали Ст3 в состояниях (поставка + 5-кратная ТЦО) (а) и (поставка + прокатка на $\epsilon = 50\%$) (б)

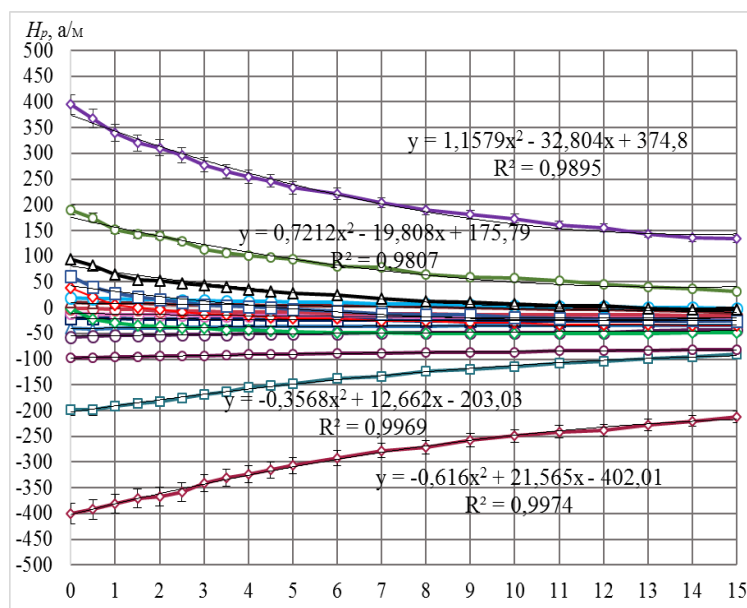


Рис. 5. Изменение магнитного параметра контроля от толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии поставки

Получена формула параметрической функции, позволяющая определять значения H_p на основе известных H_{p0} и толщины покрытия t :

$$H_p = (0,09 \cdot H_{p0} - 0,55) \cdot t^2 - (2,61 \cdot H_{p0} - 17,16) \cdot t + (33,13 \cdot H_{p0} - 272,22) \quad (1)$$

где H_{p0} и H_p – исходная и текущая величины напряженности магнитного поля рассеяния, t – толщина защитного немагнитного покрытия соответственно; a , b , c – экспериментальные коэффициенты уравнений, зависящие от структурного состояния металла, R^2 – коэффициент корреляции.

Использование полученных аналитических зависимостей для оценки величин магнитного параметра контроля целесообразно на этапе диагностирования технического состояния сварных металлоконструкций из сталей, близких к рассматриваемым по свойствам, химическому составу и структурному состоянию.

2. Разработаны оптимальные режимы контролируемой термоциклической обработки (температура нагрева $t_{\text{нагр}}=770$ °С, количество циклов $n=5$), обеспечивающие снижение структурной и механической неоднородности и повышение равнопрочности металла в различных зонах сварных соединений.

Металлографический анализ сварных соединений сварных образцов из конструкционных сталей 08пс и Ст3 показал, что им присущи различные зоны и участки с характерными микроструктурами, получаемыми при сварке малоуглеродистых и низколегированных сталей. В то же время, в металле реальных сварных металлоконструкций, изготовленных из различных видов заводского проката, и их сварных соединений наблюдаются различные по степени дисперсности структуры (крупнозернистая, мелкозернистая).

Поэтому для проведения экспериментальных исследований были разработаны режимы формирования микроструктур с заданной степенью дисперсности (с разным размером зерен). При этом для получения крупнозернистых структур был выбран высокотемпературный отжиг, а для получения мелкозернистых структур, как показал проведенный анализ, наиболее приемлемым способом является термоциклическая обработка.

Следует подчеркнуть, что в соответствии с уравнением Холла-Петча мелкозернистая структура, по сравнению с крупнозернистой, обладает более высокими прочностными свойствами. Так, согласно уравнению, предел текучести металла связан с размером зерен следующим соотношением:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2}, \quad (2)$$

где d – размер зерен, σ_0 – параметр, который характеризует сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций и k – параметр, который характеризует барьерный эффект границ зерен при переходе скольжения от зерна к зерну.

Учитывая вышесказанное, разработка и применение оптимальных режимов получения микроструктур с заданной степенью дисперсности представляет не только научный, но и значительный практический интерес, в связи с возможностью обеспечения равнопрочности зон сварных соединений при изготовлении сварных конструкций, а также для восстановления работоспособности путем повышения их прочности (усиления металла в ослабленных зонах КН) при ремонте.

В процессе экспериментальных исследований по получению микроструктур с заданной степенью дисперсности за счет ТЦО, с поэтапным контролем структурных изменений металла пассивным феррозондовым способом, была установлена связь между числом циклов нагрев–охлаждение, изменением исходной структуры и величиной магнитного параметра контроля. Во всех случаях в конструкционных сталях 08пс и Ст3 в состоянии заводской поставки наибольшие изменения параметра контроля наблюдались в процессе первых 3–5 циклов ТЦО. Увеличение числа циклов нагрев–охлаждение до 7 и 10 практически не оказывало влияния на изменение параметра контроля, что, вероятно, было вызвано менее

значительными структурными изменениями в сталях в процессе ТЦО.

Это предположение позже было подтверждено результатами проведенных металлографических исследований: изменение H_p вызвано структурными изменениями металла в процессе ТЦО (рис. 6). Видно, что увеличение числа циклов до 3 приводит к значительному измельчению исходной структуры, а после 5 циклов обработки в стали формируется довольно однородная структура с мелким зерном. Дальнейшее увеличение числа циклов до 7 и 10 незначительно повышает дисперсность структуры, однако несколько снижает разносторонность.

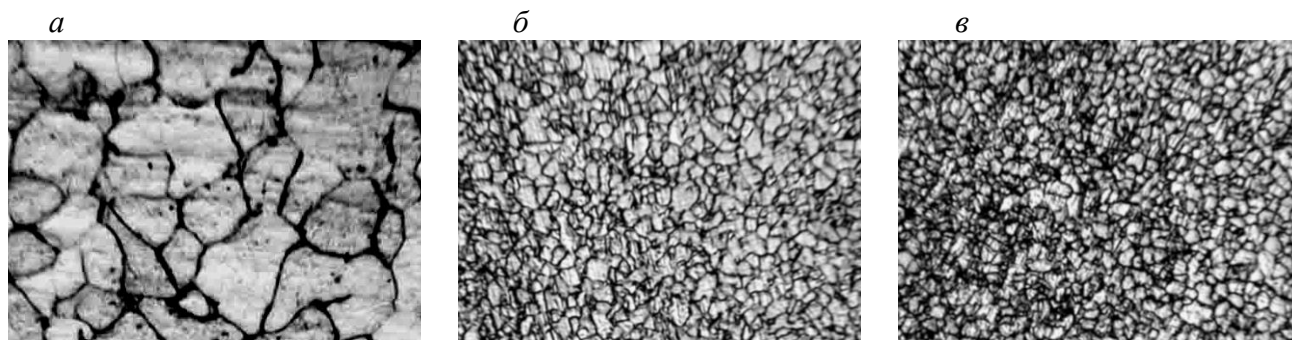


Рис. 6. Изменение микроструктуры стали 08пс при термоциклической обработке основного металла сварного соединения, х650: *а* – состояние заводской поставки; *б*, *в* – после 3 и 5 циклов соответственно

Результаты оценки влияния структуры стали 08пс с разной степенью дисперсности структуры, полученной после различного числа циклов обработки, на механические свойства, приведены в табл. 1.

Видно, что увеличение числа циклов приводит к уменьшению среднего размера зерен и способствует одновременному повышению пределов текучести и прочности материала при практически неизменной пластичности. Увеличение прочностных свойств происходит, в основном, в течение первых 3–5 циклов ТЦО, далее эти изменения становятся менее значительными, что хорошо согласуется с экспериментальными данными магнитного контроля, металлографического анализа и микротвердометрии. Аналогичные результаты были получены при испытаниях и для малоуглеродистой стали Ст3.

Таблица 1

Марка стали	Механические свойства	Число циклов ТЦО							
		0	1	2	3	4	5	7	10
08пс	σ_t , Мпа	168	175	182	189	191	193	194	195
	σ_B , Мпа	284	296	303	310	316	320	323	324
	δ , %	23,5	23,0	23,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0
Средний размер зерен, мкм		31	15	12	10	9	8	7	6,5

Указанное повышение механических свойств конструкционных сталей (предела текучести на 12...15 %, предела прочности на 13...14 %) позволяет рекомендовать ТЦО с поэтапным магнитным контролем для повышения прочностных свойств металла в ослабленных локальных зонах КН сварных соединений металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин.

Учитывая, что до 80 % отказов и аварий сварных металлоконструкций происходит из-за сварных соединений, характеризующихся механической и структурной неоднородностью, представляло научный и практический интерес рассмотрение ряда особенностей сварных соединений эксплуатируемых конструкций. На типичной панораме микроструктуры сварного стыкового соединения (рис. 1) четко просматривается структурная неоднородность различных зон и участков сварного соединения, что свидетельствует, в соответствии с уравнением Холла-Петча, об их механической неоднородности. Результаты исследования микротвердости металла сварного соединения исследуемых сталей хорошо согласуются с результатами металлографических исследований, представленных на панораме.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности восстановления и повышения прочностных свойств металла до требуемых значений, что актуально в ослабленных локальных зонах КН сварных соединений, за счет формирования мелкозернистой структуры с заданной степенью дисперсности, обладающей повышенными прочностными свойствами. Эти результаты представляют собой решение актуальной практической задачи, так как позволяют эффективно снизить неоднородность структуры и механических свойств основного металла, зоны термического влияния и сварного шва, а также повысить равнопрочность сварного соединения в целом.

При разработке режимов получения мелкозернистых структур в различных зонах сварных соединений путем применения ТЦО с поэтапным контролем изменений структуры металла ПФ методом так же, как и при термоциклировании образцов в состоянии заводской поставки (рис. 6), была установлена связь числа циклов ТЦО с изменением магнитного параметра H_p (рис. 7).

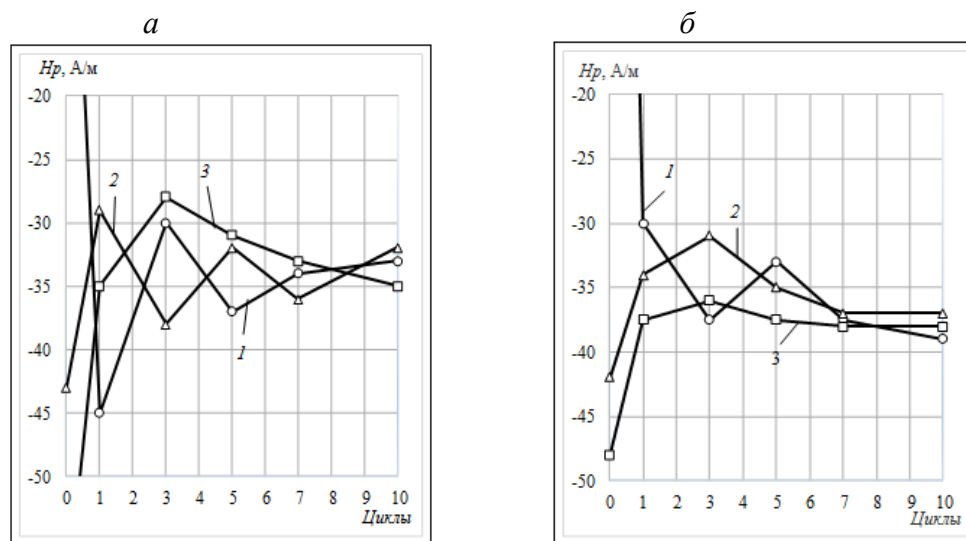


Рис. 7. Зависимость магнитного параметра H_p от числа циклов при термоциклировании сварных образцов из сталей 08пс (а) и Ст3 (б) в зонах: 1 – сварном шве; 2 – зоне сплавления с участком перегрева; 3 – основном металле

Видно, что наибольшие изменения значений H_p в исследуемых зонах сварных соединений наблюдаются в процессе первых 3–5 циклов ТЦО. При дальнейшем увеличении числа циклов происходит стабилизация значений магнитного параметра, что заметно по уменьшению его амплитуды. Увеличение числа циклов до 7 и 10 оказывает менее значительное влияние на изменение контролируемого

магнитного параметра.

Металлографические исследования исследуемых зон сварных образцов из малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3 со снятой выпуклостью сварного шва подтвердили результат произошедших структурных изменений, зафиксированных магнитным параметром контроля, и их взаимосвязь с числом циклов ТЦО (рис. 8). Видно, что интенсивное формирование мелкозернистой структуры заканчивается, в основном, после 3–5 циклов нагрев-охлаждение. Увеличение числа циклов более 5 в меньшей степени измельчает исходную структуру, однако существенно устраняет разнородность металла, что хорошо согласуется с данными магнитного контроля, связанных с уменьшением амплитуды колебаний значений магнитного поля рассеяния H_p . Влияние числа циклов ТЦО на прочностные свойства металла различных зон сварного соединения из малоуглеродистой стали Ст3 приведены в табл. 2.

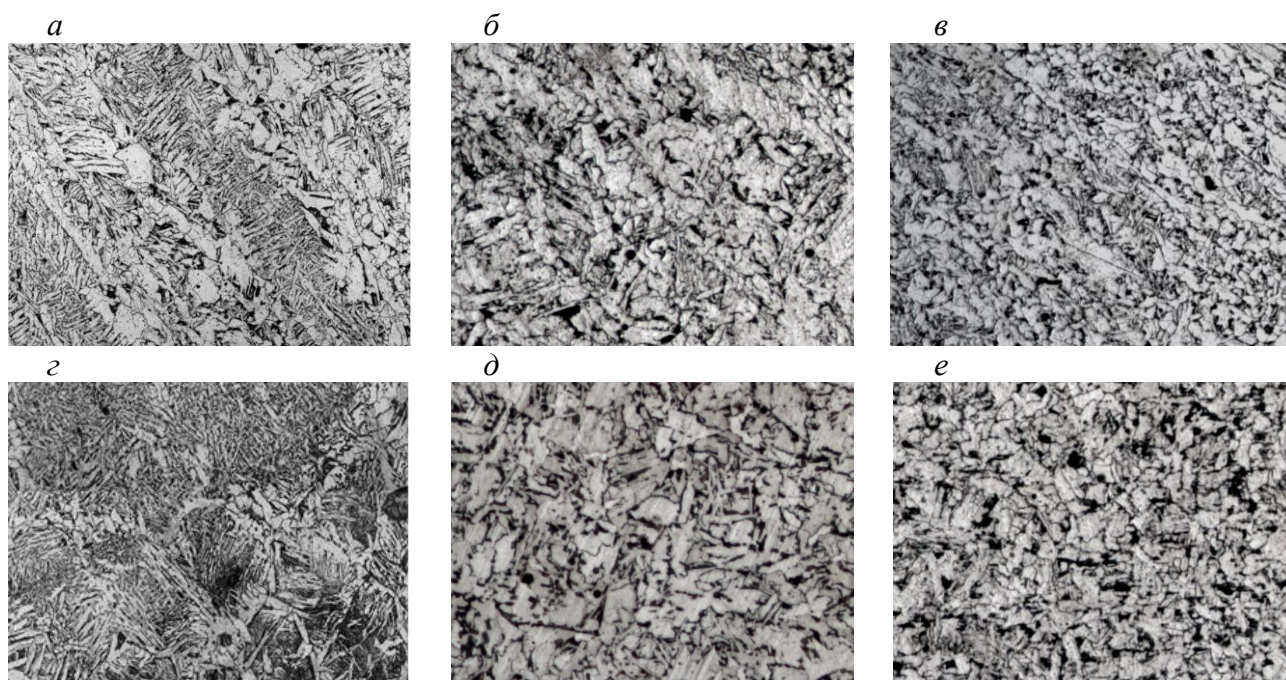


Рис. 8. Микроструктура сварного соединения (сталь Ст3) в сварном шве (а, б, в) и участке перегрева (з, д, е) после 0, 3 и 5 циклов ТЦО, х200

Таблица 2

Зоны сварного соединения	Механические свойства, МПа	Число циклов ТЦО				
		0	3	5	7	10
Основной металл	σ_T	251	275	282	283	284
	σ_B	436	487	494	496	503
Участок перегрева	σ_T	242	253	265	272	282
	σ_B	422	445	462	478	490
Сварной шов	σ_T	235	250	262	270	277
	σ_B	405	428	448	464	473

Таким образом, высокая структурная чувствительность магнитного метода позволяет рекомендовать его использование для контроля изменений структуры металла в сварных соединениях металлоконструкций строительных машин при

формировании мелкозернистых структур с заданной степенью дисперсности, начиная с самых ранних стадий термоциклической обработки.

3. Выявлено влияние пластической деформации металла в различных зонах сварных соединений на структурные изменения и характер изменения петли магнитного гистерезиса, требующее учета для повышения достоверности выявления и контроля в локальных зонах концентрации напряжений.

Учитывая, что в сварных соединениях металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин могут появляться локальные опасные зоны КН с прошедшей в них пластической деформацией, было целесообразно рассмотреть влияние ее степени на механическую и структурную неоднородность зон сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния, основной металл) и наметить пути восстановления металла и повышения прочностных свойств в опасных локальных зонах КН сварных соединений сварных МК.

В процессе исследований установлена связь между степенью прошедшей пластической деформации металла в различных зонах сварных соединений и напряженностью магнитного поля рассеяния H_p . Показано, что независимо от величины исходных значений и знака напряженности магнитного поля рассеяния H_p , с увеличением степени деформации более 10 % значения H_p переходят в отрицательную зону, а наибольшее изменение H_p наблюдается, начиная с самых малых степеней деформации (рис. 9, а). Такой характер изменения $H_p(\epsilon)$ позволяет рекомендовать выявленные закономерности к учету для использования в практике диагностики технического состояния сварных МК строительных машин. При этом экспериментальные значения магнитного контроля хорошо согласуются с данными металлографического анализа (рис. 10).

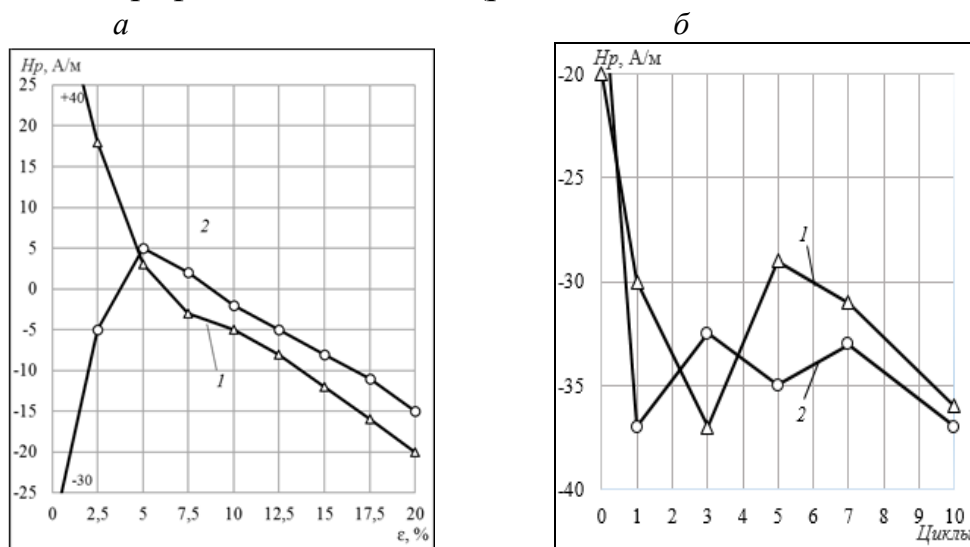


Рис. 9. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния H_p от степени холодной пластической деформации (а) и числа циклов ТЦО (б) сварного соединения:

1 – сварного шва; 2 – основного металла

Необходимо отметить, что структура стали в сварном соединении после пластической деформации имеет значительные отличия. Так, если в сварном шве при деформации $\epsilon=20\%$ только формируется текстура прокатки, то на участке перегрева уже начинает различаться кристаллографическая ориентированность зерен вдоль направления прокатки. В то же время, в деформированной структуре разли-

чаются недеформированные зерна, тогда как поблизости от них располагаются зерна со значительной степенью деформации. На участке полной перекристаллизации стали, имеющей более мелкозернистую исходную структуру, отсутствуют слабо деформированные зерна, что необходимо иметь в виду при диагностировании сварных соединений металлоконструкций.

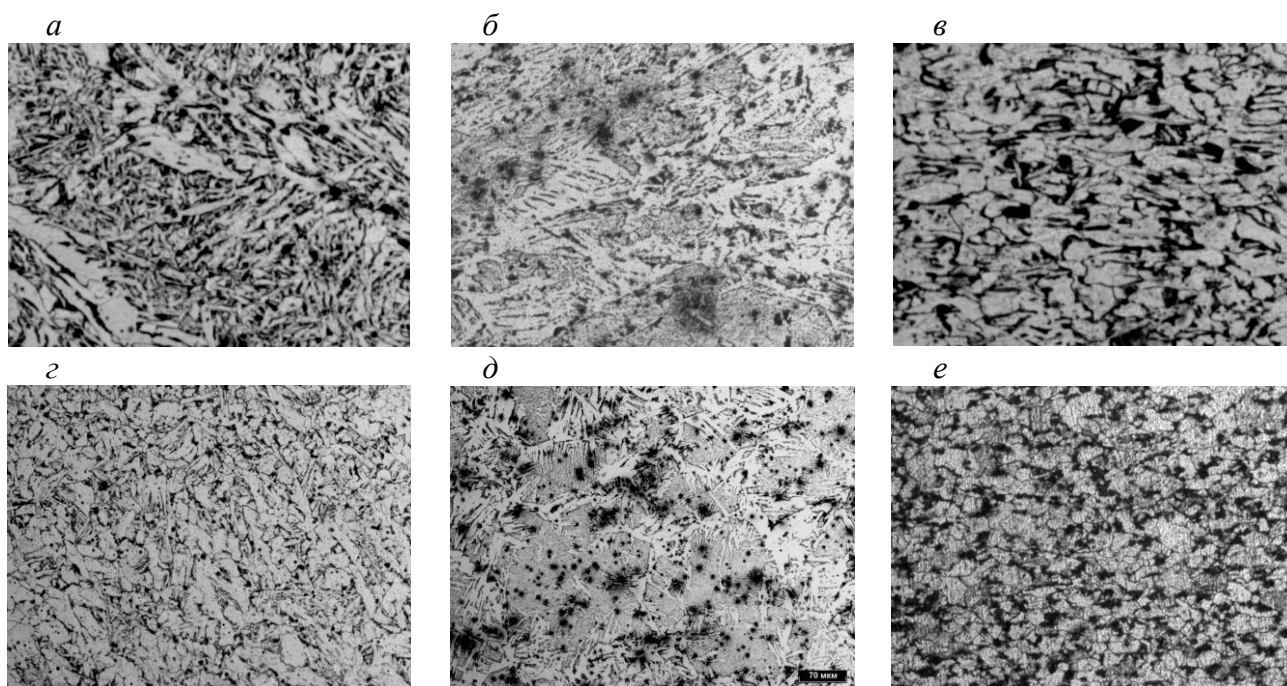


Рис. 10. Микроструктура сварного шва, участка перегрева и участка полной перекристаллизации из стали Ст3, $\times 200$; после деформации на $\epsilon = 20\%$ (а, б, в) и 5 циклов ТЦО (з, д, е), $\times 200$: а, з- сварной шов; б, д -участок перегрева; в, е- участок полной перекристаллизации

При проведении ТЦО деформированных сварных образцов наибольшие изменения значений H_p наблюдаются в процессе 2-го и 3-го циклов, с увеличением числа циклов происходит стабилизация величины магнитного параметра H_p (рис. 9, б). Увеличение числа циклов с 5 до 7 и 10 оказывает меньшее влияние на изменение значений H_p .

Наличие деформированной структуры сварного соединения при проведении ТЦО вносит значительные изменения. Существенным отличием ТЦО пластически деформированных сварных образцов ($\epsilon=20\%$) от недеформированных является формирование более мелкодисперсной структуры в рассматриваемых зонах сварного соединения, чем у образцов, не подвергнутых холодной пластической деформации, что связано с активизацией структурных изменений (рис. 10).

Наибольшее измельчение структуры происходит в процессе первых 3–5 циклов ТЦО. Увеличение числа циклов до 7–10 повышает степень дисперсности в меньшей степени.

При увеличении степени предварительной холодной пластической деформации до 50 % в процессе последующей ТЦО формируется наиболее мелкозернистая структура во всех без исключения зонах сварного соединения (рис. 11). В этом случае максимальная степень деформации способствует наиболее существенному измельчению литой дендритной структуры сварного шва и крупнозернистой структуры на участке перегрева, а также более значительному повышению прочности металла.

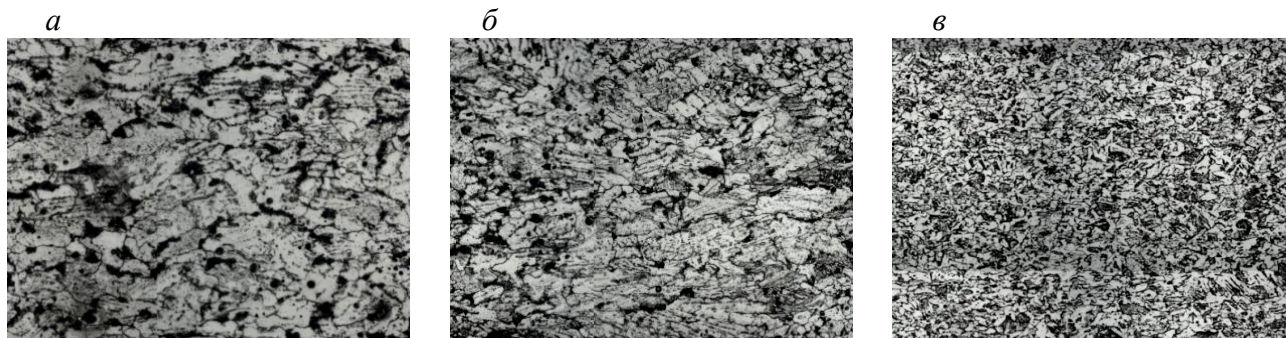


Рис. 11. Микроструктура сварного соединения (сталь Ст3) после деформации на $\varepsilon = 50\%$ (а, б, в) и 10 циклов ТЦО, х200: а – сварной шов; б – участок перегрева; в – участок полной перекристаллизации

При планировании эксперимента построена математическая модель, связывающая варьируемые факторы с магнитным параметром H_p наиболее широко применяемых малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3, и проведена оптимизация их окончательной термоциклической обработки.

Указанные факторы варьировали в пределах: z_1 – от 750 °С до 790 °С; z_2 – от 1 до 10; z_3 – от 0 до 250 МПа. Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных показывает, что основными критериями, определяющими изменение магнитного параметра H_p , являются количество циклов ТЦО и действующие напряжения σ . Минимальное влияние оказывают тройное взаимодействие всех факторов $z_1z_2z_3$.

Для исследуемых сталей математическая модель, описывающая зависимость H_p от варьируемых факторов, имеет вид:

$$H_p = 292,202 - 0,292z_1 - 31,907z_2 - 1,341z_3 + 0,038z_1z_2 + 0,001z_1z_3 + 0,102z_2z_3 - 0,0001z_1z_2z_3. \quad (3)$$

Установленная аналитическая зависимость, связывающая параметр H_p с технологическими параметрами термоциклической обработки и действующими напряжениями конструкционных сталей, позволила оптимизировать процесс ТЦО. В результате оптимизации установлено, что повышение прочностных свойств сварных соединений из сталей 08пс и Ст3 наблюдается при следующих значениях исследуемых факторов: $z_1 = 770$ °С, $z_2 = 5$ циклов ТЦО, $z_3 = 127$ МПа.

Таким образом, проведение ТЦО в различных зонах сварных соединений по разработанным режимам позволяет не только снизить структурную неоднородность и приблизиться к обеспечению равнопрочности зон сварных соединений и основного металла, но и целенаправленно повысить прочность металла в ослабленных локальных зонах КН.

4. Разработана методика оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД 004–16–01, включающая выявление, оценку степени опасности и повышение прочностных свойств металла в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений, с учетом разработанных графических и аналитических зависимостей.

Разработанная методика включает в себя основные положения, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований и базируется на разработанной схеме оценки и повышения прочности сварных металлоконструкций строительных машин, приведенной на рис. 12.

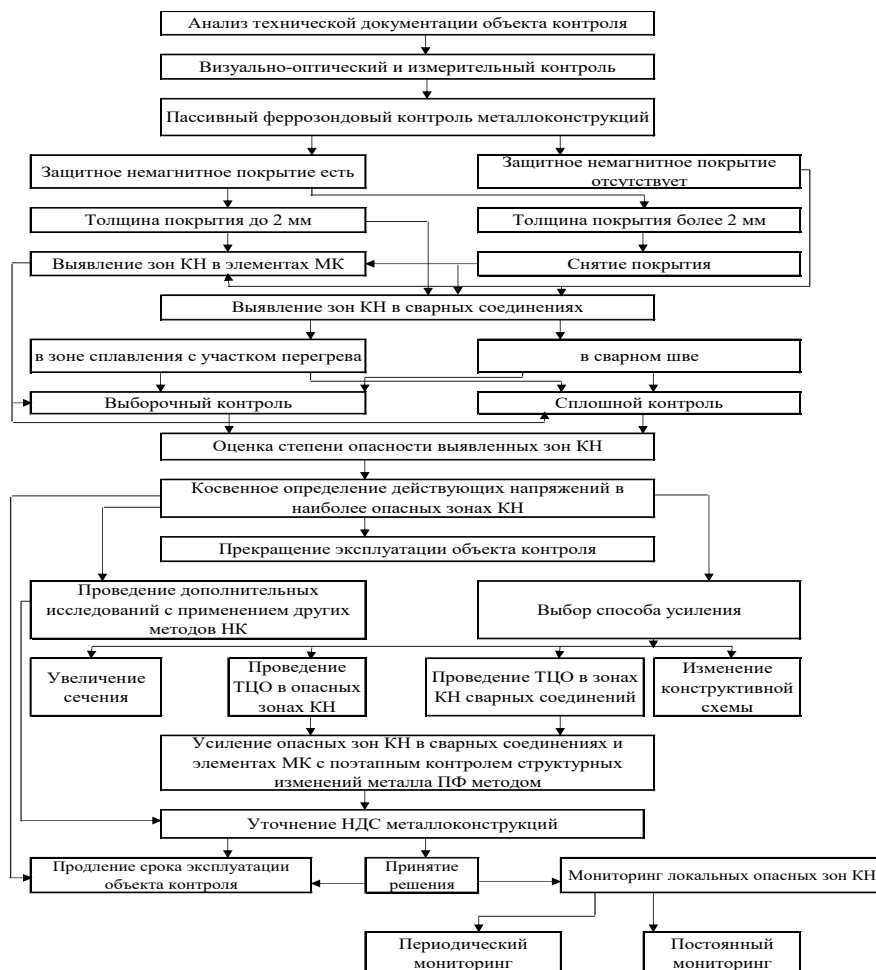


Рис. 12. Схема оценки и повышения прочности металла сварных конструкций строительных машин

Разработанная методика обладает достаточно высокой производительностью и эффективностью и предусматривает применение в совокупности с другими разрушающими и неразрушающими методами пассивного феррозондового метода, обладающего высокой чувствительностью и производительностью контроля и позволяющего проводить исследования без удаления немагнитного защитного покрытия толщиной до 2-ух мм и необходимости предварительной подготовки поверхности, что особенно актуально для сварных соединений. Методика включает этапы выявления и оценки степени опасности локальных зон КН в зонах сварных соединений (сварной шов, зона сплавления с прилегающим участком перегрева, зона полной перекристаллизации, основной металл) и в труднодоступных местах элементов и узлов металлоконструкций, а также этап косвенного определения величин действующих напряжений (в случае необходимости и для использования в прочностных расчетах) по характеру и величине приращения контролируемого магнитного параметра и виду петли магнитного гистерезиса.

В том числе методика направлена на выявление ослабленных локальных зон КН, требующих дополнительных исследований по поиску и контролю развития дефектов, установки мест закрепления датчиков магнитного или тензометрического мониторинга, что существенно повышает достоверность результатов оценки фактического технического состояния.

К зонам контроля и диагностики, требующим пристального внимания, следует отнести все зоны, в которых фактические напряжения выше расчетных, и зоны с зафиксированными случаями прошедшей пластической деформации. В таких

случаях могут быть даны рекомендации по повышению прочности в указанных зонах за счет применения ТЦО по разработанным режимам, что позволит обеспечить оптимальную мелкозернистую структуру, обладающую повышенными прочностными свойствами, а также повысить прочность металла во всех зонах сварных соединений, близких к ослабленной. При этом для достижения цели снижения структурной и механической неоднородности в контролируемых зонах, степень дисперсности формируемой структуры можно предварительно рассчитать по уравнению Холла-Петча.

На основе анализа литературных источников и данных экспериментальных исследований даны рекомендации по проведению постоянного и периодического магнитного мониторинга в опасных зонах КН сварных соединений МК строительных машин, эксплуатируемых в условиях воздействия коррозионных сред, различных нагрузок и температур.

Разработанная методика оценки и повышения прочности сварных металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД СПбГАСУ 004-16-01 была апробирована при проведении технического диагностирования металлических конструкций подъемно-транспортных машин и оборудования в рамках экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов (ИЭП – АО «РАТТЕ», 2016). Расчет экономической эффективности применения разработанной методики при диагностировании и ремонте стрелы башенного крана КБ-408 показал эффект в размере 321,6 тыс. руб.

Заключение

В диссертационной работе изложено решение научно-практической задачи оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций, имеющей существенное значение в области обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации строительных машин.

Тем не менее, значительное многообразие факторов, влияющих на процессы коррозионного износа, кардинального изменения физико-механических свойств металла в сварных соединениях, обладающих структурной и механической неоднородностью, требует проведения отдельных дополнительных комплексных исследований, что в совокупности позволит повысить степень достоверности результатов исследований.

Общие выводы

1. Установлена взаимосвязь между действующими напряжениями, параметром магнитного контроля и структурой металла сварных соединений из конструкционных ферромагнитных сталей с положительной константой магнитострикции в условиях циклического упругопластического деформирования с учетом химического состава и исходной структуры (крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная).

Получен ряд характерных графических и аналитических зависимостей, применимых в практике контроля и мониторинга в локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин.

2. Выявлено влияние степени холодной пластической деформации на структурные изменения и механические свойства металла в различных зонах сварных

соединений (основной металл, зона термического влияния, сварной шов) с применением пассивного феррозондового метода, которая позволяет повысить достоверность оценки технического состояния сварных металлоконструкций, особенно в тех зонах КН, где проходит или прошла пластическая деформация.

3. Разработаны оптимальные режимы получения мелкозернистых структур металла с высокой степенью дисперсности для повышения прочностных свойств металла в различных зонах сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния) за счет измельчения исходной структуры в процессе термоциклической обработки, контролируемой магнитным методом.

Установлено, что в зонах с прошедшей в них пластической деформацией формируется более мелкозернистая структура по сравнению со структурами без прохождения пластической деформации.

Показано, что увеличение степени пластической деформации до 50 % позволяет получить структуру с максимальной степенью дисперсности и прочности металла, снизить структурную неоднородность и максимально приблизить прочность металла зон сварного соединения к прочности основного металла.

Показано, что термоциклическая обработка по разработанным режимам позволяет снизить структурную неоднородность сварного соединения, повысить равнопрочность металла в различных зонах и прочностные свойства металла в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений на 12...15 %.

4. Разработана и апробирована методика оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД СПбГАСУ 004–16–01, позволяющая в сварных соединениях значительно снизить структурную и механическую неоднородность и обеспечить равнопрочность зон сварных соединений, что способствует обеспечению долговечности, надежности и безопасности эксплуатации, повышению эффективности и производительности диагностики технического состояния, а также снижению материальных затрат на эксплуатацию и ремонт на 15...18 %.

5. Рассмотрены вопросы применения диагностического мониторинга и даны рекомендации по проведению постоянного и периодического магнитного мониторинга в выявленных локальных зонах КН сварных соединений металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин в условиях воздействия коррозионных сред, различных нагрузок и температур.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Березина, А.А.** Влияние структурной неоднородности металла сварных соединений металлоконструкций строительных машин на магнитные свойства / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, А.А. Березина // Вестник гражданских инженеров. – 2014. - № 6 (47). – С. 188-194. (0,4/0,1 п.л.).

2. **Березина, А.А.** Влияние структурно-чувствительных параметров металла на магнитные свойства сварных металлоконструкций строительных машин / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, А.А. Березина // Вестник гражданских инженеров. – 2015. - № 2 (49). – С. 140-149. (0,6/0,2 п.л.).

3. **Березина, А.А.** Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин / А.А. Березина // Вестник гражданских инженеров. – 2015. - № 4 (51). – С. 123-127. (0,4/0,4 п.л.).

4. **Березина, А.А.** Особенности усиления металла в опасных зонах концентрации напряжений сварных соединений сварных МК / А.А. Березина // Вестник гражданских инженеров. –

2015. - № 5 (52). – С. 203-206. (0,25/0,25 п.л.).

5. **Абросимова, А.А.** Влияние холодной пластической деформации на структурную неоднородность сварных соединений металлических конструкций строительных машин / В.Е. Гордиенко, А.А. Абросимова, Е.В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. - № 1 (54). – С. 127-131. (0,4/0,1 п.л.).

6. **Абросимова, А.А.** Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин / В.Е. Гордиенко, А.А. Абросимова, Е.В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2016. - № 2 (55). – С. 174-180. (0,4/0,1 п.л.).

7. **Абросимова, А.А.** Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями / В.Е. Гордиенко, Е.В. Трунова, А.А. Абросимова, Н.В. Шананина // Вестник гражданских инженеров. – 2016. - № 3 (56). – С. 193-197. (0,4/0,1 п.л.).

8. **Абросимова, А.А.** Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций / В.Е. Гордиенко, Е.В. Трунова, Е.А. Корнеева, А.П. Щербаков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. - № 6 (59). – С. 126–130. (0,3/0,1 п.л.).

9. **Абросимова, А.А.** Некоторые особенности оценки достоверности выбранных математических моделей при расчете сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями / В.Е. Гордиенко, Е.В. Трунова, В.И. Новиков, О.В. Кузьмин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. - № 1 (60). – С. 210-213. (0,2/0,1 п.л.).

Монографии

10. **Березина, А.А.** Техническое диагностирование сварных металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин: монография / В.Е. Гордиенко, А.А. Березина // – СПб.: [СПбГАСУ], 2015. – 244 с. (15/7,5 п.л.).

Публикации в других изданиях

11. **Березина, А.А.** Особенности пассивного феррозондового контроля элементов МК с немагнитным защитным покрытием / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, А.А. Березина // Актуальные проблемы строительства: 70-я науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-т: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2014. – С. 129-130. (0,1/0,03 п.л.).

12. **Березина, А.А.** Влияние структурной неоднородности сварных соединений на магнитные свойства металла сварных МК / В.Е. Гордиенко, А.А. Березина // Актуальные проблемы строительства: 68-я Междунар. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2015. – С. 126–130. (0,3/0,1 п.л.).

13. **Березина, А.А.** К оценке влияния холодной пластической деформации и ТЦО на структуру и свойства сварных соединений металлических конструкций / А.А. Абросимова, В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко // Актуальные проблемы строительства: 71-ая науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-т: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2015. – С. 28–31. (0,25/0,1 п.л.).

14. **Абросимова, А.А.** Контроль и повышение несущей способности сварных металлических конструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации / А.А. Абросимова, В.Е. Гордиенко // Актуальные проблемы современного строительства: 69-ая межвуз. науч.-практич. конфер. с участием студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2016. – с. 126–130. (0,3/0,1 п.л.).

15. **Абросимова, А.А.** Некоторые особенности влияния дефектов на работоспособность сварных соединений металлоконструкций / А.А. Абросимова, В.Е. Гордиенко // Актуальные проблемы строительства: 72-ая науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-т: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2016. – С. 126–130. (0,3/0,1 п.л.).