

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-  
строительный университет (СПбГАСУ)»**

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф. Гордиенко В.Е.

Санкт-Петербург – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА</b> .....	13
1.1. Проблема обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных металлоконструкций строительных машин .....	13
1.2. Особенности сварных металлоконструкций строительных машин .....	16
1.3. Характеристика и отличия зон сварных соединений, обладающих структурной и механической неоднородностью.....	23
1.4. Дефекты сварных соединений .....	27
1.5. Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений.....	36
1.6. Оценка технического состояния сварных металлоконструкций строительных машин .....	39
1.7. Методы и методики диагностики состояния металла сварных конструкций в процессе длительной эксплуатации .....	42
1.8. Восстановление работоспособности сварных металлических конструкций усилением .....	45
Выводы по главе 1 .....	48
<b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ</b> .....	49
2.1. Обоснование и выбор конструкционных сталей .....	49
2.2. Разработка методики механических испытаний лабораторных и сварных образцов.....	52
2.3. Разработка методики измерения микротвердости .....	53
2.4. Разработка методики металлографического анализа .....	57
2.5. Разработка методики пассивного феррозондового контроля .....	61
2.6. Разработка методики термической обработки .....	72
2.7. Разработка методики получения структур металла с высокими прочностными свойствами .....	72
2.8. Полный факторный эксперимент и его интерпретация.....	76
Выводы по главе 2 .....	84

<b>ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ</b> .....	85
3.1. Обоснование необходимости получения мелкозернистых структур в конструкционных сталях .....	85
3.2. Оценка степени опасности различных зон сварных соединений в процессе упругого циклического деформирования .....	87
3.3. Разработка оптимальных режимов термоциклической обработки для снижения структурной неоднородности сварных соединений .....	100
3.4. Влияние ТЦО на повышение прочностных свойств конструкционных сталей в различных зонах сварных соединений .....	111
3.5. Определение действующих напряжений в конструкционных сталях с различной исходной структурой в процессе упругопластического деформирования .....	115
3.6. Влияние холодной пластической деформации на структурную неоднородность металла различных зон сварных соединений .....	123
3.7. Особенности влияния ТЦО на равнопрочность зон деформированных сварных соединений .....	128
Выводы по главе 3.....	135
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН</b> .....	137
4.1. Особенности выбора методов и методик контроля при оценке технического состояния сварных металлоконструкций.....	137
4.2. Особенности выявления локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях .....	139
4.3. Режимы термоциклической обработки сварных соединений металлоконструкций строительных машин .....	145
4.4. Разработка методики оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации .....	149
4.5. Рекомендации по проведению периодического и постоянного магнитного мониторинга сварных соединений .....	157
Выводы по главе 4.....	160
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	161
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	164
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	174

## ВВЕДЕНИЕ

**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., Бардышев О.А., Вершинский А.В., Волков С.А., Гохберг М.М., Евтюков С.А., Коровин С.К., Куркин С.А., Лившиц В.Л., Липатов А.С., Попов В.А., Соколов С.А., Уралов В.Л. 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 Бакши 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 Бакши 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 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.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии методов и методик оценки и повышения прочности сварных конструкций строитель-

ных 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 техниче-

ского 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 19,5 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.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

### 1.1. Проблема обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных металлоконструкций строительных машин

В процессе изготовления и эксплуатации в сварных соединениях металлоконструкций возникают дефекты, формирующие локальные зоны концентрации напряжений, результатом развития которых могут явиться трещины, значительно снижающие работоспособность и являющиеся основным фактором разрушения металлоконструкции. Обнаружение таких дефектов и локальных зон концентрации напряжений на ранних стадиях их развития представляет собой непростую практическую задачу вследствие незначительности их размеров и недостаточности развития методик, методов и средств контроля и диагностики.

Эта задача тесно связана с оценкой надежности сварных МК. Одним из основных свойств, определяющих надежность сварных металлических конструкций, является безотказность работы их элементов, то есть способность сохранять заданные эксплуатационные свойства в течение длительного срока службы [47].

Надежность и работоспособность сварных МК определяются как различными видами эксплуатационных нагрузок, так и действующими напряжениями, возникающими в сварных соединениях металлических конструкций в ходе изготовления [86]. Кроме того, надежная информация о величине и распределении действующих напряжений, чаще всего, отсутствует, поэтому фактическое состояние НДС металла сварной МК может не соответствовать принятой в расчете, что вносит некоторые трудности при проведении различных операций по повышению надежности сварных МК как при длительной эксплуатации, так и реконструкции и ремонте [12].

Следует отметить, что *надежность* в зависимости от назначения несущей металлоконструкции и условий ее применения включает *безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость*, или некоторые сочетания этих свойств, что в большей степени зависит от вида эксплуатируемой конструкции.

Надежность - это "свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортировки" [46].

Если конструкция является возможным источником опасности, что весьма важно для строительных машин, то определяющим понятием является "безопасность". *Безопасность* – это "свойство объекта при изготовлении и эксплуатации, а также в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей и для окружающей среды". В общем случае безопасность не относится к общему понятию надежности, но в некоторых случаях может быть связана с этим понятием, например, тогда, когда возникающие отказы могут привести к таким условиям, которые будут вредны для людей и окружающей среды выше допустимых норм.

Для строительных машин, работающих в тяжелых условиях, весьма важным является такое свойство надежности, как безотказность, которая закладывается на стадиях исследования, проектирования, изготовления машины и обеспечивается, например, приборами ограничения грузоподъемности, грузового момента, а также муфтами предельного крутящего момента. Недостаточная надежность частично компенсируется таким качеством, как ремонтпригодность [6].

Следует отметить, что обеспечение надежности сварных металлических конструкций является значительной проблемой при наличии сварных соединений, обладающих структурной и механической неоднородностью в сварном шве и зоне термического влияния. Дефекты, приводящие к разрушению металлоконструкций, весьма разнообразны. Во-первых, это дефекты, возникающие при изготовлении сварных конструкций на разных стадиях технологического процесса, например, сварки (непровар, трещины, поры и т.д.), эксплуатации (усталостные трещины, коррозионные повреждения и т.д.). Их появление, а также наличие действующих концентраторов напряжений, таких, как резкие переходы от одного элемента к другому, от сварного шва к основному металлу, в значительной степени способствуют снижению надежности сварного соединения. Присутствие дефектов мо-

жет приводить к нарушению герметичности, прочности и других характеристик, к разрушению сварных швов или всей конструкции в целом. Во-вторых, отрицательное влияние различных дефектов сказывается и при статическом нагружении при неблагоприятном сочетании с остаточными действующими напряжениями, в течение работы в агрессивных средах и низких температурах. Значительное влияние несплошности различного рода показывают при работе сварных конструкций под действием усталостной нагрузки. При этом даже небольшой дефект или локальная зона концентрации напряжений может инициировать зарождение трещины и привести к разрушению конструкции.

Одной из важных проблем длительно эксплуатируемых металлических конструкций является структурная, а, следовательно, и механическая неоднородность сварных соединений в сварном шве, зоне сплавления, участке перегрева и основном металле. Эта проблема становится все более насущной из-за усложнения работы сварных конструкций, интенсивности их длительной эксплуатации, расширением номенклатуры конструкционных сталей, в том числе высокопрочных.

Под механической неоднородностью сварных соединений понимается различие механических характеристик (прежде всего предела текучести) металла различных его зон и участков [1].

В связи с вышесказанным задача выявления фактического технического состояния сварных соединений и элементов сварных металлических конструкций, оценка их НДС и дальнейшее прогнозирование надежной эксплуатации является одной из основных в процессе обследования и испытания длительно эксплуатируемых сварных МК строительных машин. [95]. С целью предотвращения аварий и их неблагоприятных последствий с недавних пор повышаются требования к проведению неразрушающего контроля технического состояния металлических конструкций в рамках системы экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов [79].

## 1.2. Особенности сварных металлоконструкций строительных машин

Большое разнообразие строительных машин не позволяет разработать их четкую классификацию, но позволяет осуществить разбивку на укрупненные группы. При этом наибольший интерес представляет разделение машин по их назначению. Однако при таком разделении в одной группе могут оказаться совершенно не схожие машины, как по принципу действия, так и по внешнему виду, тогда как в различных группах могут оказаться внешне похожие машины, но отличающиеся по их применению.

По технологическому назначению строительные машины подразделяются на следующие основные группы [6]:

- машины для земляных работ;
- грузоподъемные машины и механизмы;
- транспортирующие машины;
- погрузо-разгрузочные машины;
- машины непрерывного транспорта;
- машины для подготовительных работ;
- машины для свайных работ;
- машины для содержания и ремонта дорог;
- машины и оборудование для изготовления сборных и монолитных железобетонных конструкций и другие группы.

Каждую группу можно разделить на подгруппы. Так, например, в группе машин для земляных работ - это экскаваторы, бульдозеры, скреперы. В подгруппах машины разных типов отличаются друг от друга конструкцией узлов или машин в целом (экскаваторы с прямой или обратной лопатой, траншейные роторные или цепные, с поперечным копанием, шагающие). Кроме того, все типы машин имеют ряд типов размеров, близких по конструкции, но с различающимися отдельными параметрами (емкость ковша, размеры, производительность, мощность, масса).

Рассмотрим типичные сварные металлические конструкции строительных машин.

**1. Машины для земляных работ** – одноковшовые и многоковшовые экскаваторы, бульдозеры, скреперы, автогрейдеры, машины для проходки

тоннелей и гидромеханизации.

Все указанные строительные машины имеют значительное количество сварных МК ферменного строения. В качестве примера на рис. 1 показаны траншейные экскаваторы: цепной траншейный экскаватор (рис. 1, *а*); роторный многоковшовый поперечного копания экскаватор (рис. 1, *б*) со сварными ферменными металлоконструкциями.

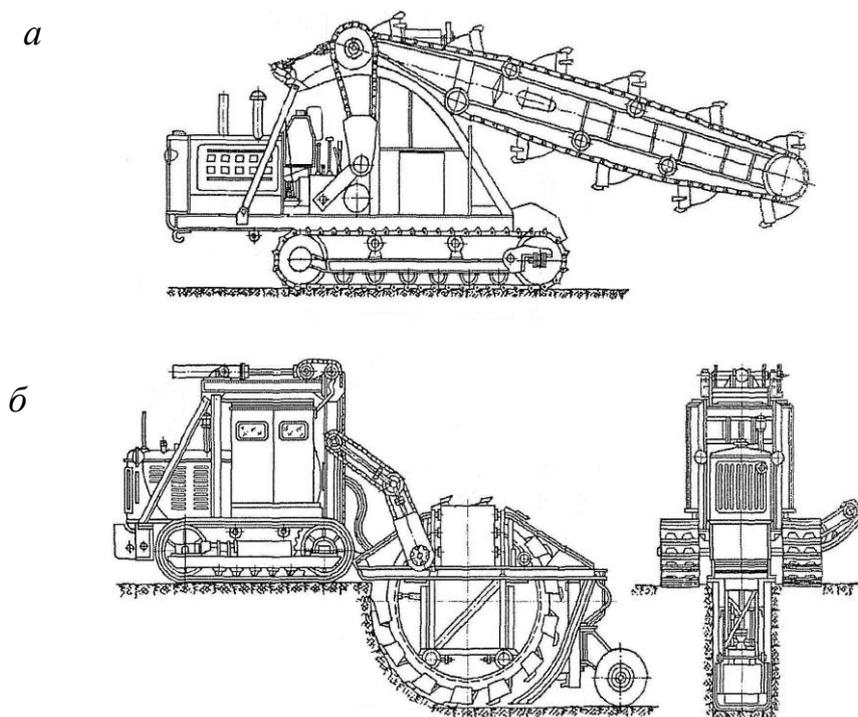


Рис.1. Траншейные экскаваторы: *а* – цепной траншейный;  
*б* – роторный многоковшовый поперечного копания

**2. Грузоподъемные машины и механизмы – грузоподъемные краны, подъемники, лебедки, домкраты.**

Эти машины находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Так мачтовые строительные подъемники (грузовые, грузопассажирские) широко применяются в строительном производстве. Сварные металлоконструкции мачт подъемников обычно имеют решетчатые прямоугольное и треугольное сечения с одной или двумя направляющими для роликов грузонесущего органа.

На рис. 2 приведены строительные башенные краны (стационарные, самоподъемные, передвижные) – являющиеся ведущими строительными грузоподъемными машинами в жилищном и гражданском строительстве.

Сварные металлоконструкции башен и стрел кранов обычно выполняют решетчатыми или сплошными трубчатыми.

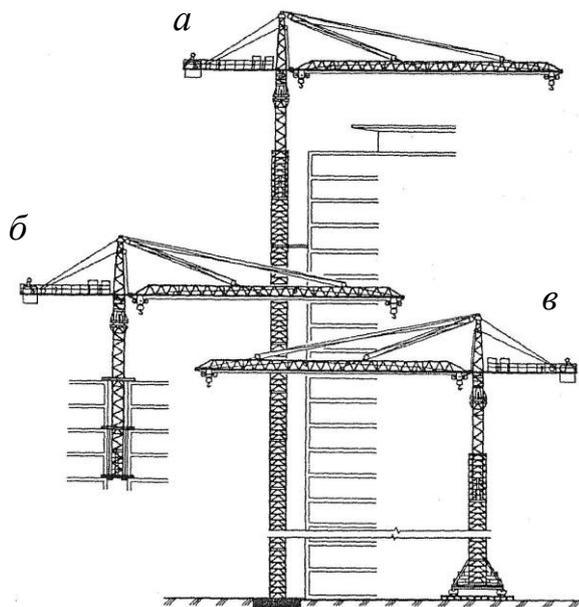


Рис. 2. Строительные башенные краны: *a* – стационарные; *б* – самоподъемные; *в* – передвижные

При проведении строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ используются стреловые самоходные краны, среди которых один из наиболее распространенных – гусеничный кран в стреловом и башенно-стреловом исполнении показан на рис. 3.

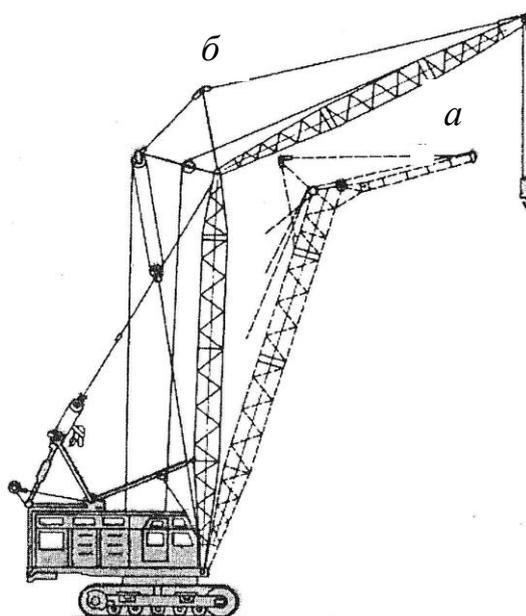


Рис. 3. Гусеничный кран: *a* – стреловое исполнение; *б* – башенно-стреловое исполнение

Сменное рабочее оборудование стреловых самоходных кранов показано на рис. 4, где его основными видами являются не выдвигаемая (жесткая) и выдвигаемая решетчатые стрелы, а также телескопическая стрела с одной или несколькими выдвигаемыми секциями для изменения их длины.

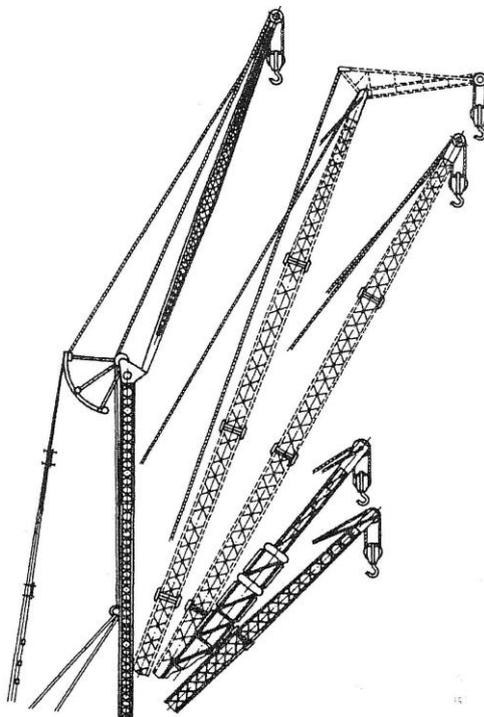


Рис. 4. Сменное рабочее оборудование стреловых самоходных кранов

В строительстве для монтажных и погрузочно-разгрузочных работ применяются козловые краны.

Мосты кранов небольшой грузоподъемности (до 5 тн) производят в виде трехпоясной пространственной фермы и балки двутаврового профиля, позволяющей передвигаться по ней электротали. Для мостов кранов средней и большой грузоподъемности МК выполняют в виде четырехпоясных решетчатых ферм прямоугольного или трапецеидального сечения. Мосты кранов выполняются с консолями и без них. При этом тележка вспомогательного проема может перемещаться по всей длине пролетного строения. Если пролеты большие, то одна из сварных металлических опор крана жестко соединяется с мостом, а другая шарнирно.

Наличие шарнирной опоры позволяет устранять опасность заклинивания ходовых тележек при повышении температуры или каком-либо изменении положения подкрановых путей. Если опоры небольшие, то обе опоры могут быть жесткими.

**3. Транспортирующие машины** – тягачи, автомобили, тракторы, прицепы и др.

Транспортирующие машины находят широкое применение в строительстве. Для них характерно наличие большого числа сварных металлических конструкций. Так на базе колесных тягачей, используя различное сменное сварное оборудование, возможно создание многих строительных и дорожных машин (рис. 5).

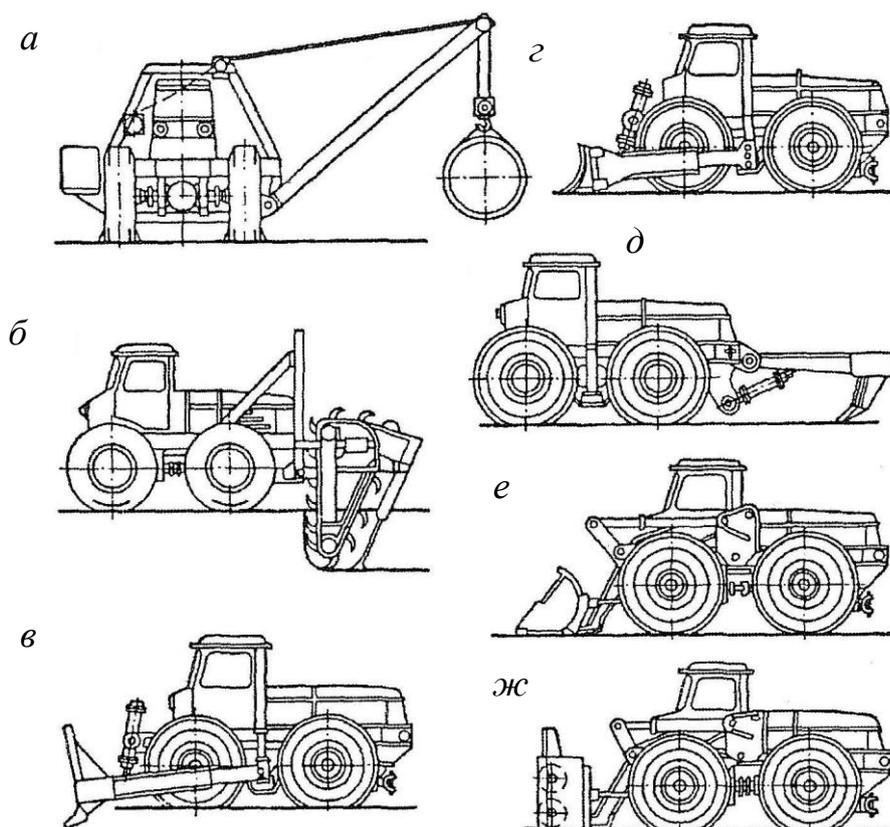


Рис. 5. Сменное оборудование двухосного пневмоколесного тягача:  
*a* – кран-трубоукладчик; *б* – траншеекопатель; *в* – корчеватель; *г* – бульдозер;  
*д* – рыхлитель; *е* – погрузчик; *ж* – шнекороторный снегоочиститель

#### **4. Погрузо-разгрузочные машины**

В качестве примера на рис. 6 приведены строительные погрузчики непрерывного действия, имеющие в своем строении сварные металлические конструкции.

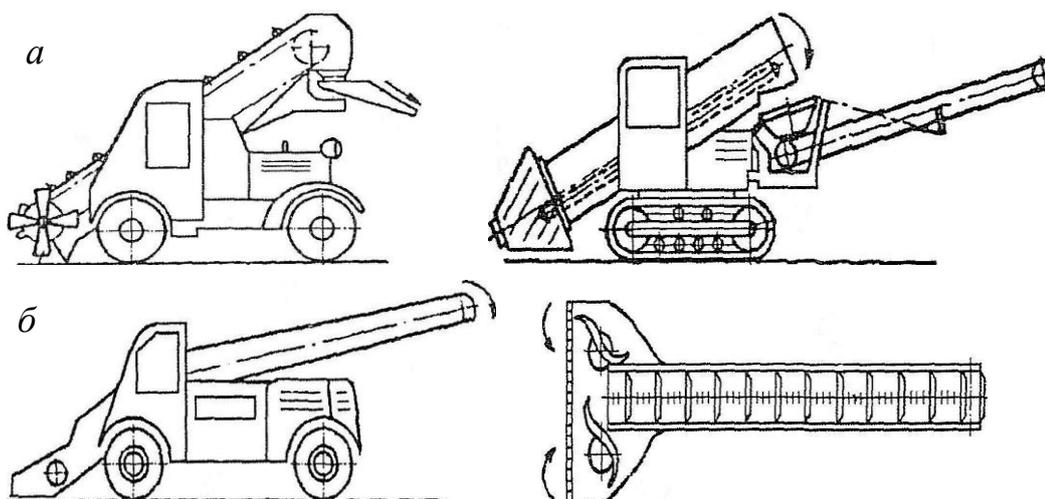


Рис. 6. Схемы погрузчиков непрерывного действия:

*а* – элеваторный с лопастным шнековым питателем; *б* – ленточный с шаровой лопатой

**5. Машины непрерывного транспорта** – конвейеры, пневматический и гидравлический транспорт, элеваторы.

На рис. 7 показаны ленточные конвейеры для перемещения сыпучих, мелкокусковых и штучных грузов. Основной частью ленточного конвейера является сварная металлическая рама, на которой установлены роlikоопоры рабочей и холостой ветвей ленты [109].



Рис. 7. Передвижные ленточные конвейеры

Проведенный анализ строения строительных машин показал, что, несмотря на значительные различия, строительные машины имеют между собой много общего:

- подавляющее количество сварных металлоконструкций строительных машин имеют ферменное или рамное строение;

- сварные металлоконструкции СМ имеют большое количество сварных соединений и представляют собой чаще всего сложные сварные металлоконструкции из уголкового, пустотелого прямоугольного или трубчатого проката;
- наличие в металлических конструкциях в качестве основных стыковых, угловых и тавровых сварных соединений, которым присущи типичные места образования трещин;
- наличие в сварных металлоконструкциях ряда тяжело нагруженных узлов, в которых при определенных условиях (ударные, динамические и циклические нагрузки и другие) могут возникать опасные локальные зоны КН, в части которых прошла или проходит местная пластическая деформация;
- наличие опасных зон концентрации напряжений в сплошных конструкциях коробчатого и трубчатого профилей за счет образования локальных и общих мест коррозионных повреждений;
- очагами развития коррозии и образования локальных зон концентрации напряжений в сварных металлоконструкциях строительных машин являются различные полости, карманы, щели, возникающие при сварке прерывистыми швами, болтовые и заклепочные соединения, закрытые полости, концевые балки, места скопления влаги;
- применение малоуглеродистых и низколегированных сталей, обладающих хорошей свариваемостью для изготовления металлических конструкций и оборудования, выполняющего рабочие операции, что позволяет распространять полученные результаты исследований сварных металлоконструкций строительных машин на их различные типы;
- использование для изготовления сварных МК строительных машин ферромагнитных сталей, что дает возможность комплексно применять различные неразрушающие методы магнитного контроля, в том числе и пассивный феррозондовый метод, используемый в данной работе как при изготовлении, монтаже, так и в процессе эксплуатации, и при ремонте строительных машин.

### 1.3. Характеристика и отличия зон сварных соединений, обладающих структурной и механической неоднородностью

Проведенный анализ показал, что около 90 % металлических конструкций сварные, поэтому надежность и безопасность эксплуатации сварных металлоконструкций в большей степени зависит от состояния сварного соединения, обладающего структурной и механической неоднородностью.

В соответствии с [45] *сварка* – это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

Согласно [44] *сварное соединение* – неразъемное соединение, выполненное сваркой, которое включает в себя сварной шов, зону термического влияния и основной металл, не претерпевший никаких изменений. *Сварной шов* – участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла или в результате пластической деформации при сварке давлением, или сочетания кристаллизации и деформации. *Зона термического влияния* – участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке или наплавке, то есть это участок между условной границей сплавления и основным металлом, подвергшийся нагреву свыше 100 °С в процессе сварки. При этом ширина зоны термического влияния зависит от термического цикла сварки.

В зоне термического влияния сварных соединений из малоуглеродистых и низколегированных сталей в соответствии с диаграммой состояния железо-углерод различают зону сплавления, участок перегрева, участок полной перекристаллизации, зону частичной перекристаллизации, зону высокотемпературного отпуска, зону низкотемпературного отпуска и механического влияния (рис. 8). За зоной термического влияния находится основной металл, не претерпевший никаких изменений.

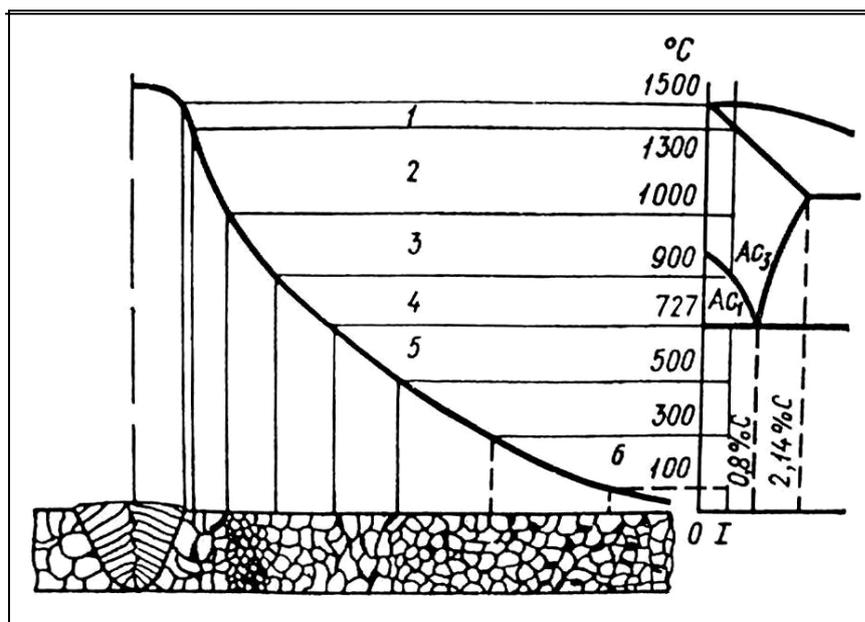


Рис. 8. Схема строения сварного соединения при сварке стыкового шва:

- 1 – зона сплавления; 2 – участок перегрева; 3 – участок полной перекристаллизации;  
 4 – зона частичной перекристаллизации; 5 – зона высокотемпературного отпуска;  
 6 – зона низкотемпературного отпуска и механического влияния

Участок неполного расплавления (зона сплавления) является переходным от литого металла сварного шва к основному металлу и представляет собой узкую область в зависимости от толщины (0,1...0,4 мм) основного металла.

Участок перегрева – область металла, в которой максимальные температуры при нагреве составляют 1100 °С и более, в этой области после охлаждения ниже  $A_{c1}$  формируется крупнозернистая ферритно-перлитная (или даже мартенситная) структура с пониженной пластичностью.

Температура участка нормализации (полной перекристаллизации) соответствует нагреву в аустенитную область до температур 900...1100 °С и перекристаллизации при охлаждении ниже  $A_{c1}$  в мелкозернистую ферритно-перлитную структуру. Такая структура обладает высокими прочностными и пластическими свойствами, так как фазовое превращение проходит из мелкозернистого аустенита, который не подвергался перегреву.

Температура участка неполной перекристаллизации находится в пределах 723 до 900 °С. Поэтому, в связи с ограниченной длительностью и температурой нагрева, структура металла включает смесь мелких перекристаллизовавшихся зерен и не перекристаллизовавшихся крупных зерен феррита

и перлита. Вследствие чего свойства металла данного участка ниже, чем участка нормализации.

Участок рекристаллизации появляется в случае сварки сталей, подвергшихся пластической деформации, например, ковке, прокатке, штамповке. Нагрев металла до температуры 450...725 °С в этой области основного металла приводит к рекристаллизации, последующему росту зерна, огрублению структуры металла и его разупрочнению [110].

В металле, нагреваемом до температуры 1000...450 °С, обычно протекают процессы возврата и старения стали в связи с выпадением карбидов и нитридов железа. Результат этого – понижение пластичности, ударной вязкости и сопротивления хрупкому разрушению.

Следовательно, металл зоны термического влияния отличается как неоднородностью фазового и структурного состава, так и неоднородностью механических свойств. Ширина зоны термического влияния зависит от толщины металла, вида и режима сварки. Например, при ручной дуговой сварке стальных листов толщиной 3 мм ширина околошовной зоны составляет обычно около 5 мм.

**Особенности сварных соединений.** Сварные соединения, обладающие структурной и механической неоднородностью, характеризуются рядом свойств. Для несущей способности наиболее важны такие механические свойства сварных соединений, как пластичность, прочность и ударная вязкость, то есть их способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних сил. Высокая работоспособность сварных металлоконструкций во многих случаях зависит от механических свойств сварных соединений, реже – от их химических или физических свойств [99].

Свойства сварных соединений значительно отличаются от свойств основного металла, так как на них влияют многочисленные факторы:

- химический состав конструкционных сталей;
- различные сварочные материалы (электроды, флюсы);
- воздействие источников энергии, электрической дуги;
- сложные процессы плавления и кристаллизации металла в процессе плавки, взаимодействие его с жидкими и газовыми компонентами;
- структурные и фазовые превращения в конструкционных сталях

под действием изменяющихся температур;

- возникновение разного рода несплошностей при сварке, термо- и механической обработках, в процессе длительной эксплуатации МК.

Таким образом, учитывая большое число различных факторов, свойства сварных соединений могут изменяться в довольно широких пределах. При этом следует отметить характерные особенности структуры и механических свойств сварных соединений по сравнению с основным металлом:

- высокая неоднородность структуры и свойств отдельных участков и зон сварного соединения (литая структура в сварном шве, крупнозернистая в зоне сплавления и участке перегрева, более мелкозернистая в зоне полной перекристаллизации);

- более высокое рассеяние прочностных и пластических свойств металла в различных зонах и участках сварного соединения;

- большое число различных форм сварных соединений и большая возможность образования дефектов сплошности при сварке определяет высокую концентрацию остаточных напряжений и образование локальных зон КН;

- наличие в сварных соединениях высоких остаточных сварочных напряжений.

Остаточные сварочные напряжения сами по себе не способны изменить свойства металла, однако в некоторых случаях они могут существенно влиять на механические свойства сварного соединения в целом, когда возникает взаимодействие остаточных напряжений с действующими эксплуатационными.

Учитывая вышесказанное, механические свойства сварных соединений зависят от прочностных и пластических свойств металла разных его участков и зон, вида сварного соединения, остаточных сварочных напряжений и ряда других факторов. При этом следует учитывать наличие различных дефектов в сварных соединениях, таких, как трещины, подрезы, непровары, поры, неметаллические включения и их негативное влияние на механические свойства металла сварных конструкций.

Поэтому для выявления дефектов и зон концентрации напряжений в сварных соединениях неразрушающими методами контроля, и, в частности,

пассивным феррозондовым методом, необходимо знание особенностей формирования дефектов в сварном соединении, возникновения опасных локальных зон КН для оценки фактического НДС сварных МК с учетом структурной и механической неоднородности сварных соединений, а также повышения прочностных свойств металла в опасных зонах КН и участках сварных соединений.

#### 1.4. Дефекты сварных соединений

Согласно [44] *дефект* – это каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативно-технической документации (НТД). Весьма часто дефектные места становятся очагами разрушения сварных металлоконструкций, вследствие чего требуют обнаружения и их устранения.

Дефекты подразделяются на следующие группы:

- во-первых, это производственно-технологические дефекты, такие как литейные, металлургические, после прокатки и т. д.;
- это технологические дефекты, которые возникают в процессе изготовления и ремонта металлических конструкций и оборудования (при сварке, механической, термической и других видах обработки);
- это эксплуатационные дефекты, которые возникают в процессе длительной эксплуатации металлоконструкций различного оборудования и строительных машин, коррозии, износа и т. д., а также при неправильном техническом обслуживании МК [24].

К наиболее опасным дефектам, возникающим на разных стадиях технологического процесса, относятся:

- дефекты, возникающие в процессе плавки и литья металла (раковины, поры, трещины, неметаллические включения и другие);
- дефекты обработки металлов давлением (поверхностные и внутренние трещины, расслоения различного рода, флокены, закаты и другие);
- дефекты, возникающие при термической и химико-термической обработке (ХТО) (трещины, возникающие в процессе фазовых превращений, термические трещины и т.д.);

- в процессе механической обработки (трещины, прижоги и т.д.);
- при сварке (подрезы, наплывы, поры, горячие и холодные трещины и т.д.);
- при длительной эксплуатации и хранении сварных МК (усталостные трещины, общие и локальные коррозионные повреждения) [23].

Основным техпроцессом, применяющимся при изготовлении сварных МК строительных машин, является сварка, поэтому надежность и безопасность сварных МК, в первую очередь, определяется качеством сварных соединений изготовленных металлоконструкций [9, 77, 103, 104], так как образование различных дефектов может привести к образованию структурной и механической неоднородности металла и других эксплуатационных характеристик, к разрушению сварных соединений при изготовлении, монтаже или длительной эксплуатации [30].

Образование различных дефектов в сварных соединениях металлоконструкций зависит как от правильности разработанной технологии сварки, качества исходных материалов, правильной подготовки стыков элементов МК под сварку, точности их сборки, профессиональной квалификации сварщика, технического состояния применяемой оснастки и оборудования, так и от условий длительной эксплуатации и других не менее важных факторов [81].

### **Классификация сварочных дефектов.**

При изготовлении сварных металлических конструкций различают дефекты подготовки и сборки элементов МК под сварку, а также дефекты сварки [38].

Основные сварочные дефекты можно разделить на две группы. В первую группу обычно входят дефекты формирования сварного шва: это несоответствие сварных швов заданным размерам, внешние и внутренние непровары, подрезы, прожоги, наплывы, натеки, кратеры и др. Появление вышеперечисленных дефектов связано, как правило, с нарушениями выбранной технологии сварки, нарушением правил сборки элементов МК под сварку, неисправностями применяемой оснастки и оборудования, низкой профессиональной подготовкой сварщиков и другими причинами.

Во вторую группу можно отнести дефекты, которые связаны с метал-

лургическими, термическими и гидродинамическими явлениями, возникающими при образовании, формировании и кристаллизации сварочной ванны, а также при остывании сварного шва и зоны термического влияния. К таким дефектам относятся горячие и холодные трещины в металле сварного шва и околошовной зоне, шлаковые и неметаллические включения, поры, зоны несплавления металла сварного шва с основным металлом, формирование структурной и механической неоднородности в сварном соединении.

В табл. 1 представлены основные виды дефектов сварного шва в соответствии с [48] и причины их возникновения.

### **Эксплуатационные дефекты.**

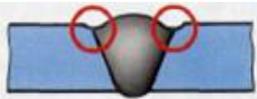
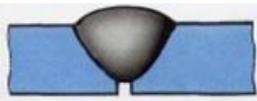
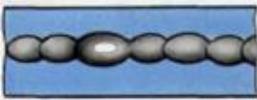
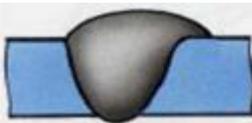
**Влияние различных условий длительной эксплуатации.** К таким условиям эксплуатации сварных МК строительных машин необходимо отнести внешние постоянные и переменные нагрузки, окружающую агрессивную среду, в которой работают сварные МК, и время, в течение которого ведется эксплуатация сварных МК и происходит действие всех вышеперечисленных факторов [58].

Следует отметить, что условия длительной эксплуатации сварных МК строительных машин влияют главным образом на выбор конструкционных сталей, тип сварного соединения, способ проводимой сварки и последующую термическую и механическую обработку сварных металлоконструкций. Значительное влияние на условия длительной эксплуатации сварных МК оказывают рабочие нагрузки.

Они могут быть созданы как внешними воздействиями (циклическими, статическими, динамическими, ударными), так и возникающими деформациями, например, при неравномерных нагревах элементов МК, структурных и фазовых превращениях металла.

Наиболее значительным по силе влияния является циклический характер внешних нагрузок на сварные МК, особенно при большом числе циклов.

В то же время, ударные нагрузки также относят к числу наиболее тяжело нагруженных режимов работы длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций строительных машин.

Дефекты сварных швов			
Наименование	Причина	Наименование	Причина
<p>Кратеры</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– неправильная сварка конечного участка сварного шва;</li> <li>– обрыв электрической дуги</li> </ul>	<p>Подрезы</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большая длина дуги;</li> <li>– высокий сварочный ток;</li> <li>– при изготовлении угловых швов электрод смещен в сторону вертикальной стенки</li> </ul>
<p>Поры</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– загрязненные кромки изделий;</li> <li>– влажные электроды;</li> <li>– высокая скорость охлаждения сварного шва;</li> <li>– большая скорость сварки</li> </ul>	<p>Непровар</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– небольшой угол скоса кромок изделий;</li> <li>– небольшой зазор между кромками;</li> <li>– значительная загрязненность кромок изделий;</li> <li>– высокая скорость сварки;</li> <li>– малый сварочный ток</li> </ul>
<p>Шлаковые включения</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– грязные кромки изделий;</li> <li>– высокая скорость сварки;</li> <li>– недостаточный сварочный ток</li> </ul>	<p>Прожоги</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– избыточный зазор между кромками изделий;</li> <li>– высокий сварочный ток при недостаточной скорости сварки;</li> <li>– плохо поджата медная подкладка и флюсовая подушка</li> </ul>
<p>Несплавления металла</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– недостаточная зачистка кромок изделий;</li> <li>– значительная длина электрической дуги;</li> <li>– весьма высокая скорость сварки;</li> <li>– малый сварочный ток</li> </ul>	<p>Неравномерная форма сварного шва</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– смещенное направление движения электрода;</li> <li>– прерывистый режим сварки</li> </ul>
<p>Наплывы металла</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокий сварочный ток;</li> <li>– длинная электрическая дуга;</li> <li>– неправильно выбран наклон электрода</li> </ul>	<p>Трещины</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая скорость охлаждения сварного соединения;</li> <li>– значительные напряжения в металле при жестком закреплении элементов конструкций;</li> <li>– высокое содержание серы или фосфора в металле</li> </ul>
<p>Свищи</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– недостаточная пластичность металла сварного шва;</li> <li>– наличие структур закалки;</li> <li>– образование сварочных напряжений от неравномерного нагрева металла</li> </ul>	<p>Перегрев металла</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокий нагрев металла в зоне термического влияния;</li> <li>– неправильный выбор величин тепловой мощности при сварке;</li> <li>– высокие значения мощности газового пламени или сварочного тока</li> </ul>

Многим конструкционным сталям присуща высокая чувствительность к увеличению скорости приложения внешних нагрузок при умеренно низких или даже положительных температурах, особенно при возникновении различных концентраторов напряжений, что предопределяет необходимость выбора конструкционной стали с возможностью проведения термической обработки до и после проведения сварки, а также неразрушающего контроля сварных соединений и основного металла.

Существенное влияние на механические характеристики конструкционных сталей оказывает температура. На рис. 9 показана зависимость прочностных свойств сталей от температуры двумя линиями: линией 1, характеризующей прочность гладкого образца, и линией 2, описывающей образец с острым надрезом. Кривая 2 в ее левой части относится к так называемой низкотемпературной хрупкости стали, в этом случае сталь очень чувствительна к концентрации напряжений. Там же, где хрупкость стали отсутствует, прочность гладкого и надрезанного образцов примерно одинакова. В процессе длительного действия температуры и внешней нагрузки возникает ползучесть металла, и прочность стали определяется пределом длительной прочности  $\sigma_{д.п.}$  (кривая 3). В этом случае прочность элементов МК, имеющих концентрацию действующих напряжений, определяется кривой 4.

Поэтому согласно рис. 9 наблюдаются три температурные области работы металлических конструкций: область I – низкотемпературная (она может простирается и в область положительных температур), область II, в которой хрупкость и ползучесть металла отсутствует, и область III, в которой рассматривается жаропрочность стали.

Область низких температур предъявляет определенные требования в случае выбора конструкционной стали из-за отрицательного проявления низкотемпературной хрупкости. При низких температурах (до  $-60...-80$  °С) имеется возможность обеспечить достаточно высокую работоспособность сварных металлоконструкций, если применять стали с невысокой степенью легирования. Для работы сварных металлоконструкций при умеренно низких температурах (до  $-20...-30$  °С) и соответствующих видах сварных соединений возможно применение дешевых конструкционных сталей.

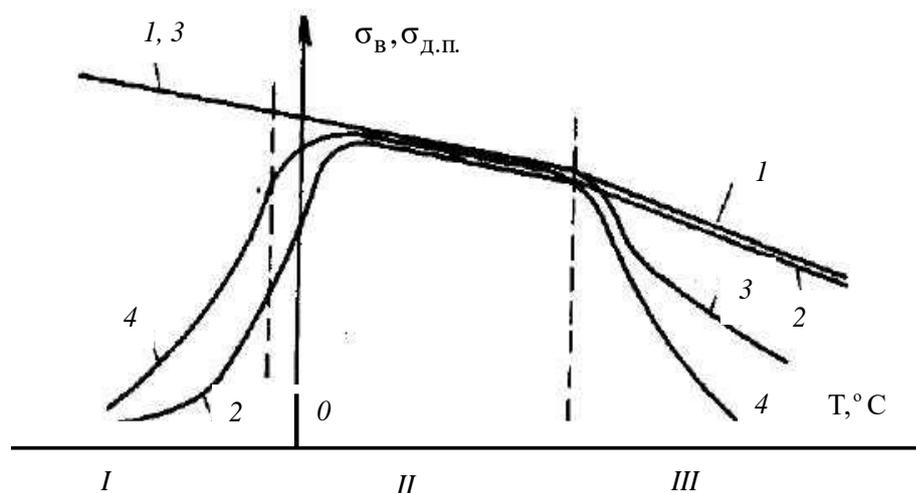


Рис. 9. Зависимость прочности металла от температуры: 1 – гладкий образец (кратковременное действие нагрузки); 2 – образец с надрезом (кратковременное приложение нагрузки); 3 – гладкий образец (длительное действие нагрузки); 4 – образец с надрезом (длительное приложение нагрузки)

Влияние рабочей окружающей среды также многообразно. Это влияние может давать отрицательные последствия даже при отсутствии внешних нагрузок, вызывая коррозионные повреждения элементов металлоконструкций, что при наличии действующих напряжений может привести к коррозионному растрескиванию металла и его усталости. Большое влияние на выбор конструкционной стали оказывает степень агрессивности коррозионной среды [85].

**Сварочные напряжения.** При осуществлении сварки в элементах МК возникают сварочные напряжения. Если их значения близки или достигают предела текучести, то говорят об образовании локальных зон концентрации напряжений, при более высоких напряжениях возможно прохождение пластической деформации, приводящей к изменению размеров и формы конструкции (короблению).

Сварочные остаточные напряжения вызываются не только упругопластическими деформациями при образовании сварных соединений, они возникают и в процессе нагружения конструкции при ее длительной эксплуатации, а также при наложении ремонтных сварных швов.

**Усталостные трещины.** Одним из распространенных эксплуатационных дефектов являются усталостные трещины, которые возникают в свар-

ных соединениях и элементах сварных МК под действием высоких переменных напряжений [10, 19].

Чаще всего они образуются в опасных зонах КН:

- в местах образования подрезов;
- в местах с резкими переходами сечений и элементов сварных металлоконструкций;
- в местах образования дефектов, связанных с термическими, металлургическими и термодинамическими явлениями;
- на поверхности элементов конструкции после механической обработки различного вида повреждений.

**Факторы, влияющие на процесс распространения трещины.** Основными факторами, влияющими на скорость распространения усталостных трещин в металлических конструкциях, являются:

- температура окружающей среды;
- степень агрессивного воздействия коррозионной среды на металлоконструкцию;
- геометрическая форма сварной МК и толщина ее стенок;
- циклическая нагрузка и скорость нагружения сварной металлоконструкции;
- напряженно-деформированное состояние металла элементов сварной металлоконструкции;
- механические свойства конструкционных сталей, исходная структура элементов МК и сварных соединений, виды и наличие термической обработки;
- предыстория различных видов нагружения и степень накопления усталостных повреждений в сварных соединениях и элементах сварных металлоконструкций.

Несмотря на то, что по проблеме усталостного разрушения металлоконструкций выполнено большое количество работ, однако до настоящего времени общепризнанного объяснения процесса усталости металлов нет. В то же время известно, что процесс развития усталостной трещины наблюдается в 3 стадии: это зарождение, развитие и разрушение металла.

Многие авторы отмечают, что разрушения металлических конструк-

ций чаще всего вызываются дефектами эксплуатационного характера [22] из-за накопления усталостных повреждений, коррозионного износа элементов сварных МК и пластической деформации металла при возникновении случайных перегрузок.

Наиболее частыми дефектами при усталости металла являются различные трещины, такие как краевые, краевые симметричные, центральные и косые трещины, работающие по смешанному механизму разрушения. Наиболее распространенным типом усталостных трещин в сварных МК являются краевые трещины, однако, характер нагружения элементов конструкций, при котором они развиваются, может быть разным:

- трещины при схемах нагружения растяжением;
- трещины при схемах нагружения изгибом;
- трещины при смешанных схемах нагружения.

Типовое расположение трещин в сварных МК показано на рис. 10.

**Показатели качества сварных соединений.** При оценке технического состояния сварных металлоконструкций большое значение имеет форма единичных дефектов в сварных соединениях, их число, а также доля исправленных дефектов. Однако, исправление дефектов приводит к дополнительным экономическим затратам и не во всех случаях повышает работоспособность сварных конструкций. Уровень размеров и доля дефектов, допустимых в элементах МК, обычно регламентируется отраслевыми нормативно-техническими документами.

Одним из основных критериев допустимости дефектов является наличие действующих напряжений в сварном соединении. Если при статическом нагружении они не приводят к хрупкому разрушению конструкции, то такие дефекты, как поры и шлаковые включения, ослабляющие поперечное сечение до 10 %, не влияют на несущую способность сварной МК.

Аналогичное явление отмечается и при других дефектах, например, трещинах для вязких материалов, однако, ослабление поперечного сечения элементов МК более чем на 3 % является признаком низкого качества [33].

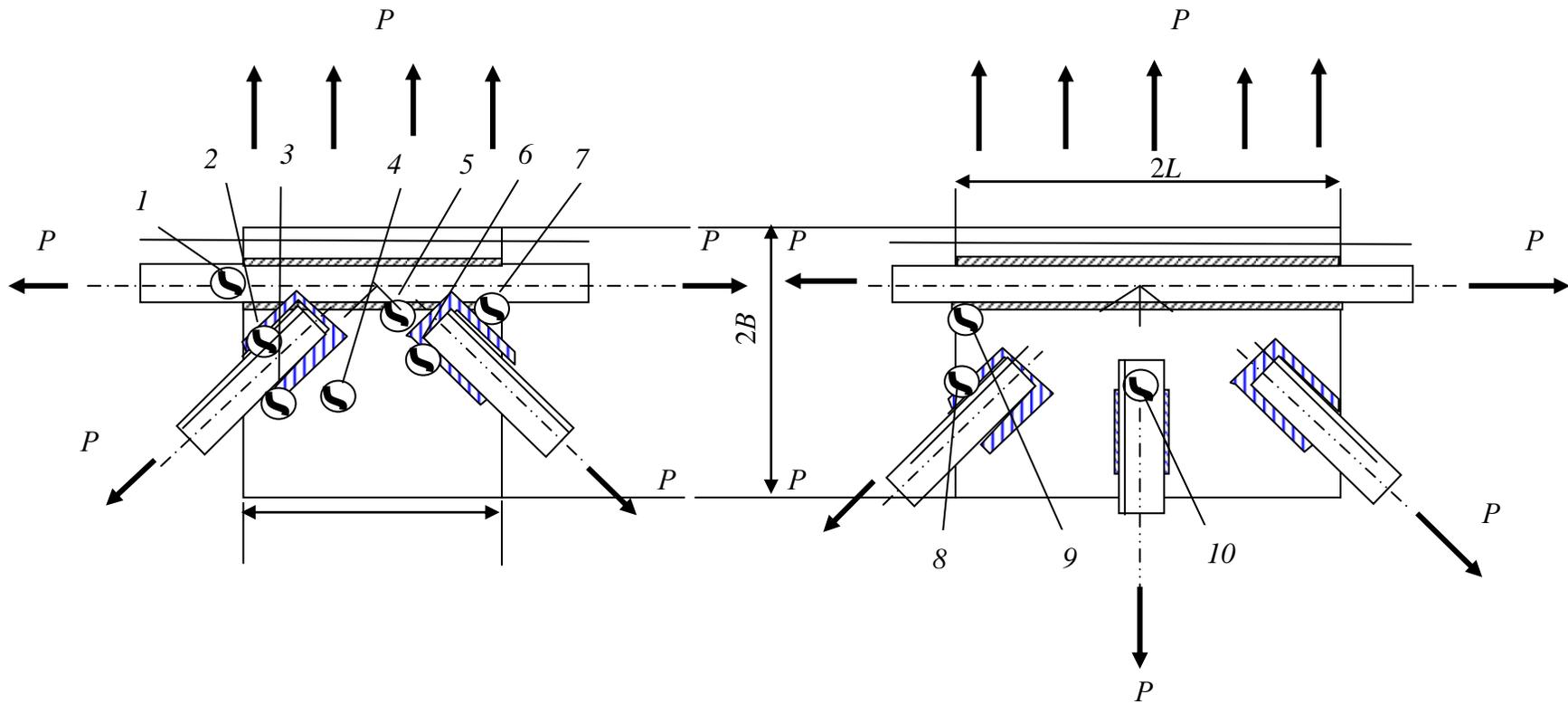


Рис. 10. Типовое расположение трещин в ферменных металлоконструкциях:  
 1, 3, 8 – краевые трещины в стержнях; 2, 4, 7, 9 – краевые трещины в косынках;  
 5, 6, 10 – центральные трещины в косынках

Проведенные исследования показывают, что статические и динамические нагрузки при наличии одних и тех же дефектов по-разному влияют на работоспособность сварных соединений. При динамических нагрузках прочность сварных соединений определяется в основном их сопротивлением усталостным напряжениям. В то же время, непровары, подрезы, поры и шлаковые включения, создавая локальные зоны концентрации напряжений, снижают долговечность сварных металлоконструкций СМ.

### **1.5. Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений**

К предельным состояниям сварных металлических конструкций относятся такие состояния, когда длительная эксплуатация металлоконструкций считается невозможной, опасной или даже нежелательной. Так появление локальных зон концентрации напряжений, образование трещин в элементах МК, потеря устойчивости – все это примеры различных предельных состояний.

Во многих случаях наступление предельного состояния связывают с наличием в металле элементов МК таких явлений как прогиб балки свыше заданной величины, появление опасных локальных зон концентрации напряжений и другие [5].

Но самыми опасными предельными состояниями считают разрушения сварных металлоконструкций и оборудования [74]. Однако, наступление текучести металла, если и используется в последующих прочностных расчетах для определения необходимого сечения элементов МК, не относится к опасным, так как предопределяет изменение размеров элементов МК вследствие пластических деформаций металла.

Степень приближения технического состояния элементов сварных металлоконструкций к предельному может быть различной, что всегда оценивают вероятностью отсутствия наступления предельного состояния. При этом чем выше такая вероятность – тем выше работоспособность сварной несущей металлоконструкции.

**Работоспособность** сварных металлоконструкций – это способность сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые ограничивают нормальную длительную эксплуатацию. Следует подчеркнуть, что основными

источниками разрушений металлических конструкций являются сварные соединения, в которых из-за структурной и механической неоднородности чаще всего образуются опасные локальные зоны концентрации напряжений, а также различные технологические несплошности в процессе сварки.

Появление несплошностей, а также концентраторов напряжений, связанных с резкими переходами от основного металла к металлу сварного шва, способствует снижению работоспособности и надежности сварного соединения [75].

Поэтому ни один из современных способов сварки не обеспечивает получение бездефектного сварного соединения, так как на качество сварных соединений оказывают значительное влияние многочисленные факторы металлургического, технологического и производственного характера [117]. Это:

- неоднородность исходной структуры и механических свойств основного металла;
- многообразие и сложность формы сварных МК;
- остаточные сварочные напряжения в элементах, узлах и сварных соединениях МК;
- диффузионные процессы в металле, происходящие при высоких температурах;
- наличие температурных интервалов хрупкости;
- отрицательные температуры длительной эксплуатации сварных МК.

К качественным сварным соединениям можно отнести сварные соединения, которые имеют прочностные и пластические характеристики металла во всех зонах и участках сварного соединения не ниже, чем у основного металла, но не превышающие их более, чем на 15...25 %. При этом, металл сварного соединения должен иметь характеристики пластичности не ниже, чем у основного металла, а сварной шов не должен содержать дефекты более установленной нормативными документами величины. Отсюда следует, что качество металла сварного шва должно обеспечиваться правильным выбором сварочных материалов (электродов, флюсов и т.д.) [3], а определение механических свойств сварного соединения проводится при отработке технологического процесса сварки [32].

Следовательно, наличие различных дефектов в сварных соединениях может значительно снижать работоспособность сварных конструкций и даже привести при определенных условиях к ее разрушению. При этом, наибольшую опасность представляют внутренние дефекты, так как для их обнаружения необходим неразрушающий контроль. В табл. 2 приведены основные причины разрушения сварных конструкций по данным Международного института сварки (МИС).

Таблица 2

Причины разрушения сварных конструкций	Кол-во случаев разрушения, %
Нерациональность спроектированных конструкций, в том числе:	28,8
<i>Неправильное конструирование</i>	22,5
<i>Введение сварных узлов в участки повышенных напряжений</i>	6,3
Наличие дефектов в сварных соединениях, в том числе:	21,3
<i>Дефекты в швах или высокие остаточные напряжения</i>	12,5
<i>Дефекты формирования швов</i>	8,8
Повышенные напряжения при эксплуатации, чрезмерные нагрузки	20,0
Нарушение технологии сварки трудносвариваемых сталей	18,7
Влияние коррозии	5,0
Неправильная подготовка перед сваркой	3,7
Неправильное применение смежных процессов	2,5

К ним относятся:

- нерациональность формы сварных металлических конструкций;
- присутствие различных дефектов в сварных соединениях и элементах

МК;

- значительные нарушения технологии проведения сварки.

Влияние дефектов зависит от значительного числа факторов:

- структуры и механических свойств конструкционных сталей;
- сложности сварной металлоконструкции;
- внешних схем нагружения сварной конструкции;
- наличия опасных зон концентрации напряжений;

- вида рабочей нагрузки (статическая, динамическая, ударная);
- степени агрессивного воздействия коррозионной среды на конструкцию;
- рабочих температур;
- опасности отказа сварной металлоконструкции.

При этом важно располагать сведениями о влиянии наиболее вероятных дефектов на прочность сварных соединений в условиях, близких к реальным [2], что определяется формой и величиной дефектов, частотой их появления, металлом сварной конструкции, условиями длительной эксплуатации, рабочей температурой (положительная или отрицательная), видом внешней нагрузки, наличием опасных локальных зон концентрации напряжений.

### **1.6. Оценка технического состояния сварных металлоконструкций строительных машин**

Техническое диагностирование длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций назначается для получения необходимых данных с целью оценки технического состояния и принятия последующих решений по ремонту, реконструкции или реновации объекта исследования [49, 54]. Такая необходимость чаще всего возникает при весьма значительных сроках эксплуатации сварных МК.

Поэтому при длительной эксплуатации сварных МК через определенные промежутки времени проводится периодический контроль технического состояния конструкции. Так, например, техническое освидетельствование и испытание строительных грузоподъемных машин должно проводиться ежегодно с целью установления соответствия их состояния правилам Ростехнадзора РФ. При освидетельствовании с помощью визуального и измерительного контроля проверяют техническое состояние элементов сварных МК, сварных соединений и других ответственных узлов, проводят статические и динамические испытания машин.

Так, например, при статическом испытании, проводимом на стреловых кранах, проверяют прочность и грузовую устойчивость машины. Динамические испытания проводятся с целью проверки всех ее механизмов и тормозов. Кроме

того, внеочередные освидетельствования строительных машин проводятся после каждого монтажа, капитального ремонта и модернизации, вызвавшей изменение основных параметров машины [6].

Проводимые обследования позволяют оценить техническое состояние объекта в данный момент, и согласно полученных результатов прогнозировать его безопасную эксплуатацию. При этом выполняется большой комплекс мероприятий, включающий в себя [11, 37, 50, 59]:

- серьезную подготовку конструкции к проведению диагностических работ, рассмотрение и анализ документации (монтажной, эксплуатационной и ремонтной);
- внешнее обследование объекта, включающее в себя визуально - оптический и измерительный виды контроля;
- фиксация различного рода отклонений геометрических размеров, а также взаимного расположения элементов и узлов от проектных;
- проведение толщинометрии элементов металлоконструкций;
- измерение твердости металла в определенных местах;
- проведение неразрушающего и (если это возможно) разрушающего контроля сварных соединений и потенциально опасных участков, сварных металлоконструкций;
- проведение экспериментальных исследований физико-механических свойств (предел прочности и текучести, ударная вязкость), химического состава и структуры металла контрольных образцов;
- проведение оценки фактической и прогнозируемой загруженности элементов сварных металлоконструкций экспериментальными (пассивный феррозондовый метод контроля, тензометрия и пр.) и другими расчетными методами (с учетом выявленных дефектов и коррозионного износа, структурных изменений и фактических свойств металла и так далее);
- проведение расчета напряженно-деформированного состояния элементов МК с учетом действующих напряжений, определенным косвенным способом в опасных зонах концентрации напряжений;
- выяснение причин возникновения различных дефектов и коррозионных повреждений, оценка их влияния на работоспособность сварных металлоконструкций;

- подготовка пакета необходимых мероприятий, способных повысить надежность и работоспособность сварных МК;
- контроль и оценка работоспособности сварных МК, оформление результатов проведенных экспериментальных исследований и необходимых расчетов;
- подготовка заключения о предстоящих возможностях и необходимых условиях безопасной эксплуатации сварных металлоконструкций.

Проверочный расчет сварных металлических конструкций строительных машин выполняется с целью [105]:

- прогнозирования ресурса и возможностей дальнейшей длительной эксплуатации сварных металлических конструкций без каких-либо ограничений;
- введения необходимых ограничений эксплуатации сварных металлоконструкций до плановых ремонтно-восстановительных работ;
- введения необходимых работ по усилению металла сварных конструкций в опасных зонах КН;
- незамедлительного прекращения эксплуатации сварных МК для предотвращения или устранения аварийной ситуации.

Заключение об оценке технического состояния металлоконструкций включает в себя:

- подготовку ведомости различных дефектов, выявленных в процессе технического диагностирования сварных металлических конструкций;
- подготовку справки о виде и степени коррозионного повреждения металла конструкции агрессивной средой;
- подготовку справки о величине фактических и прогнозируемых внешних нагрузок и различных воздействий на различные элементы сварных МК;
- полученные результаты проверочного расчета сварных МК;
- предполагаемые решения по восстановлению несущей способности конструкций или усилению металла в сварных соединениях и элементах сварных МК, а также перечень мероприятий по защите различных элементов сварных металлоконструкций от коррозионного воздействия агрессивной среды.

При этом основные положения проверочного расчета должны быть направлены на обеспечение надежной и безотказной работы сварных МК строительных машин с учетом изменения геометрических характеристик металлоконструкций, условий их работы, а также степени ответственности и значимости объектов, определяемые как материальным, так и социальным ущербом при нарушении их работоспособности в процессе длительной эксплуатации.

### **1.7. Методы и методики диагностики состояния металла сварных конструкций в процессе длительной эксплуатации**

Современный контроль и оценка технического состояния сварных металлических конструкций немислимы без применения методов разрушающего и неразрушающего контроля (НК). Разрушающие методы контроля при их проведении позволяют измерить разрушающие нагрузки, а также и другие характеристики, определяющие эксплуатационную надежность сварных металлоконструкций. Однако, их значительным недостатком является то, что они проводятся выборочно из какой-то определенной части сварной металлоконструкции, что предопределяет точность результатов испытаний не только от однородности исследуемых свойств в образцах, но и от сходства условий проводимых испытаний с условиями длительной эксплуатации сварных МК. При этом разрушающие методы контроля, как правило, обладают большей трудоемкостью, меньшей производительностью и труднее поддаются автоматизации [23].

Неразрушающим методам контроля присущи такие неоспоримые преимущества, как:

- возможность быстрого получения необходимой информации;
- значительное снижение материальных, людских и временных затрат при проведении контроля;
- возможность проведения экспериментальных исследований в труднодоступных и опасных местах, сварных соединениях и сварных узлах, в замкнутых профилях, то есть там, где применение разрушающего контроля может привести к ослаблению и даже разрушению сварной МК.

Однако поддержание высокой надежности длительно эксплуатируемых сварных металлических конструкций строительных машин требует не только совершенствования неразрушающих методов контроля, но и их правильного выбора [8, 18, 60, 63, 69, 70, 82]. Правильный выбор приборов, методов и методик НК для выявления опасных локальных зон концентрации напряжений и косвенного определения значений действующих напряжений зависит как от параметров контролируемого объекта, так и условий его обследования. Следует отметить, что ни одно из средств и методов контроля не является универсальным и не может в полном объеме удовлетворить всем требованиям практики. В связи с чем, кроме наличия разнообразных особенностей и технических возможностей каждого метода контроля необходимо учитывать такие основные факторы, как [8, 72]:

- внешний вид дефекта и его расположение в элементах сварных МК (трещины, непровары, поры, включения неметаллов и т.д.);
- условия работы конструкции (нагрузки статические, динамические, ударные, вибрационные, агрессивная среда и т.д.);
- возможные зоны контроля (сварные соединения, сварные узлы, закрытые полости, пазы, отверстия и т.д.);
- возможные свойства материала (ферромагнитные, неферромагнитные, с крупнозернистой и мелкозернистой структурой, непористые и т.д.);
- чистоту обработки контролируемой поверхности (наличие шероховатости, защитного немагнитного покрытия и т.д.);
- влияние покрытия контролируемой поверхности (толщина гальванических, химических и лакокрасочных, без покрытия и т.д.);
- возможные условия контроля и наличие подходов к объекту контроля (в лабораториях, цехах, на объекте, односторонний или двусторонний подход и т.д.);
- наличие высокой профессиональной подготовки дефектоскопистов, операторов и экспертов.

В зависимости от сложности и ответственности сварных металлоконструкций для их контроля применяют или отдельные методы, или, что наиболее целесообразно, целый комплекс, состоящий из нескольких параллельно или последовательно используемых методов контроля. При этом, наиболее эффективным будет такое сочетание неразрушающих методов контроля, которое обеспечивает высокое качество контроля сварных металлических конструкций и сварных соединений при высокой производительности и минимальных трудовых и материальных затратах на выполнение операций контроля [70].

Перспективным направлением решения задачи косвенного определения действующих напряжений в сварных соединениях и элементах МК являются магнитные методы, которые основаны на взаимосвязи магнитных характеристик ферромагнитных сталей и величины действующих напряжений (магнитоупругий эффект).

Впервые магнитные методы оценки действующих напряжений разработаны в 1939 году учеными Акуловым Н.С. и Киренским Л.В. [55]. Основой этих методов является зависимость свободной энергии магнитной анизотропии  $F_{ам}$  от уровня действующих напряжений.

В промышленности довольно часто применяются следующие магнитные методы: эффект Баркгаузена, магнитострикционный, коэрцитиметрический. Не в полной степени исследован и разработанный нами пассивный феррозондовый (ПФ) метод контроля, работающий в условиях естественного намагничивания ферромагнитных металлов в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея) [14, 67, 68].

Однако магнитным методам присущ ряд некоторых особенностей. Так, на результатах измерения действующих напряжений сказывается механическая и магнитная предыстория конструкционных сталей, когда магнитными полями или внешними нагрузками создается магнитная текстура. Однако, в таких работах, как [13, 25, 61, 73, 78, 91], показано, что остаточная намагниченность металла (напряженность магнитного поля рассеяния) является перспективным параметром для контроля действующих напряжений.

Многие авторы [61, 73, 90, 91, 92] показали, что очень перспективными являются те методы магнитного контроля, которые используют остаточную намагниченность металла, в частности, применяемый в данной работе пассивный феррозондовый метод, позволяющий осуществлять сканирование при точечном контакте феррозондового преобразователя с контролируемой поверхностью. Однако, систематические исследования по совершенствованию средств и методов контроля технического состояния сварных МК для определения действующих напряжений и оценки их фактического НДС в условиях упругопластической работы отсутствуют. Не находят достаточного отражения вопросы учета влияния химического состава и исходной микроструктуры конструкционных сталей, режима и вида внешних нагрузок. Не достаточно исследованы возможности магнитного мониторинга сварных металлических конструкций строительных машин в сварных соединениях, требующих предварительной подготовки поверхности.

Использование магнитомеханического явления магнитных методов способствует совершенствованию и комплексному применению средств, методов и методик контроля технического состояния сварных МК в целях повышения уровня их безопасной и надежной эксплуатации. Но эти возможности в достаточной мере пока не реализованы как для обнаружения локальных зон КН в сварных соединениях сварных МК с дальнейшей оценкой степени их опасности, так и для определения в них действующих напряжений, способствующих повышению достоверности прочностного расчета, учитывающего структурную и механическую неоднородность сварных соединений, а также для последующего постоянного или периодического магнитного мониторинга в опасных локальных зонах концентрации напряжений.

### **1.8. Восстановление работоспособности сварных металлических конструкций усилением**

При оценке напряженно-деформированного состояния металла длительно эксплуатирующихся сварных МК обязательно проводится проверочный расчет элементов сварных металлоконструкций с учетом влияния выявленных дефек-

тов и опасных зон концентрации напряжений. Такой расчет проводится для того, чтобы оценить:

- необходимость незамедлительного прекращения эксплуатации сварных МК для устранения аварийной ситуации;
- необходимость ограничения эксплуатации элементов сварных металлоконструкций до плановых ремонтно-восстановительных работ;
- возможность дальнейшей длительной эксплуатации элементов сварных металлоконструкций без ограничений;
- необходимость усиления металла в различных зонах сварных соединений, имеющих опасные локальные зоны КН.

По результатам проведенной экспертизы технического состояния сварных металлоконструкций, а также отдельных узлов, конструктивных элементов и сварных соединений, их относят к одному из следующих [47]:

- **работоспособное** – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, согласуются с требованиями нормативно-технической документации;
- **ограниченно работоспособное** – состояние объекта, для обеспечения функционирования которого требуется проведение специальных операций по контролю за состоянием конструкций, нагрузками, параметрами технологического процесса и др.;
- **неработоспособное** – состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не согласуются с требованиями нормативно-технической документации. Неработоспособное состояние конструкции считается одним из предельных состояний.

#### **Основные причины усиления.**

Усиление начальной проектной несущей способности сварной конструкции – крайнее средство достижения нормальных условий длительной эксплуатации в тех случаях, когда этой задачи невозможно достичь другими способами, например, за счет выявленных резервов несущей способности или путем уменьшения внешних нагрузок, действующих на конструкцию.

К основным причинам восстановления и усиления сварных металлоконструкций строительных машин можно отнести следующее:

- наличие опасных локальных зон КН в сварных соединениях, обладающих структурной и механической неоднородностью, и элементах сварных металлоконструкций;
- значительное изменение условий длительной эксплуатации сварных МК (увеличение нагрузок, изменение характера нагрузок и пр.);
- конструктивные дефекты (дефекты, обусловленные проектированием, изготовлением и монтажом сварных металлоконструкций, наличие прогибов и погнутостей в элементах МК);
- коррозионный и эксплуатационный износ элементов сварных МК;
- существенная интенсификация технологического процесса при реконструкции;
- полученные конструктивные дефекты в процессе неправильной эксплуатации сварных МК;
- случайные повреждения.

#### **Основные способы усиления.**

Восстановление прочностных свойств металла в зонах КН сварных соединений и элементов сварных МК до нормативных значений является одной из главных задач повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных металлоконструкций строительных машин. К основным способам можно отнести следующие: увеличение площади поперечного сечения за счет присоединения дополнительных элементов; установка других элементов, перекрывающих зоны КН и местные дефекты за счет установки дополнительных накладок, фасонки, ребер жесткости; увеличением катета и длины сварных швов; приклейкой элементов внешнего армирования из высокопрочного материала (углеродные и арамидные волокна) [34].

Наиболее эффективным способом усиления локальных зон КН, по нашему мнению, является формирование в таких зонах КН мелкозернистой структуры, обладающей повышенными прочностными свойствами, за счет проведения контролируемой термоциклической обработки (ТЦО) с контролем структурных изменений металла пассивным феррозондовым методом.

Усиление металла сварных соединений и элементов МК в опасных локальных зонах КН за счет направленного изменения структуры в процессе восстановительной ТЦО позволяет уменьшить число отказов и аварий, повысить надежность, эксплуатационную безопасность и срок службы сварных МК строительных машин.

Учитывая вышесказанное, исследования, посвященные контролю и повышению прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин за счет выявления зон КН в сварных соединениях (сварном шве, зоне термического влияния и основном металле), обладающих структурной неоднородностью, выявления наиболее опасных зон КН и косвенного определения в них действующих напряжений для проведения последующего прочностного расчета и разработке оптимальных способов усиления ослабленных локальных зон КН путем восстановления структуры металла термоциклической обработкой с применением пассивного феррозондового метода контроля, являются весьма актуальными.

### **Выводы по главе 1**

1. Проведен анализ по проблеме обеспечения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных металлических конструкций строительных машин.

2. Рассмотрены особенности структурной и механической неоднородности зон и участков сварных соединений, а также влияние дефектов на их работоспособность.

3. Рассмотрены методы и методики диагностики технического состояния сварных МК в процессе длительной эксплуатации.

4. Рассмотрены методы восстановления работоспособности сварных металлоконструкций за счет различных способов усиления.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 2.1. Обоснование и выбор конструкционных сталей

Ферромагнитные конструкционные стали, используемые для изготовления сварных МК строительных машин, должны обладать как минимум тремя свойствами одновременно [5]:

1. Способностью выполнять служебные функции, предусмотренные при проектировании и изготовлении сварной металлоконструкции. Эти функции конструкции напрямую зависят от прочностных и пластических свойств сталей при статической нагрузке, ударной вязкости, выносливости при знакопеременных нагрузках, коррозионной стойкости, хладостойкости и ряда других свойств.

2. Обладать хорошей свариваемостью, под которой, согласно [45], понимают свойство металла или сочетания металлов образовывать при заданной технологии сварки соединение, удовлетворяющее требованиям, определяемым конструкцией и эксплуатацией изделия.

При этом не требуются такие дополнительные приемы, как подогрев, проковка и последующая термическая обработка. На свариваемость конструкционных сталей наибольшее влияние оказывает ее химический состав. Увеличение содержания углерода и серы в стали снижает ее свариваемость, приводит к возникновению горячих трещин в процессе сварки, поэтому для сварных МК применяются малоуглеродистые стали с содержанием углерода не более 0,25 % и низколегированные с содержанием углерода не более 0,18 %, то есть стали, обладающие хорошей свариваемостью. Следует отметить, что сварные соединения во всех случаях должны обладать равнопрочностью по механическим свойствам с основным металлом и, по возможности, образовывать сварные соединения без дефектов технологического происхождения. Если прочность сварного соединения ниже прочности основного металла, то это может повышать массу сварной металлоконструкции и приводить к недоиспользованию возможностей основного металла [94].

3. Обладать низкой чувствительностью к различного рода концентраторам напряжений в самых разнообразных условиях эксплуатации, что весьма существенно для строительных машин. Этими свойствами металл сварной конструкции должен обладать как до, так и после сварки, причем не только в основном металле, но и в сварном шве и зоне термического влияния. Проблема пригодности той или иной стали для изготовления сварных конструкций, позволяющая обеспечивать необходимые механические свойства сварного соединения, всегда была одной из главных при производстве сварных металлоконструкций [21, 27, 31].

Отметим, что основные трудности возникают не только при выборе химического состава стали и механических свойств сварного шва, а сколько получение сварных соединений, которые были бы равноценны исходному металлу конструкционной стали.

**Основы выбора стали для сварных металлоконструкций.** Сталь для металлической конструкции должна быть подобрана таким образом, чтобы обеспечить работоспособность конструкции при наименьших затратах на изготовление и длительную эксплуатацию. Так, например, для металлоконструкций строительных машин чаще всего применяются малоуглеродистые (Ст3, сталь 20) и низколегированные (09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, 10Г2С1) конструкционные стали. Они используются в состоянии заводской поставки или термоупрочненными.

Одним из обязательных требований для сталей, используемых для изготовления сварных МК, как было сказано выше, является обеспечение высокой пластичности. Это объясняется тем, что в результате влияния различных концентраторов, наличия локальных зон концентрации напряжений и остаточных сварочных напряжений, в отдельных элементах МК при нагружении могут происходить местные пластические деформации на ту или иную степень, поэтому сталь должна иметь достаточный запас пластичности, чтобы выдерживать их без разрушения. Практически все стали, применяемые для изготовления сварных МК, имеют хорошие показатели пластичности ( $\delta \geq 18...19\%$  и  $\psi \geq 38...40\%$ ). Если же металлоконструкция эксплуатируется при низких температурах, то такая сталь должна иметь достаточную пластичность при наиболее низкой из возможных рабочих температур. При этом следует иметь в виду то,

что наиболее чувствительны к снижению температуры кипящие малоуглеродистые стали, в меньшей мере – спокойные, а более высокую пластичность при низких температурах имеют низколегированные конструкционные стали.

**Влияние пониженных температур на работоспособность сварных соединений сварных МК.** При низких температурах работоспособность сварных соединений (сварного шва и зоны термического влияния), как правило, ухудшается: повышается твердость, временное сопротивление при растяжении, пределы текучести и усталости, снижаются пластичность и ударная вязкость [5].

Велико влияние низких температур на процесс сварки. Так, скорость охлаждения, а, следовательно, и кристаллизация металла сварочной ванны с понижением температуры окружающей среды при сварке повышается, вследствие чего насыщение металла газами увеличивается. Быстрый отвод тепла от сварочной ванны и увеличение в ней содержания таких газов, как водород, кислород и др., могут привести к формированию горячих и холодных трещин в сварном шве и зоне термического влияния.

При понижении температуры чувствительность стали к концентраторам напряжений повышается; концентраторами могут быть внутренние и внешние дефекты сварного соединения, которые могут привести к формированию трещин. Также большое влияние на образование трещин могут оказывать такие концентраторы напряжений, как резкие изменения сечений элементов сварных соединений, сосредоточение сварных швов, резкие переходы от сварного шва к основному металлу, незаваренные кратеры, прерывистые швы, замкнутые контуры и др.

С учетом перечисленного для проведения экспериментальных исследований были выбрана широко применяемая при изготовлении сварных МК строительных машин малоуглеродистая сталь 08пс и Ст3. Химический состав конструкционных сталей приведен в табл. 3.

Для проведения механических испытаний из стали 08пс и Ст3 по рекомендации [41] изготавливались плоские образцы на растяжение. На части образцов для механических испытаний в их центральной части проводилось ослабление поперечного сечения на 20 % за счет боковых радиусных проточек.

Сталь	Химический состав, %					
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
08пс	0,06	0,27	0,05	0,0011	0,019	0,022
Ст3	0,19	0,53	0,21	–	0,032	0,034

Для получения сварных образцов согласно [43] использовались пластины из стали 08пс и Ст3 шириной 30 мм при толщине 3, 5 и 10 мм. Односторонние сварные стыковые образцы получали ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. У части образцов фрезерованием снималась выпуклость сварного шва, при этом снятие основного металла по всей поверхности образца на глубину не превышало 15 % толщины основного металла. Снятие металла проводилось поперек сварного шва. На части сварных образцов для механических испытаний проводилось ослабление поперечного сечения образцов на 20 % за счет получения боковых радиусных проточек (рис. 11).

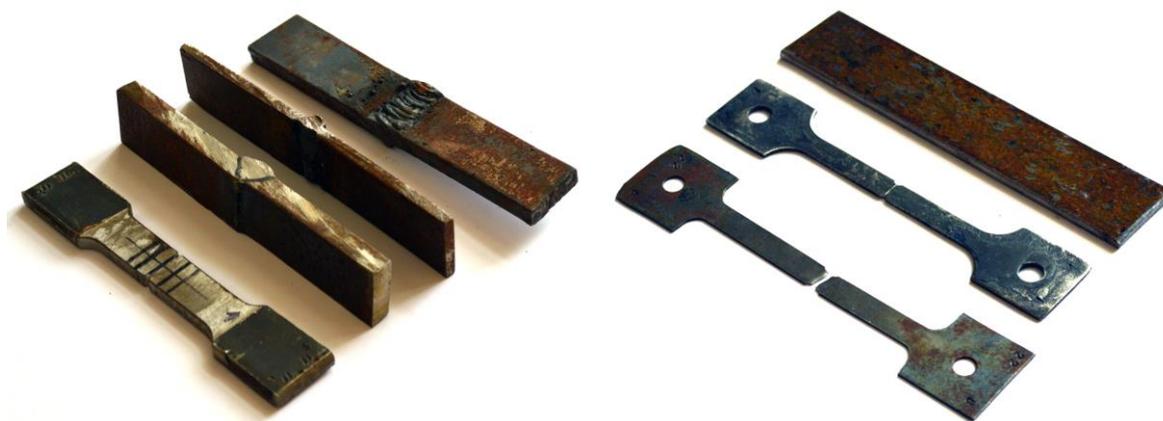


Рис. 11. Основная часть образцов, используемых для проведения экспериментальных исследований

## 2.2. Разработка методики механических испытаний лабораторных и сварных образцов

Разработанная методика включала в себя растяжение образцов с различным структурным состоянием на поверенной разрывной машине FPZ 100/1 (рис. 12) в упругопластической области деформирования при ступенчатом нагруже-

нии–разгрузке лабораторных и сварных образцов с записью диаграммы растяжения на компьютере.

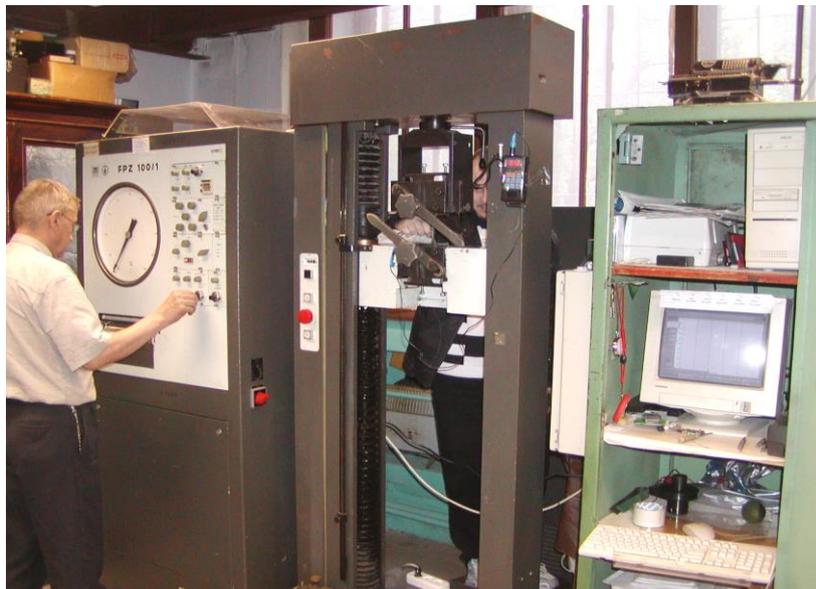


Рис. 12. Разрывная машина FPZ 100/1 для проведения механических испытаний

Скорость деформирования была постоянной и составляла 2 мм/мин. При этом проводилась оценка пластичности по относительному удлинению, предела прочности и текучести. Во время ступенчатых остановок для контроля действующих напряжений в искусственно созданных зонах КН замерялась напряженность магнитного поля рассеяния  $H_p$  при сохранении непосредственного контакта ферромагнитного преобразователя с контролируемой поверхностью образца.

### **2.3. Разработка методики измерения микротвердости**

При оценке механических свойств конструкционных сталей неразрушающими методами сравнительно информативной характеристикой является микротвердость металла. Ее распределение в различных зонах сварного соединения при наличии корреляционных зависимостей между твердостью и прочностными характеристиками позволяет судить об уровне механических свойств отдельных зон, а также степени их неоднородности. По микротвердости также можно судить о структурном состоянии металла.

Согласно [43] твердость различных зон сварного соединения определяют только для соединений, полученных сваркой плавлением или давлением из конструкционных сталей толщиной не менее 1,5 мм. Учитывая, что исследуемые нами образцы имеют толщины 3, 5 и 10 мм и изготовлены сваркой плавлением (ручная дуговая сварка), то на них можно проводить определение микротвердости металла всех зон сварных соединений.

**Измерение микротвердости металла различных зон сварных соединений.** Измерение микротвердости по Виккерсу проводят в соответствии с [42]. Нагрузка на алмазный индентор в соответствии с прочностными свойствами металла участков сварного соединения и ширины околошовной зоны должна составлять 98 Н (HV10).

Измерение микротвердости проводится в поперечном сечении сварного соединения в соответствии с рис. 13 и 14. Микротвердость основного металла, сварного шва и околошовной зоны измеряют по одной или нескольким линиям, указанным на рис. 13. Число линий измерения твердости зависит от толщины основного металла. При толщине 9...25 мм измерения проводят по двум линиям (рис. 13, *а*), при толщине 1,5...9 мм- по одной линии (рис. 13, *б*).

При измерениях, выполняемых в непосредственной близости к границе сплавления, необходимо проводить 2–3 замера (рис.14, *а*) или дополнительные замеры (рис.14, *б*).

При толщине основного металла от 9 до 25 мм допускается схема проведения замеров на участках сварного соединения, изображенная на рис. 15.

**Измерение микротвердости по Виккерсу.** Подготовка к испытанию. Перед измерением микротвердости по Виккерсу [42] вначале производят внешний осмотр образцов. При этом поверхность образца должна иметь шероховатость не более 0,16 мкм, и быть свободной от окисных пленок и различных загрязнений. При измерении микротвердости должна соблюдаться перпендикулярность приложения действующих усилий к контролируемой поверхности. Поверхность столика должна быть чистой. Крепление образца на подставке должно быть жестким и устойчивым.

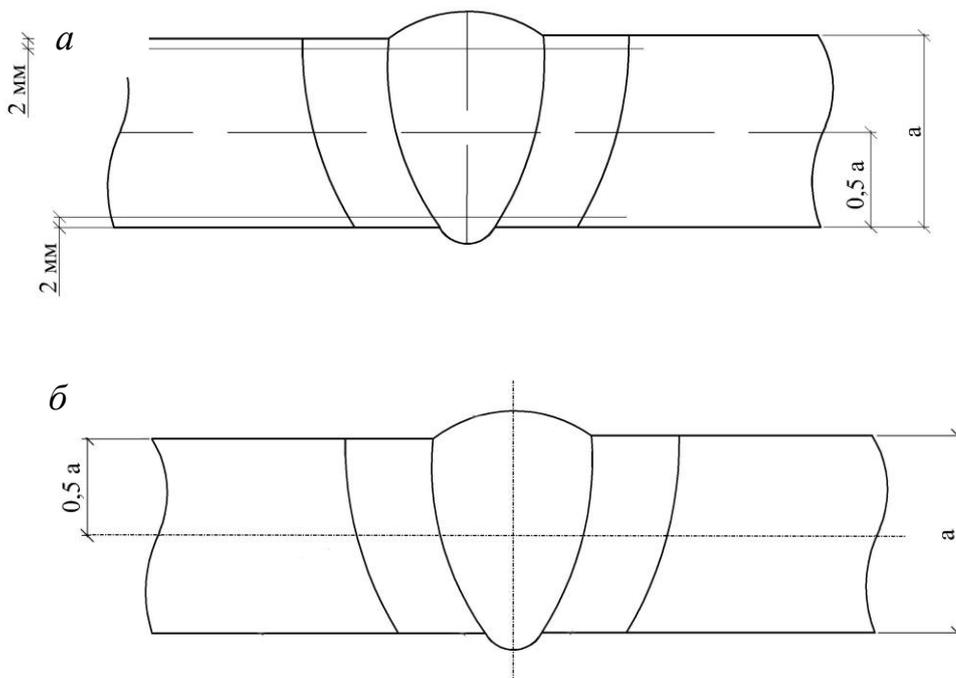


Рис. 13. Линии измерения твердости в зависимости от толщины основного металла:  
*a* – толщина основного металла 9...25 мм; *б* – толщина основного металла 1,5...9 мм

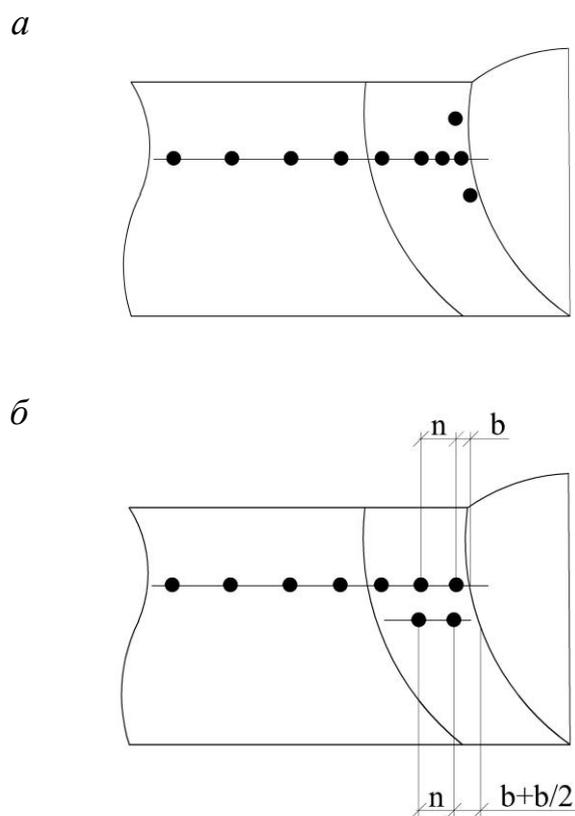


Рис. 14. Схема замера твердости металла вблизи границы сплавления

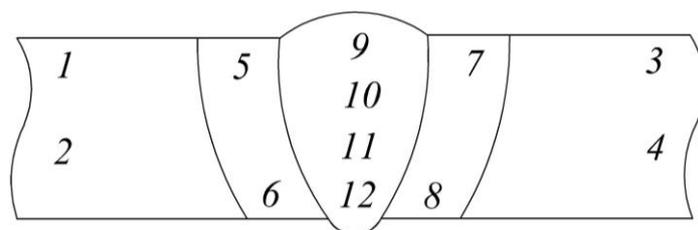


Рис. 15. Схема проведения замеров твердости металла при толщине основного металла от 9 до 25 мм

**Проведение испытания.** При этом, измерение микротвердости требует соблюдения следующих условий:

- плавное возрастание нагрузки до необходимого значения;
- постоянство приложенной нагрузки к образцу в течение заданного времени;
- выдержка под нагрузкой должна составлять не менее 10...15 с;
- центр отпечатка и край образца или край соседнего отпечатка должны находиться друг от друга на расстоянии не менее 2,5 длины диагонали отпечатка. Измерение микротвердости с соблюдением выше перечисленных условий осуществлялось на универсальном твердомере фирмы Zwick / Roel (рис. 16).



Рис. 16. Универсальный твердомер фирмы Zwick/Roel

## 2.4. Разработка методики металлографического анализа

При микроструктурном анализе применялся комплекс приборов, включающий в себя шлифподготовительное и металлографическое оборудование.

1. Шлифподготовительное оборудование включало в себя:

- оборудование для вырезки образцов;
- оборудование для запрессовки образцов в термопластики;
- оборудование для шлифовки и полировки образцов.

2. Металлографическое оборудование, состоящее из световых инвертированных оптических микроскопов с механизированным столиком, оснащённых программой количественной обработки изображения «Thixomet», обладающих широкими техническими возможностями.

**Шлифподготовительное оборудование. Оборудование для вырезки образцов.** Оборудование для резки образцов включает в себя прецизионный отрезной станок Brilliant 220 с автоматической подачей по трём осям и лазерной разметкой (рис. 17).



Рис. 17. Установка точной резки Brilliant 220

Установка точной резки Brilliant 220 имеет целый ряд преимуществ. Это автоматическая подача по трём осям в сочетании с лазерной разметкой, позволяет производить резку в автоматическом режиме, с заданным шагом до 1,5 мм, глубиной и на заданных участках образца, что упрощает и ускоряет процесс поперечной резки образцов с заданным шагом.

**Оборудование для запрессовки образцов.** Запрессовка образцов в термопластики осуществляется для получения заготовок определённого диаметра, удобных для последующего шлифования и полировки. Запрессовка образцов осуществлялась в цилиндры диаметром 30 и 50 мм.

Для этого использовался автоматический пресс для горячей запрессовки образцов Opal 460 (рис. 18).



Рис. 18. Установка для запрессовки Opal 460

Гидравлический пресс Opal 460 работает в автоматическом цикле загрузка образца - нагрев – сжатие – охлаждение – выгрузка образца, не требует сжатого воздуха и позволяет сделать две запрессовки одновременно. При выполнении цикла задаются следующие параметры: усилие сдавливания, температура и время запрессовки.

**Оборудование для шлифовки и полировки образцов.** Применяемое оборудование позволяет производить операции шлифовки и полировки металлографических образцов в автоматическом (запрессованные цилиндры 30 и 50 мм) и ручном режимах. Для выполнения данных операций используются абразивные бумаги различной дисперсности, специальные шлифовальные круги и различные полировальные ткани. В процессе полировки используются алмазные суспензии дисперсности от 16 до 0,5 мкм.

В автоматическом режиме выбранная операция выполняется одновременно на 6 образцах, запрессованных в термопластик. При этом, программируются такие параметры как: сила прижима образцов, скорость и направление

вращения образцов и абразива, время процесса.

Проведенные исследования выполнялись на шлифовально-полировальной машина Saphir 560 с программируемой головкой Rubin 520 (рис. 19), которая имеет возможность автоматической подачи полировальных алмазных суспензий и производить сошлифование образцов на строго определённую толщину.



Рис. 19. Установка для шлифовки и полировки Saphir 560

Следует подчеркнуть, что перед этапом металлографического анализа образцы подвергаются химическому травлению в растворах различных реагентов, в зависимости от решаемой задачи.

**Металлографическое оборудование.** Металлографические исследования проводились на инвертированных металлографических микроскопах Carl Zeiss Axio Observer (рис. 20) и Leica DMI5000 (рис. 21) с механизированными столиками, оснащёнными системами количественного анализа изображений «Thixomet».



Рис. 20. Микроскоп "Carl Zeisse" Axio Observer

Указанное оборудование позволяет решать множество задач, связанных с качественным и количественным металлографическим анализом.

В частности, проведение металлографических исследований сварных соединений с целью выявления дефектов сварки. Для этого использовалась функция комплекса микроскоп- программа «Thixomet», позволяющая получать качественные изображения сварных соединений.



Рис. 21. Микроскоп Leica DMI5000

Сущность этого способа заключается в том, что, регулируя в автоматическом режиме перемещение образца на микроскопе с помощью механизированного столика, программа «Thixomet» создаёт электронное панорамное изображение, склеивая куски изображения точно пиксель к пикселю. В результате получается панорамное изображение исследуемого образца очень высокого качества. Кроме того, используемая в данном случае программа «Thixomet» позволяет произвести линейные измерения и определить все геометрические параметры структуры образца или дефектов в нём.

Микроструктура различных зон сварных соединений может выводиться на экран монитора (рис. 22).

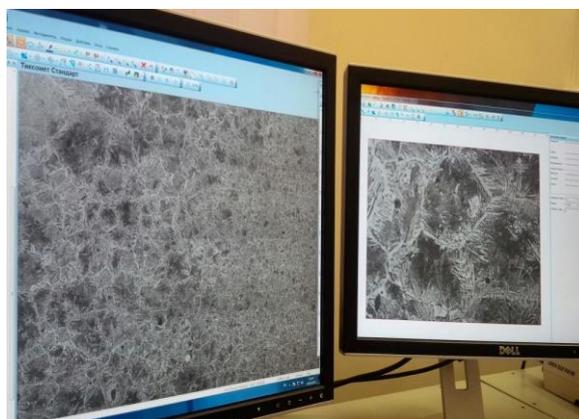


Рис. 22. Микроструктура стали в зоне сплавления и в зоне перегрева сварного соединения

## 2.5. Разработка методики пассивного феррозондового контроля

Контроль технического состояния сварных МК обычно осуществляется за счет неразрушающих методов контроля, который включает в себя поиск уже развитых дефектов и сравнение их параметров с допускаемыми. Однако, главными источниками повреждений в сварных конструкциях, ведущих к авариям, являются локальные зоны концентрации напряжений, которые возникают на этапах изготовления, монтажа и длительной эксплуатации сварных конструкций. Поэтому выявление таких опасных зон КН является одной из главных задач при оценке технического состояния сварных МК строительных машин.

Наиболее перспективным методом выявления опасных зон КН и определения в них действующих напряжений, по нашему мнению, является пассивный феррозондовый метод контроля, к основным отличительным особенностям которого следует отнести следующее:

- отсутствие необходимости в намагничивании (размагничивании) объекта контроля, так как метод фиксирует остаточную намагниченность, сформировавшуюся в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея);
- возможность контроля различных зон сварных соединений, замкнутых контуров и труднодоступных мест сварных МК;
- возможность оценки степени опасности выявленных локальных зон КН и косвенного определения в наиболее опасных из них действующих напряжений;
- отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности контроля и снятия покрытия, если толщина немагнитных защитных покрытий не превышает 2 мм;
- возможность проведения магнитного мониторинга в выявленных опасных локальных зонах КН.

### **Подготовка к проведению экспериментальных исследований.**

Для оценки технического состояния сварных МК, изготовленных из ферромагнитных конструкционных сталей, была разработана методика пассивного феррозондового метода контроля за счет измерения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  прибором ИКНМ-2ФП (рис. 23), которая включает 2 этапа: подготовку прибора к работе и проведение контроля.



Рис. 23. Внешний вид прибора ИКНМ-2ФП с двухканальным феррозондовым преобразователем при исследовании сварного соединения

В процессе контроля фиксируются места значительных изменений магнитного параметра  $H_p$  с последующей оценкой степени опасности таких зон КН. Одной из особенностей разработанной методики является то, что она позволяет проводить как сплошное, так и выборочное сканирование поверхности объекта и, в частности, сварных соединений, без предварительной подготовки поверхности контроля.

Применяемый в работе прибор ИКНМ 2-ФП включает в себя измерительный блок с аккумуляторами, двухканальный феррозондовый преобразователь и соединительный кабель. Прибор имеет небольшие размеры, автономное питание, прост как в работе, так и настройке, позволяет проводить измерения в любых местах и зонах сварных соединений, труднодоступных местах и сложных сварных узлах.

Действие прибора основано на регистрации магнитных полей рассеяния  $H_p$  на поверхности сварной металлоконструкции при намагничивании ее элементов в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея) и выявлении аномальных значений магнитного параметра  $H_p$  в зонах КН. Датчик прибо-

ра состоит из двух феррозондов, расположенных на одной оси с меняющимся базовым промежутком между ними. Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 4.

Таблица 4

№	Характеристика	Показатели
1	Диапазон измерения величины $H_p$ , А/м	$\pm 1999$
2	Погрешность измерения, не более (%)	5
3	Количество каналов измерения величины $H_p$	2
4	Время одного измерения (не более), мкс	10
5	Рабочий температурный диапазон, °С	-20...+60
6	Диапазон относительной влажности, %	45...80

При подготовке к контролю необходимо:

- во-первых, подключить двухканальный феррозондовый преобразователь к измерительному блоку;
- затем включить прибор ИКНМ-2ФП, нажав на кнопку "ВКЛ". При этом должны загореться цифровые индикаторы измерения магнитного поля рассеяния, индикатор режима работы «П» или «Г» (полемер или градиентометр, соответственно), а также индикатор состояния заряженности батарей питания;
- осуществить выдержку прибора во включенном состоянии («прогрев») в течении 15 минут;
- провести последующую калибровку прибора.

Для калибровки прибора осуществить следующие операции:

- индикатор режима работы прибора установить в положение "П" – полемер;
- нажатием кнопки "КАЛИБР" перевести прибор в режим калибровки;
- выставить калибровочное магнитное поле (40А/м), сопоставимое с магнитным полем Земли, в результате чего на экране индуцируется информация "Н1 ↑";

- выставить датчик прибора зондом 1 вверх (поле "+") и нажать кнопку "ВВОД", вследствие чего на экране индуцируется информация "Н1 ↓";

- выставить датчик зондом 1 вниз (поле "-") и нажать кнопку "ВВОД".

Калибровка прибора закончена;

- при необходимости выход из режима калибровки обеспечивается нажатием кнопки "ОТМЕНА".

### Исследование влияния внешних воздействий.

Выявление взаимосвязи структурных, механических и магнитных параметров ферромагнитных конструкционных сталей проводилось с помощью пассивного феррозондового метода контроля, разработанного авторами [66]. Проведенные исследования показали взаимосвязь между структурой, механическими и магнитными параметрами конструкционных сталей 08пс и СтЗ с различной исходной структурой. Изменение магнитного параметра  $H_p$  при приложении внешней нагрузки в процессе совместных магнитомеханических испытаний и наложенное изменение параметра  $H_p$  на диаграмму растяжения в координатах нагрузка-деформация показано на рис. 24.

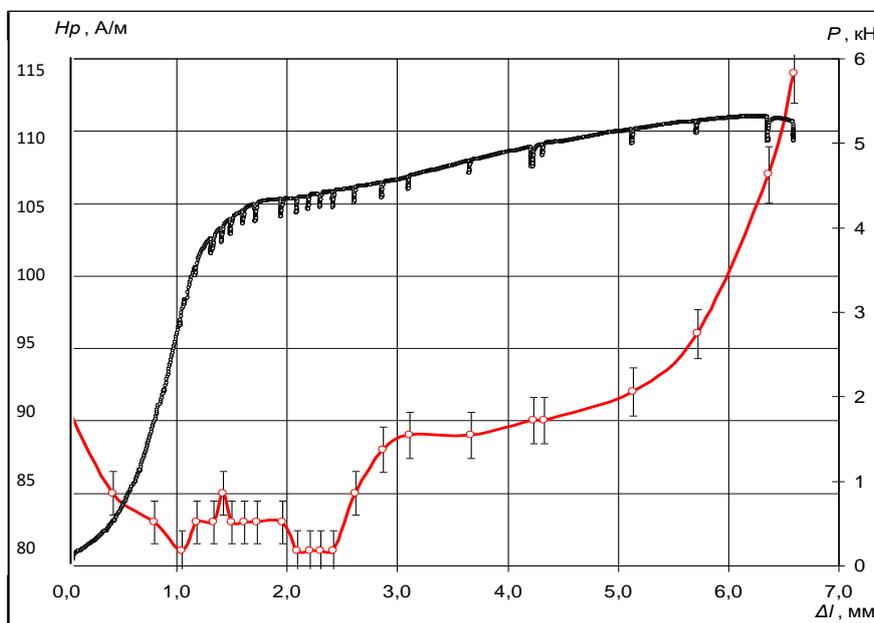


Рис. 24. Изменение магнитного параметра  $H_p$  при деформации стали 08пс в состоянии поставки

Снятие экспериментальных данных проводилось при ступенчатых остановках: в области упругого деформирования - через определенные приращения

внешней нагрузки, при пластической деформации - через определенные приращения  $\Delta l$ .

Выявленная взаимосвязь между магнитным параметром  $H_p$ , исходной структурой и действующими напряжениями в малоуглеродистой стали 08пс и Ст3 позволяет проводить дальнейшие исследования с целью расширения и уточнения взаимосвязи  $H_p(\sigma)$  при упругопластическом деформировании ферромагнитных конструкционных сталей.

### **Проведение пассивного феррозондового контроля.**

При проведении магнитного контроля поверхности сварных металлоконструкций двухканальный феррозондовый преобразователь располагают строго перпендикулярно поверхности контроля. Затем, перемещая датчик по сварному соединению или элементу металлоконструкции, контролируют значения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  на экране прибора. Места резких изменений  $H_p$ , независимо от знака, фиксируют, отмечая, таким образом, предполагаемые зоны концентрации напряжений. С целью получения основательных результатов экспериментов у части образцов создавались искусственные зоны КН за счет боковых радиусных проточек в центре образца, в которых при ступенчатом циклическом упругопластическом нагружении измерялись значения магнитного параметра  $H_p$ .

Для обеспечения стабильности получаемых экспериментальных данных в процессе ступенчатых остановок во всех случаях предусматривалось измерение  $H_p$  через равные промежутки времени.

Структурные изменения металла в процессе формирования мелкозернистой структуры при термоциклической обработке контролировались пассивным феррозондовым методом. Для этого в средней части образцов по осевой линии снимались значения  $H_p$  в четырех зонах контроля, которые отстояли друг от друга на расстоянии 30 мм. Контроль значений  $H_p$  осуществлялся как перед проведением первого цикла ТЦО, так и по окончании каждого из циклов нагрев–охлаждение. При построении зависимостей значений  $H_p$  от числа циклов принималось среднее значение  $H_p$  проводимых зон контроля. На сварных

образцах пассивному феррозондovому контролю подвергались, как правило, сварной шов, зона сплавления основного металла со сварным швом, участок перегрева, участок полной перекристаллизации и основной металл.

### **Исследование влияния толщины защитного немагнитного покрытия.**

На результаты экспериментальных магнитных исследований существенное влияние оказывают защитные немагнитные покрытия. Они могут быть как лакокрасочные, так и металлические, оксидные, изоляционные. При этом возможна комбинация различных видов покрытий. Следует отметить, что из всех видов покрытий самыми распространенными, достаточно эффективными и доступными являются лакокрасочные покрытия.

Обоснованный выбор покрытий является важной задачей, так как при этом учитываются такие факторы, как стоимость покрытия, длительность эксплуатации, трудоемкость нанесения и другие. Долговечность защитного покрытия обычно устанавливается из опыта эксплуатации покрытий в таких же условиях или проведением эксперимента.

Необходимость удаления защитных покрытий при проведении неразрушающего контроля требует, как правило, его восстановления по окончании работы, что связано с привлечением значительных людских, материальных и трудовых затрат. Учитывая вышесказанное, вызывает практический интерес оценка возможностей пассивного феррозондovого метода контроля при сканировании сварных МК строительных машин без снятия защитных немагнитных покрытий. Аналогичные исследования в этом направлении проводились в работе [84].

При этом предполагалось:

- оценить потенциальные возможности пассивного феррозондovого метода при техническом диагностировании сварных МК строительных машин с защитными покрытиями;
- оценить влияние толщины немагнитного защитного покрытия на магнитный параметр  $H_p$  для ферромагнитных сталей 08пс и Ст3.

Пространство между ферромагнитным преобразователем и поверхностью контроля изменялось с помощью пластин немагнитного материала. Величину зазора ступенчато изменяли от 0 до 15 мм. Так как значения  $H_p$  в зоне контроля могут иметь как отрицательный, так и положительный знак, и разные численные значения, в проведенных экспериментальных исследованиях этот факт был учтен. Образцы из конструкционных сталей 08пс и Ст3 в состоянии заводской поставки исследовались с различной исходной намагниченностью  $H_p$  (от  $-400$  до  $+400$  А/м).

На рис. 25–29 приведены значения  $H_p$  от толщины покрытия при различных исходных значениях магнитного параметра  $H_p$  на образцах из малоуглеродистой стали Ст3.

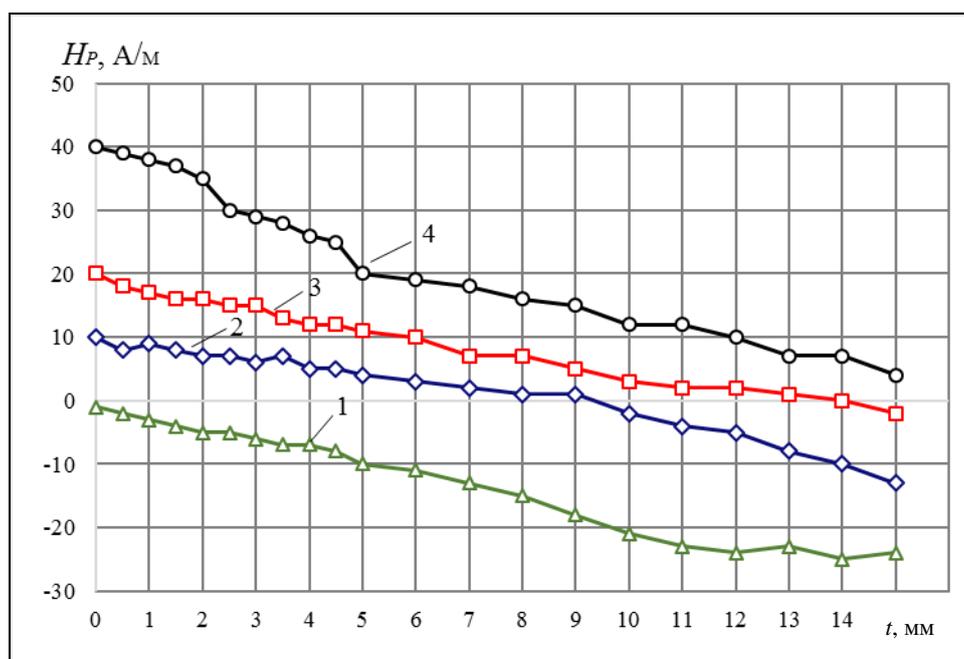


Рис. 25. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии заводской поставки при различных исходных положительных значениях  $H_p$ : 0; 10; 20; 40 А/м (кривые 1–4 соответственно)

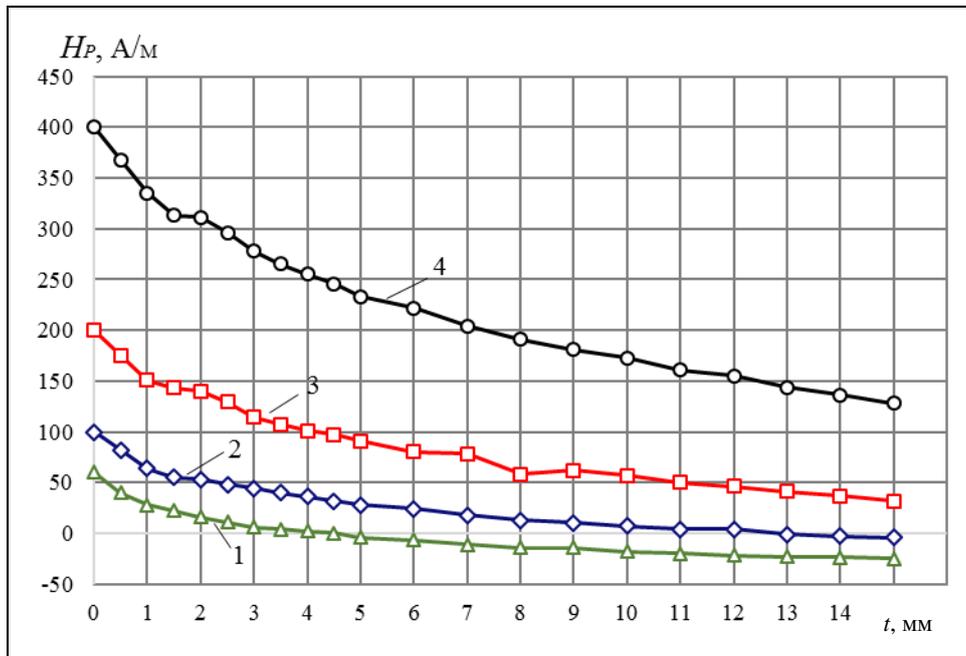


Рис. 26. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии поставки при различных исходных положительных значениях  $H_p$ : 60; 100; 200; 400 А/м  
(кривые 1-4 соответственно)

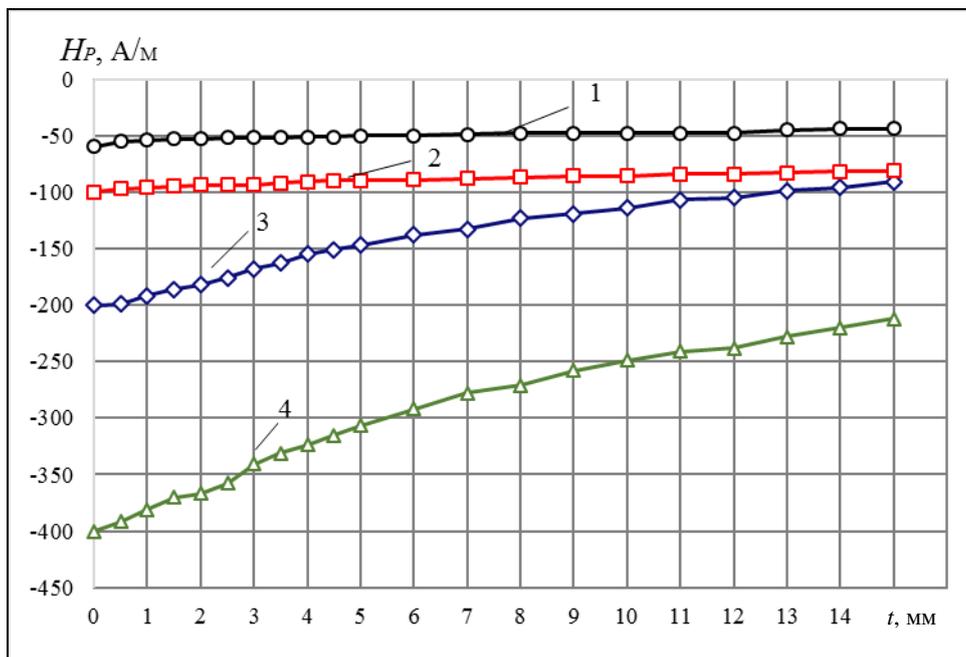


Рис. 27. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии поставки при различных исходных отрицательных значениях  $H_p$ : -60; -100; -200; -400 А/м  
(кривые 1-4 соответственно)

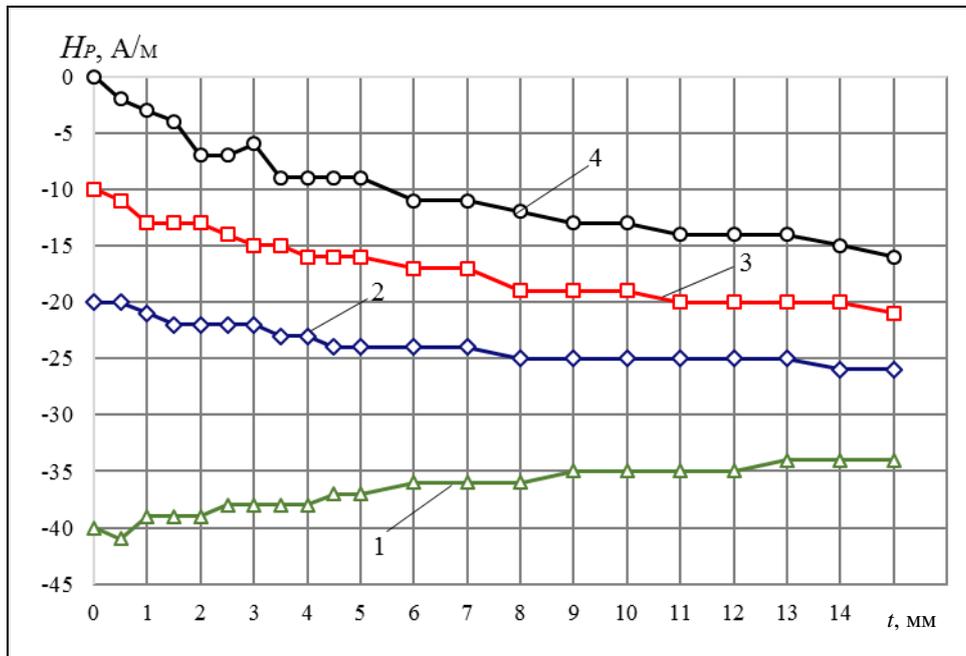


Рис. 28. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии поставки при различных исходных значениях  $H_p$ : 0; -10; -20; -40 А/м (кривые 1-4 соответственно)

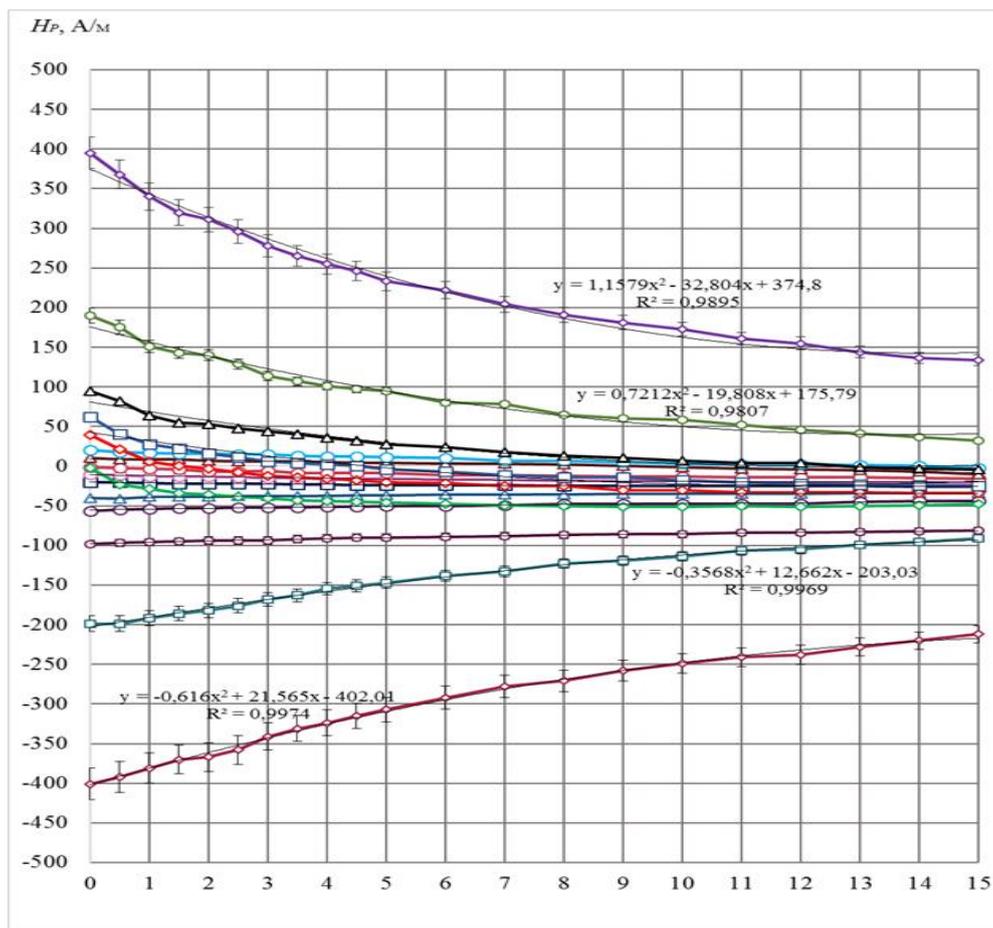


Рис. 29. Изменение напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  с увеличением  $t$ , мм толщины немагнитного защитного покрытия для стали Ст3 в состоянии заводской поставки при различных исходных значениях  $H_p$

Видно, что независимо от начальных значений  $H_p$ , с увеличением величины зазора наблюдается значительное снижение величины магнитного параметра  $H_p$ . Далее, начиная с толщины немагнитного покрытия 7...10 мм, изменение  $H_p$  несколько замедляется, но все же абсолютное изменение значений  $H_p$  ярче выражено для образцов с высокими исходными величинами  $H_p$ . Аналогичные результаты показаны и для малоуглеродистой стали 08пс.

Таким образом, проведенные исследования показали (рис. 29), что при толщине немагнитного защитного покрытия до 2 мм изменение величин магнитного поля рассеяния  $H_p$  варьируется в пределах 17...25 %, что позволяет рекомендовать пассивный феррозондовый метод для контроля исследуемых зон сварных соединений и основного металла без удаления покрытия и предварительной подготовки поверхности.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила представить полученные зависимости в аналитическом виде (табл. 5).

Таблица 5

Марка стали	Вид обработки	Исходные значения $H_{p0}$	Коэффициенты уравнений			Коэффициент корреляции $R^2$
			$a$	$b$	$c$	
Ст3	Поставка	-400	-0,616	21,565	-402,01	0,99
		-200	-0,3568	12,662	-203,03	0,99
		-100	-0,0387	1,6431	-97,577	0,99
		-60	-0,0195	0,9911	-55,159	0,94
		-40	-0,0242	0,7744	-40,265	0,96
		-20	0,0306	-0,8033	-20,273	0,95
		-10	0,0456	-1,3168	-10,857	0,98
		0	0,0646	-1,8304	-1,8702	0,97
		10	-0,0279	-0,7776	9,1475	0,98
		20	0,032	-1,8708	19,375	0,99
		40	0,4559	-10,098	20,515	0,9
		60	0,4862	-11,393	42,648	0,93
		100	0,4913	-12,686	80,976	0,97
		200	0,7212	-19,808	175,79	0,98
400	1,1579	-32,804	374,8	0,99		

Установлена линейная зависимость между коэффициентами уравнений  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и начальным значением магнитного параметра  $H_{p0}$ . Получена формула параметрической функции, позволяющая получать 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  $H_p$  – напряженность магнитного поля рассеяния,  $t$  – толщина защитного немагнитного покрытия соответственно;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – экспериментальные коэффициенты уравнений, зависящие от структурного состояния металла,  $R^2$  – коэффициент корреляции.

Учитывая такие положительные результаты экспериментальных исследований, использование пассивного феррозондового метода контроля при оценке напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций длительно эксплуатируемых строительных машин целесообразно при решении таких задач, как:

- при выявлении зон концентрации напряжений в различных зонах сварных соединениях и элементах металлических конструкций строительных машин, особенно в сложных узлах;
- в быстром определении знака действующих напряжений в сварных соединениях и в элементах сварных МК (растяжение или сжатие);
- при оценке области деформирования сварных соединений и элементов сварных МК (упругая или пластическая), в которой находятся выявленные локальные зоны КН;
- при оценке степени опасности выявленных зон КН в сварных соединениях и элементах МК и выявлении наиболее опасных среди них;
- при косвенной оценке величин действующих напряжений в выявленных локальных зонах КН сварных соединений и элементов сварных МК;
- определении возможности прохождения локальной пластической деформации в зонах КН по характеру петли магнитного гистерезиса;
- при выявлении зон локальных и общих коррозионных повреждений, особенно в замкнутых контурах;
- при выявлении зон концентрации напряжений в различных зонах

сварных соединений (обладающих структурной и механической неоднородностью) без подготовки поверхности контроля и снятия немагнитного защитного покрытия толщиной не более 2-х мм;

- контроля структурных превращений в металле конструкционных сталей при термоциклической обработке в локальных зонах КН;
- при контроле НДС металла в труднодоступных местах.

## **2.6. Разработка методики термической обработки**

Термическая обработка исследуемых образцов включала в себя проведение высокотемпературного отжига и термоциклической обработки конструкционных сталей. Термическая обработка проводилась в программируемых муфельных печах с микропроцессорным управлением СНОЛ 8.2/1100 и СНОЛ 30.0/1100 (рис. 30).



Рис. 30. Программируемые муфельные печи с микропроцессорным управлением СНОЛ 8.2/1100 и 30/1100

## **2.7. Разработка методики получения структур металла с высокими прочностными свойствами**

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным и надежным способом получения мелкозернистой структуры с заданным размером зерен является термоциклическая обработка, которая состоит из периодических нагревов и охлаждений по режимам, учитывающим структуру и состав сталей. Метод ТЦО, как способ термической обработ-

ки, строится на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов и сплавов.

Так, если при традиционных видах термической обработки структура описывается начальным и конечным состояниями, то в случае проведения ТЦО структура перед каждым последующим циклом различная, что оказывает значительное влияние на условия прохождения последующих фазовых и структурных превращений, их механизм и кинетику. При этом в процессе структурных изменений металл может приобретать структуру, которая не достижима при обычных видах термической обработки.

При ТЦО фазовые и структурные превращения сопровождаются не только образованием, перемещением и аннигиляцией линейных и точечных дефектов, но и перераспределением легирующих элементов [16]. Проведение ТЦО позволяет в короткие сроки сформировать мелкозернистую структуру с заданным размером зерен, имеющую повышенные прочностные свойства. Однако разработка режимов термоциклической обработки в каждом определенном случае носит индивидуальный характер и не может автоматически переноситься от одного металла к другому.

На конечную структуру сталей при термоциклической обработке значительное влияние оказывают следующие основные факторы [35]:

- исходная микроструктура стали (крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная на разную степень);
- химический состав конструкционной стали (в основном содержание углерода в стали);
- максимальная температура нагрева;
- минимальная температура охлаждения;
- время продолжительности нагрева при максимальной температуре;
- увеличение скорости нагрева в интервале превращения стали способствует получению более мелкозернистой структуры;
- скорость охлаждения после каждого цикла нагрева;
- влияние особенностей кинетики многократных структурных и фазовых превращений в процессе ТЦО.

Первым, и, по-видимому, основным эффектом любого режима термоцик-

лической обработки конструкционных сталей является измельчение их исходной структуры. Процесс измельчения микроструктуры обусловлен несколькими основными факторами: влиянием ускорения циклов нагревов и охлаждений на структурные превращения, отсутствием или малой длительностью выдержек при максимальной температуре нагревов, особенностью кинетики многократных фазовых и структурных превращений и т.д.

Одним из эффектов ТЦО является то, что если доэвтектоидную сталь быстро нагреть до температуры на 10...15 °С выше температуры  $A_{c1}$  и затем охладить на воздухе, то вследствие обратной перекристаллизации образуется мелкое зерно перлита, при этом феррит в течение одного термоцикла не претерпевает изменений. Для его изменения необходимо произвести несколько таких нагревов и охлаждений, что подтверждается нашими исследованиями на малоуглеродистых сталях 08пс и Ст3.

В процессе экспериментальных исследований показано, что чем выше скорость нагрева при ТЦО и меньше перегревы над точкой  $A_{c1}$ , тем более мелкозернистая структура в углеродистой конструкционной стали. Однако в этом случае возрастает требуемое число циклов. Так расчет числа зерен  $N$  в 1 мм<sup>3</sup> стали 45 показал, что после нормализации  $N = 6,5 \cdot 10^3$ , а после ТЦО  $N = 6,2 \cdot 10^6$  [35]. При оценке измельчения в баллах было определено, что в результате маятниковой ТЦО стали 45 с размером зерен 5-6 баллов измельчение зерен достигает 11-12 баллов и более. Это означает, что одно зерно дробится примерно на 1000 мелких зерен.

Измельчая исходную структуру сталей, ТЦО значительно снижает  $\sigma_{вн}$  и способствует снижению уровня концентрации водорода в зоне сварного соединения – основного источника зарождения холодных трещин, в результате чего снижается температура перехода стали в хрупкое состояние и повышается вязкость разрушения.

На практике применяется несколько разновидностей ТЦО сплавов и сталей, которые различаются между собой температурно-скоростными параметрами [36]. Это маятниковая, средняя и высокотемпературная ТЦО сталей и чугунов (рис. 31).

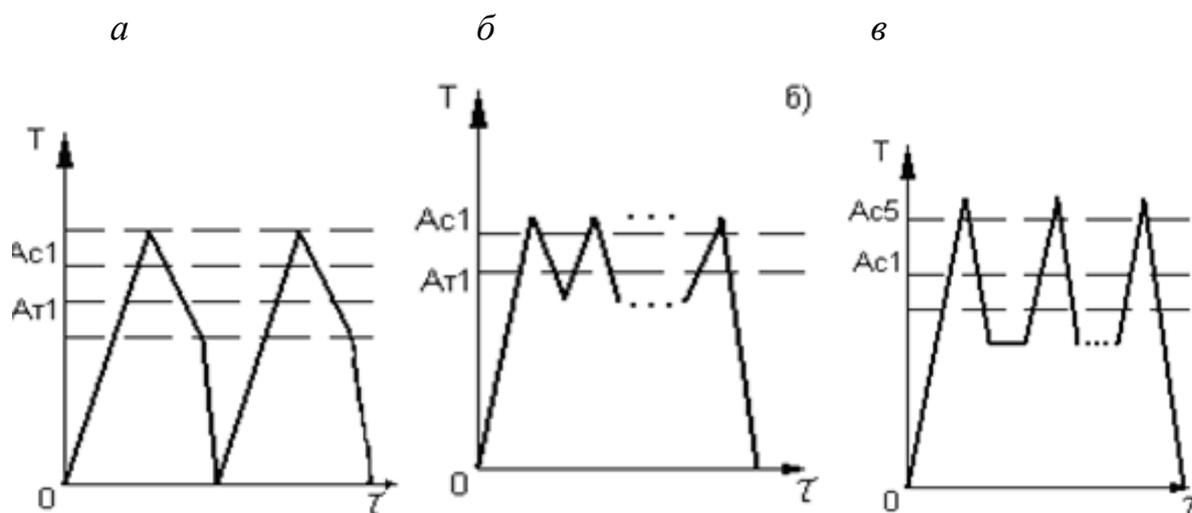


Рис. 31. Схемы ТЦО сталей: а – среднетемпературная, б – маятниковая, в – высокотемпературная

С помощью *маятниковой ТЦО* проводят измельчение зерен сталей ферритно-перлитных сталей. Нагрев сталей осуществляют при температуре на 30...50 °С выше  $A_{c1}$ , а последующее охлаждение ведут на воздухе до комнатной температуры.

*Среднетемпературная ТЦО* проводится для получения сорбитообразной структуры в конструкционных углеродистых сталях посредством быстрых нагревов до температуры на 30...50 °С выше  $A_{c1}$  с последующим охлаждением на воздухе до температуры на 30...50 °С ниже  $A_{r1}$  и далее в воде или масле.

*Высокотемпературная ТЦО* заключается в нагреве со скоростью около 50 °С/с до температуры полной аустенизации, охлаждением со скоростью 30...50 °С/с до температуры 420...450 °С. Затем циклы повторяют, в последнем цикле проводят закалку из аустенитного состояния.

Сочетание ТЦО с такими операциями, как закалка, отпуск, старение и другими, зачастую оказывается целесообразным, так как между тем появляется возможность дополнительного регулирования промежуточной структуры.

Разновидностью ТЦО углеродистых сталей является способ, приводящий к измельчению зерна и сфероидизации включений цементита. Так сфероидизирующая цементит ТЦО состоит из 3-6- кратного ускоренного нагрева сталей до температуры на 30...50 °С выше  $A_{c1}$  и охлаждении вначале на воздухе до окончания  $\gamma \rightarrow \alpha$ - превращения и далее в воде, масле или потоке влажного воздуха.

Сфероидизирующая ТЦО повышает ударную вязкость как при комнатных

температурах, так и при пониженных температурах, что особенно важно для МК, эксплуатируемых в условиях Севера.

Так как малоуглеродистые стали 08пс и Ст3 относятся к ферритно-перлитному классу, то наиболее приемлемой является маятниковая ТЦО.

Учитывая влияние выше рассмотренных факторов на получение мелкозернистой структуры с заданной степенью дисперсности (имеющей более высокие прочностные свойства), что очень важно для усиления металла в опасных зонах КН сварных соединений, для исследуемых сталей 08пс и Ст3 были приняты следующие режимы ТЦО: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10-кратный нагрев сталей до температуры 770 °С с последующим охлаждением на воздухе после каждого цикла.

Экспериментальные исследования ТЦО проводились на лабораторных и сварных образцах, которые изготавливались из пластин стали в состоянии заводской поставки.

## 2.8. Полный факторный эксперимент и его интерпретация

Для исследования влияния некоторых технологических факторов на напряженность магнитного поля рассеяния  $H_p$  были поставлены эксперименты по плану ПФЭ  $2^3$ , причем каждый эксперимент повторялся по три раза (табл. 6).

Исходная матрица планирования ПФЭ  $2^3$

Таблица 6

№ эксперимента	Исследуемые факторы			Результаты опытов		
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	+	+	+	-35	-37	-35
2	-	+	+	-40	-39	-41
3	+	-	+	15	16	16
4	-	-	+	12	12	11
5	+	+	-	45	43	46
6	-	+	-	39	41	41
7	+	-	-	63	60	62
8	-	-	-	71	71	71

В качестве факторов, влияющих на магнитный параметр  $y$  (А/м), были выбраны следующие:

$z_1$  – температура нагрева (°С),  $z_1^- = 750$ ,  $z_1^+ = 790$ ;

$z_2$  – количество циклов ТЦО ( $n$ ),  $z_2^- = 1$ ,  $z_2^+ = 10$ ;

$z_3$  – действующие напряжения  $\sigma$  (МПа),  $z_3^- = 0$ ,  $z_3^+ = 250$ .

Требуется построить уравнение регрессии, учитывая все взаимодействия факторов, проверить полученную модель на адекватность и произвести ее интерпретацию.

Работу выполняем в следующем порядке:

- кодируем переменные;
- достраиваем матрицу планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополняем столбцом средних значений отклика;
- вычисляем коэффициенты уравнения регрессии;
- проверяем вычисленные коэффициенты на значимость, предварительно определив дисперсию воспроизводимости, и получаем уравнение регрессии в кодированных переменных;
- проверяем полученное уравнение на адекватность;
- проводим интерпретацию полученной модели;
- выписываем уравнение регрессии в натуральных переменных.

1. Для каждого фактора находим центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной  $x_i$  от натуральной  $z_i$ . Оформляем результаты в таблице 7.

**Кодирование факторов**

*Таблица 7*

Факторы	Верхний уровень $z_i^+$	Нижний уровень $z_i^-$	Центр $z_i^0$	Интервал варьирования $\lambda_i$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
$z_1$	790	750	770	20	$x_1 = \frac{z_1 - 770}{20}$
$z_2$	10	1	5,5	4,5	$x_2 = \frac{z_2 - 5,5}{4,5}$
$z_3$	250	0	125	125	$x_3 = \frac{z_3 - 125}{125}$

2. По формуле  $\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}$ ,  $j = \overline{1, n}$  считаем средние выборочные результа-

тов для каждого эксперимента:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{3}(-35 + (-37) + (-35)) = -35,7; \quad \bar{y}_2 = \frac{1}{3}(-40 + (-39) + (-41)) = -40,0;$$

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{3}(15 + 16 + 16) = 15,7; \quad \bar{y}_4 = \frac{1}{3}(12 + 12 + 11) = 11,7;$$

$$\bar{y}_5 = \frac{1}{3}(45 + 43 + 46) = 44,7; \quad \bar{y}_6 = \frac{1}{3}(39 + 41 + 41) = 40,3;$$

$$\bar{y}_7 = \frac{1}{3}(63 + 60 + 62) = 61,7; \quad \bar{y}_8 = \frac{1}{3}(71 + 71 + 71) = 71,0;$$

Строим матрицу планирования с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика (табл. 8).

Матрица планирования для обработки результатов

Таблица 8

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_j$
1	+	+	+	+	+	+	+	-35	-37	-35	-35,7
2	-	+	+	-	-	+	-	-40	-39	-41	-40,0
3	+	-	+	-	+	-	-	15	16	16	15,7
4	-	-	+	+	-	-	+	12	12	11	11,7
5	+	+	-	+	-	-	-	45	43	46	44,7
6	-	+	-	-	+	-	+	39	41	41	40,3
7	+	-	-	-	-	+	+	63	60	62	61,7
8	-	-	-	+	+	+	-	71	71	71	71,0

3. Вычисляем коэффициенты уравнения регрессии по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j, \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j, \quad i = \overline{1, k}, \quad b_{r,p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} \bar{y}_j, \quad r < p, \quad r = \overline{1, k}, \quad p = \overline{1, k}.$$

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \bar{y}_j = \frac{1}{8}(-35,7 + (-40,0) + 15,7 + 11,7 + 44,7 + 40,3 + 61,7 + 71,0) \approx 21,17,$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} \bar{y}_j = \frac{1}{8}(-35,7 + (-40,0) * (-1) + 15,7 + 11,7 * (-1) + 44,7 + 40,3 * (-1) + 61,7 + 71,0 * (-1)) \approx 0,42,$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} \bar{y}_j = \frac{1}{8}(-35,7 + (-40,0) + 15,7 * (-1) + 11,7 * (-1) + 44,7 + 40,3 + 61,7 * (-1) + 71,0 * (-1)) \approx -18,83,$$

$$b_3 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j3} \bar{y}_j = \frac{1}{8}(-35,7 + (-40,0) + 15,7 + 11,7 + 44,7 * (-1) + 40,3 * (-1) + 61,7 * (-1) + 71,0 * (-1)) \approx -33,25,$$

$$b_{1,2} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} \bar{y}_j = \frac{1}{8} (-35,7 + (-40,0) * (-1) + 15,7 * (-1) + 11,7 + 44,7 + 40,3 * (-1) + 61,7 * (-1) + 71,0) \approx 1,75,$$

$$b_{1,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j3} \bar{y}_j = \frac{1}{8} (-35,7 + (-40,0) * (-1) + 15,7 + 11,7 * (-1) + 44,7 * (-1) + 40,3 + 61,7 * (-1) + 71,0) \approx 1,67,$$

$$b_{2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j2} x_{j3} \bar{y}_j = \frac{1}{8} (-35,7 + (-40,0) + 15,7 * (-1) + 11,7 * (-1) + 44,7 * (-1) + 40,3 * (-1) + 61,7 + 71,0) \approx -6,92,$$

$$b_{1,2,3} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{j1} x_{j2} x_{j3} \bar{y}_j = \frac{1}{8} (-35,7 + (-40,0) * (-1) + 15,7 * (-1) + 11,7 + 44,7 * (-1) + 40,3 + 61,7 + 71,0 * (-1)) \approx -1,67.$$

Составляем для наглядности табл. 9, в которую заносим найденные коэффициенты уравнения регрессии.

**Коэффициенты уравнения регрессии**

*Таблица 9*

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$
21,17	0,42	-18,83	-33,25	1,75	1,67	-6,92	-1,67

4. Находим дисперсию воспроизводимости  $S_{\{y\}}^2$ :

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2,$$

здесь внутренние суммы  $S_j^2$  являются выборочными дисперсиями результатов опытов для  $j$ -го эксперимента ( $j=1, \dots, n$ ). Для удобства оформляем расчеты в виде табл. 10.

Суммируя элементы последнего столбца таблицы 5, получаем:

$$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 9.$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 S_j^2 = \frac{1}{8} \cdot 9 = 1,1250.$$

Далее определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф.}} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n \cdot m}} \approx \sqrt{\frac{1,125}{8 \cdot 3}} \approx 0,22.$$

$j$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_j$	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	$S_j^2$
1	-35	-37	-35	-35,7	0,4444	1,7778	0,4444	1,3333
2	-40	-39	-41	-40,0	0	1	1	1
3	15	16	16	15,7	0,4444	0,1111	0,1111	0,3333
4	12	12	11	11,7	0,1111	0,1111	0,4444	0,3333
5	45	43	46	44,7	0,1111	2,7778	1,7778	2,3333
6	39	41	41	40,3	1,7778	0,4444	0,4444	1,3333
7	63	60	62	61,7	1,7778	2,7778	0,1111	2,3333
8	71	71	71	71,0	0	0	0	0

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $n \cdot (m-1) = 8 \cdot 2 = 16$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  находим  $t_{кр.} = 2,12$ . Следовательно,  $t_{кр.} \cdot S_{коэф.} = 2,12 \cdot 0,22 \approx 0,46$ .

Сравнивая полученное значение  $t_{кр.} \cdot S_{коэф.} \approx 0,46$  с коэффициентами уравнения регрессии, представленными в таблице 6, видим, что все коэффициенты, кроме  $b_1$ , больше по абсолютной величине 0,46. Следовательно, все коэффициенты, кроме  $b_1$ , значимы. Полагая, что  $b_1 = 0$ , получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 21,17 - 18,83x_2 - 33,25x_3 + 1,75x_1x_2 + 1,67x_1x_3 - 6,92x_2x_3 - 1,67x_1x_2x_3. \quad (2)$$

5. Проверим полученное уравнение (2) на адекватность по критерию Фишера. Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчетного значения критерия  $F_{расч.}$  необходимо вычислить остаточную дисперсию  $S^2_{ост.}$ .

Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии  $\tilde{y}_j$  ( $j=1, \dots, 8$ ), подставляя +1 или -1 вместо  $x_i$  в соответствии с номером  $j$  эксперимента из таблицы 8:

$$\tilde{y}_1 = 21,17 - 18,83 - 33,25 + 1,75 + 1,67 - 6,92 - 1,67 = -36,08;$$

$$\tilde{y}_2 = 21,17 - 18,83 - 33,25 + 1,75 \cdot (-1) + 1,67 \cdot (-1) - 6,92 - 1,67 \cdot (-1) = -39,58;$$

$$\tilde{y}_3 = 21,17 - 18,83 \cdot (-1) - 33,25 + 1,75 \cdot (-1) + 1,67 - 6,92 \cdot (-1) - 1,67 \cdot (-1) = 15,25;$$

$$\tilde{y}_4 = 21,17 - 18,83 \cdot (-1) - 33,25 + 1,75 + 1,67 \cdot (-1) - 6,92 \cdot (-1) - 1,67 = 12,08;$$

$$\tilde{y}_5 = 21,17 - 18,83 - 33,25*(-1) + 1,75 + 1,67*(-1) - 6,92*(-1) - 1,67*(-1) = 44,25;$$

$$\tilde{y}_6 = 21,17 - 18,83 - 33,25*(-1) + 1,75*(-1) + 1,67 - 6,92*(-1) - 1,67 = 40,75;$$

$$\tilde{y}_7 = 21,17 - 18,83*(-1) - 33,25*(-1) + 1,75*(-1) + 1,67*(-1) - 6,92 - 1,67 = 61,25;$$

$$\tilde{y}_8 = 21,17 - 18,83*(-1) - 33,25*(-1) + 1,75 + 1,67 - 6,92 - 1,67*(-1) = 71,42.$$

Остаточную дисперсию  $S_{ост.}^2$  вычисляем по формуле:

$$S_{ост.}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2,$$

где  $n$  – число экспериментов;

$m$  – число опытов в каждом эксперименте;

$r$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

$\tilde{y}_j$  – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для  $j$ -ого эксперимента;

$\bar{y}_j$  – среднее выборочное значение наблюдений для  $j$ -ого эксперимента.

$$S_{ост.}^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{j=1}^8 (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2 = 3 \cdot [(-36,08 - (-35,67))^2 + (-39,58 - (-40,00))^2 + (15,25 - 15,67)^2 + (12,08 - 11,67)^2 + (44,25 - 44,67)^2 + (40,75 - 40,33)^2 + (61,25 - 61,67)^2 + (71,42 - 71,00)^2] = 4,1667$$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_{расч.}$  определяем по формуле:

$$F_{расч.} = \frac{S_{ост.}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{4,1667}{1,1250} \approx 3,70.$$

Табличное значение критерия  $F_{табл.}$  находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  по соответствующим степеням свободы  $k_1 = n - r = 8 - 7 = 1$  и  $k_2 = n \cdot (m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$ :

$$F_{табл.} = 4,49.$$

Так как  $F_{расч.} = 3,70 < F_{табл.} = 4,49$ , то **уравнение регрессии (2) адекватно.**

6. Проведем интерпретацию полученной модели (2)

$$y = 21,17 - 18,83x_2 - 33,25x_3 + 1,75x_1x_2 + 1,67x_1x_3 - 6,92x_2x_3 - 1,67x_1x_2x_3.$$

7. Выписываем уравнение регрессии (2) в натуральных переменных, подставляя вместо  $x_i$  их выражения через  $z_i$ , которые берем из последнего столбца таблицы 4:

$$y = 21,17 - 18,83 \cdot \frac{z_2 - 5,5}{4,5} - 33,25 \cdot \frac{z_3 - 125}{125} + 1,75 \cdot \frac{z_1 - 770}{20} \cdot \frac{z_2 - 5,5}{4,5} + 1,67 \cdot \frac{z_1 - 770}{20} \cdot \frac{z_3 - 125}{125} - 6,92 \cdot \frac{z_2 - 5,5}{4,5} \cdot \frac{z_3 - 125}{125} - 1,67 \cdot \frac{z_1 - 770}{20} \cdot \frac{z_2 - 5,5}{4,5} \cdot \frac{z_3 - 125}{125}.$$

Преобразовав это уравнение, окончательно получаем его вид в натуральных переменных:

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

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор  $z_2$  – количество циклов ТЦО, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент.

После него по силе влияния на отклик (напряженность магнитного поля рассеяния  $H_p$ ) идут: фактор  $z_3$  – действующие напряжения  $\sigma$ ; фактор  $z_1$  – температура нагрева; парное взаимодействие  $z_2z_3$  – сочетание количества циклов ТЦО и действующих напряжений; парное взаимодействие  $z_1z_2$  – сочетание температуры нагрева и числа циклов ТЦО; минимальное влияние оказывают тройное взаимодействие всех факторов  $z_1z_2z_3$  и парное взаимодействие  $z_1z_3$ .

Так как коэффициенты при  $z_1z_2$ ,  $z_1z_3$  и  $z_2z_3$  положительны, то с увеличением этих факторов увеличивается отклик, т.е. возрастает значение магнитного параметра. Коэффициенты при  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  и  $z_1z_2z_3$  отрицательны, это означает, что с уменьшением факторов  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  и перечисленных взаимодействий значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

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, что подтверждают результаты математической обработки:

$$\begin{aligned} y'_{z_1} &= -0,292 + 0,038z_2 + 0,001z_3 - 0,0001z_2z_3 \\ y'_{z_2} &= -31,907 + 0,038z_1 + 0,102z_3 - 0,0001z_1z_3 \\ y'_{z_3} &= -1,341 + 0,001z_1 + 0,102z_2 - 0,0001z_1z_2 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} y'_{z_1} = -0,292 + 0,038z_2 + 0,001z_3 - 0,0001z_2z_3 = 0 \\ y'_{z_2} = -31,907 + 0,038z_1 + 0,102z_3 - 0,0001z_1z_3 = 0 \\ y'_{z_3} = -1,341 + 0,001z_1 + 0,102z_2 - 0,0001z_1z_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} z_1 = 770 \\ z_2 = 5 \\ z_3 = 127 \end{cases}$$

На рис. 32 приведена зависимость  $H_p$  от температуры нагрева  $H_p(z_1)$  при  $z_2 = 5$  и  $z_3 = 127$  МПа.

На рис. 33 приведена зависимость  $H_p$  от числа циклов ТЦО  $H_p(z_2)$  при  $z_1 = 770$  °С и  $z_3 = 127$  МПа.

На рис. 34 приведена зависимость  $H_p$  от действующих напряжений  $H_p(z_3)$  при  $z_1 = 770$  °С и  $z_2 = 5$ .

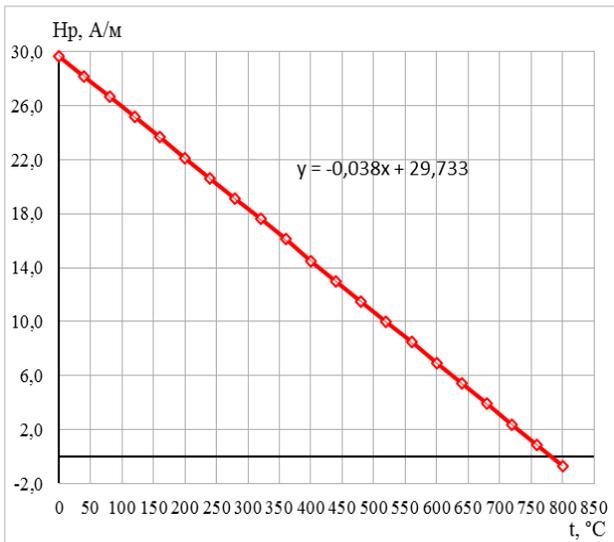


Рис. 32. График зависимости параметра  $H_p$  от температуры нагрева при числе циклов ТЦО  $z_2=5$  и величин действующих напряжений  $z_3=127$  МПа

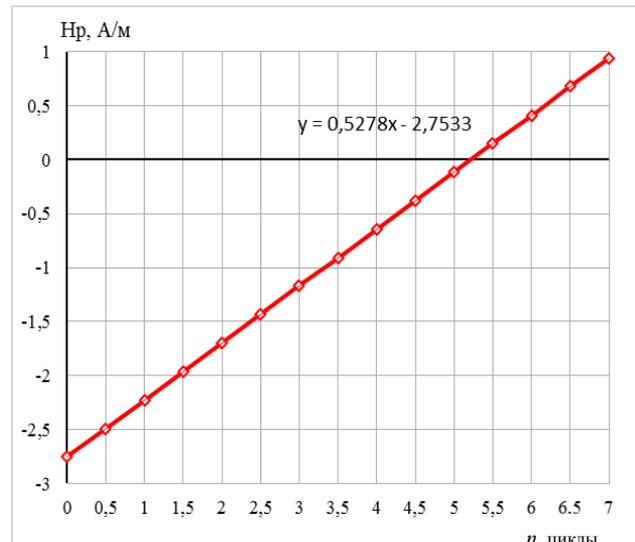


Рис. 33. График зависимости параметра  $H_p$  от числа циклов ТЦО при температуре нагрева  $z_1=770$  °С и величин действующих напряжений  $z_3=127$  МПа

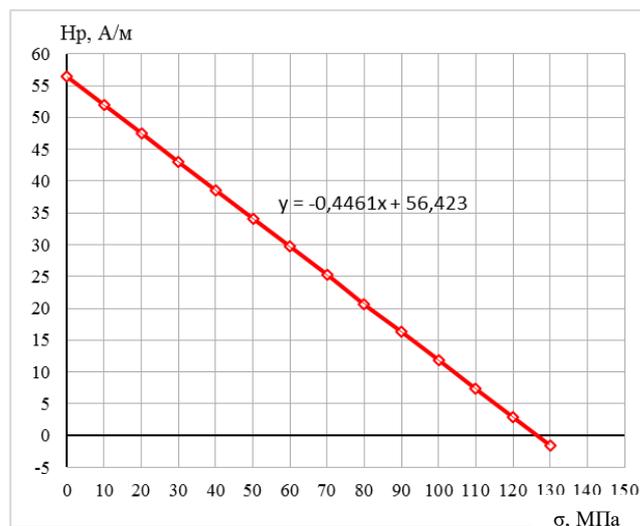


Рис. 34. График зависимости параметра  $H_p$  от действующих напряжений при температуре нагрева  $z_1=770$  °С и числе циклов ТЦО  $z_2=5$

## Выводы по главе 2

1. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к конструкционным сталям для изготовления сварных металлоконструкций строительных машин, с учетом условий их эксплуатации при низких и высоких температурах, при наличии многообразия видов и режимов нагружения и сделан обоснованный выбор ферромагнитных конструкционных сталей.

2. Разработаны экспериментальные методики: методика механических испытаний, включающая в себя подготовку лабораторных и сварных образцов к механическим испытаниям, методика измерения микротвердости различных зон сварных соединений, методика термической обработки, методика металлографического анализа.

3. Разработана методика пассивного феррозондового контроля, основанная на взаимосвязи структурных, механических и магнитных параметров конструкционных сталей, позволяющая проводить экспериментальные исследования с целью расширения и уточнения этих связей при упругопластическом деформировании ферромагнитных конструкционных сталей.

4. Исследовано влияние толщины немагнитного защитного покрытия на результаты пассивного феррозондового контроля при выявлении локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях (сварном шве, зоне термического влияния и основном металле) металлоконструкций строительных машин. Определены границы максимальной толщины защитных покрытий.

5. Разработаны режимы получения в конструкционных сталях мелкозернистой структуры с высокими прочностными свойствами за счет проведения термоциклической обработки с поэтапным контролем структурных изменений и ее окончания пассивным феррозондовым методом.

## **ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

### **3.1. Обоснование необходимости получения мелкозернистых структур в конструкционных сталях**

При изготовлении сварных металлических конструкций строительных машин широко используются конструкционные малоуглеродистые и низколегированные стали, которые в состоянии заводской поставки (горячекатаное, холоднокатаное и термически обработанное) могут иметь различную микроструктуру (крупнозернистую, мелкозернистую и деформированную). Известно, что структура определяет механические свойства сталей, поэтому они могут значительно отличаться не только в различных частях конструкции, но и в отдельных элементах и особенно в сварных соединениях, включающих в себя сварной шов, зону термического влияния и основной металл).

Для сварных соединений металлических конструкций характерна структурная и механическая неоднородность, которая в значительной степени определяется исходной структурой свариваемых материалов, правильностью выбранной технологии сварки, характером физического воздействия на металл и степенью завершенности фазовых и структурных превращений, протекающих в металле при сварке. В сварном соединении при охлаждении образуются зоны с различными структурами: литой дендритной – в зоне сварного шва, крупнозернистой – на участке перегрева, мелкозернистой – в зоне полной перекристаллизации и основном металле – в состоянии заводской поставки, по-разному определяющих механические свойства.

Контроль качества сварных металлических конструкций показывает, что одной из основных причин повреждения сварных соединений является структурная и механическая неоднородность различных зон, способствующая образованию зон концентрации напряжений и усталостных трещин под действием высоких переменных напряжений. В то же время, в опасных зонах КН сварных соединений и элементов длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций может пройти холодная пластическая деформация на ту или иную степень. Поэтому возникает необходимость проведения экспериментальных ис-

следований по оценке степени влияния микроструктуры металла на эксплуатационную надежность сварных соединений и элементов сварных МК строительных машин.

Экспериментальные исследования показывают, что прочность отожженных металлов и сплавов, испытанных при достаточно низких температурах, когда процессы возврата затруднены, возрастает с измельчением размера зерен. Так, при уменьшении размера зерен в интервале от 10 до 1 мкм предел текучести [115], напряжение течения при различных значениях деформации [112], предел прочности [40, 112], твердость [114] и усталостная прочность [116] значительного ряда металлов и сплавов возрастает. Исследования показали, что одной из основных практически важных причин, обусловленных мелкозернистой структурой металлов, является повышение их прочностных свойств.

Так, измельчение зерен стали 20 с 6 до 11 балла приводит к повышению предела прочности от 1300 до 1420 МПа [40]. Для стали 40 при измельчении размера зерен с 7 до 15 балла при отпуске 100 °С наблюдалось упрочнение на 300...500 МПа; при этом  $\sigma_B$  достигало 2600 МПа.

При уменьшении размера зерен с 6 до 0,6 мкм предел текучести стали Jп-744 повышался от 490 до 860 МПа [29], при этом выполнялось уравнение Холла-Петча, согласно которому, предел текучести металла связан с размером зерен следующим соотношением:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}, \quad (4)$$

где  $d$  – размер зерен,  $\sigma_0$  – параметр, который характеризует сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций и  $k$  – параметр, который характеризует барьерный эффект границ зерен при переходе скольжения от зерна к зерну.

Прирост прочности той же стали, обусловленный измельчением зерен с 6 до 0,6 мкм (примерно на 420 МПа), сохраняется даже после значительной холодной деформации. Так, прочность холодотянутой на 98,8 % проволоки повысилась с 2000 до 2450 МПа. Уровень прочности стальной проволоки [108] с минимальным размером зерен примерно в 70 раз выше, чем у монокристалла железа, содержащего углерод. При этом ее прочность составляет 60 % от максимальной прочности, полученной на усах железа. Экстраполяция кривой напряжение–размер зерна показывает, что верхний предел теоретического зна-

чения предела текучести может быть достигнут, если размер зерна поликристалла будет уменьшен до межатомных расстояний.

Наличие мелкозернистой структуры оказывает большое влияние и на механические свойства. Так, металлы с объемно-центрированной кристаллической решеткой (ОЦК) имеют тенденцию к переходу из вязкого состояния в хрупкое при низких скоростях деформации и определенной температуре. Поэтому при температуре ниже температуры хрупкости металл разрушается без образования шейки. На ударную вязкость значительное влияние оказывает размер зерен. Так, при его изменении с 2 до 25 мкм температура перехода вязкого разрушения к хрупкому стали Jn-744 изменяется в сторону повышенных температур от -130 до -45 °С [113]. Это различие в свойствах вызвано только различием размера зерен, так как химсостав фаз и крупнозернистого, и мелкозернистого металла был одинаков.

В связи с вышесказанным представляет значительный научный и практический интерес проведение исследований как по оценке влияния исходной структуры, структурной и механической неоднородности сварных соединений и структурных изменений в металле элементов конструкций на эксплуатационную надежность сварных металлических конструкций строительных машин, так и по проведению контроля процесса формирования структуры с различной степенью дисперсности в конструкционных сталях в зависимости от воздействия различных факторов, с изысканием простых и надежных способов получения мелкозернистой структуры, обладающей высокими прочностными свойствами.

### **3.2. Оценка степени опасности различных зон сварных соединений в процессе упругого циклического деформирования**

Проведенный анализ показывает, что наиболее распространенными местами разрушений сварных МК являются сварные соединения, включающие в себя сварной шов, зону сплавления сварного шва с основным металлом, участок перегрева, зону полной перекристаллизации и основной металл, которые обладают структурной и механической неоднородностью. Следует отметить, что различные зоны сварных соединений даже без наличия эксплуатационных дефектов являются зонами концентрации действующих напряжений, так как в процессе охлаждения ванны жидкого металла при сварке вследствие перепада

температур происходит изменение структуры в области сварного шва и ЗТВ, что приводит к появлению различных включений, термических напряжений. Поэтому возникает вопрос: какие зоны и места сварного соединения являются наиболее опасными, и какие зоны необходимо контролировать в первую очередь при их техническом диагностировании. В связи с чем представляло интерес оценить степень опасности основных зон сварных соединений.

Для исследований применялись плоские сварные образцы из стали Ст3 толщиной 3, 5 и 10 мм, у части из которых в сварном шве была снята выпуклость. При механических испытаниях во время остановок проводилось измерение значений магнитного параметра  $H_p$  в зоне сварного шва, зоне сплавления с участком перегрева и в зоне основного металла.

Учитывая, что реальные МК работают в условиях упругого НДС, весьма важным было проследить изменение магнитного параметра  $H_p$  от действующих напряжений в сварном соединении при циклическом ступенчатом упругом деформировании.

Экспериментальные исследования на сварных образцах без снятия выпуклости сварного шва показали, что значительные изменения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  отмечаются в сварном шве, а наибольшее – в зоне сплавления основного металла со сварным швом и участком перегрева, что свидетельствует о наличии в этой зоне более высоких действующих напряжений. Образование такой локальной зоны концентрации напряжений может быть вызвано следующими основными факторами: наличием технологического концентратора напряжений (малые радиусы перехода от сварного шва к основному металлу), влиянием структурной и механической неоднородности в зоне сплавления, сформированной в процессе кристаллизации, или их совместным влиянием, то есть наличием крупнозернистой структурой, имеющей низкие прочностные свойства.

С целью исключения влияния различных концентраторов напряжений в процессе механических испытаний были взяты образцы со снятой выпуклостью сварного шва. На рис. 35 приведены типичные зависимости значений магнитного параметра  $H_p$  от действующих напряжений  $\sigma$  в контролируемых зонах при ступенчатом одноосном упругом растяжении сварных образцов.

Видно, что независимо от зоны контроля самые большие изменения магнитного параметра  $H_p$  происходят в процессе 1-го цикла нагружение–

разгрузке. Увеличение действующих напряжений  $\sigma$  приводит к уменьшению напряженности магнитного поля, при снятии нагрузки – к повышению. При циклическом изменении внешних нагрузок образуется петля магнитного гистерезиса. При первом цикле нагружение–разгрузка эта петля обычно не замкнута: при этом конечные значения магнитного параметра  $H_p$  не совпадают с начальными значениями. При втором и последующих циклах упругого деформирования петля магнитного гистерезиса замыкается, и, следовательно, снимается магнитомеханическая предыстория исходного состояния контролируемой поверхности.

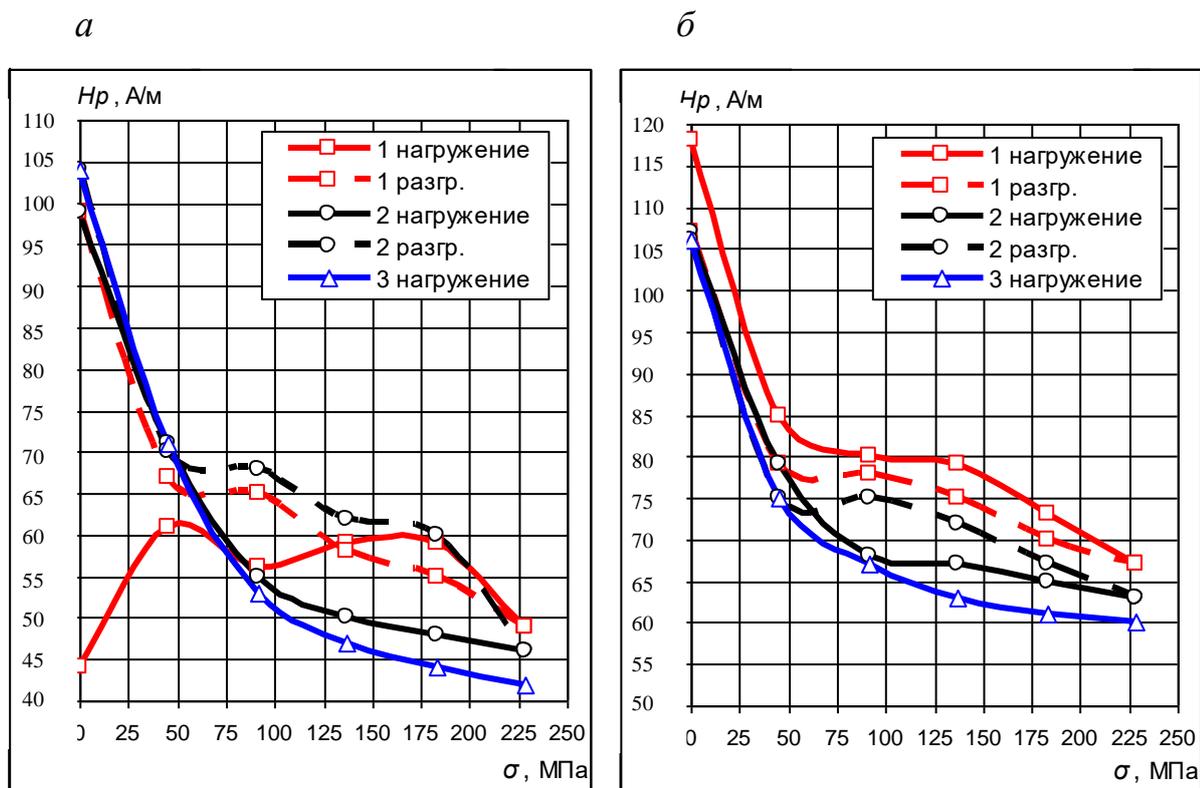


Рис. 35. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния от действующих напряжений в сварном соединении из стали Ст3 со снятой выпуклостью: *а* – в зоне сплавления основного металла со сварным швом, *б* – в зоне основного металла

Второй цикл нагружение–разгрузка приводит к сближению магнитного параметра  $H_p$ , при этом конечные значения  $H_p$  во многих случаях совпадают с исходными. Таким образом, независимо от магнитной предыстории контролируемых зон, начиная со второго цикла нагружения, изменение значений напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от  $\sigma$  изменяется идентичным образом. Полученные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с результа-

тами, полученными при упругом деформировании стандартных образцов из конструкционных сталей.

При анализе зависимостей  $H_p(\sigma)$  (рис. 35) видно, что меньшим изменениям  $H_p$  в процессе 2-го и 3-го нагружений следует зона основного металла. В зоне сплавления с участком перегрева и зоне сварного шва наблюдается более значительное изменение  $H_p$ , что свидетельствует о наличии более высоких действующих напряжений.

Учитывая вышесказанное, можно констатировать, что в процессе разработки методики магнитного контроля при упругом деформировании установлена взаимосвязь между напряженностью магнитного поля рассеяния  $H_p$ , действующими напряжениями и структурным состоянием металла в различных зонах и участках сварного соединения. Показано, что наименьшие изменения параметра  $H_p$  присущи зоне основного металла, максимальные - зоне сплавления с участком перегрева и несколько меньшие - сварному шву, что свидетельствует о наличии в этих зонах более высоких действующих напряжений. Таким образом, одним из наиболее опасных мест сварного соединения является зона сплавления сварного шва с основным металлом и примыкающим участком перегрева и менее опасным- сварной шов.

Такое неоднозначное изменение магнитных свойств от действующих напряжений при упругом деформировании в значительной степени связано со структурной неоднородностью сварного соединения, которая, в свою очередь, определяется исходной структурой свариваемых материалов, характером физического воздействия на него и степенью завершенности фазовых и структурных превращений, протекающих в металле при сварке.

Максимальное число структурных изменений при сварке наблюдается в металлах, претерпевающих полиморфные превращения. Однако независимо от наличия или отсутствия у металла полиморфного превращения при сварке плавлением в сварном соединении можно выделить три основных области (рис. 36).

Первая – это область, где металл был нагрет до температуры выше линии

солидус и находился в жидком или твердо-жидком состоянии, вторая – область термического влияния, где температура нагрева была достаточна для полного или частичного протекания фазовых превращений и рекристаллизации, и третья – область механического и термомеханического влияния, где пребывание металла при более низкой температуре недостаточно для прохождения фазовых превращений и рекристаллизации. Значит, в этой области сохраняются изменения, обусловленные как пластической, так и упругой деформацией металла при наличии сварочных напряжений. Далее следует основной металл, в котором в результате сварки возникают напряжения, которые не сопровождаются пластической деформацией металла.

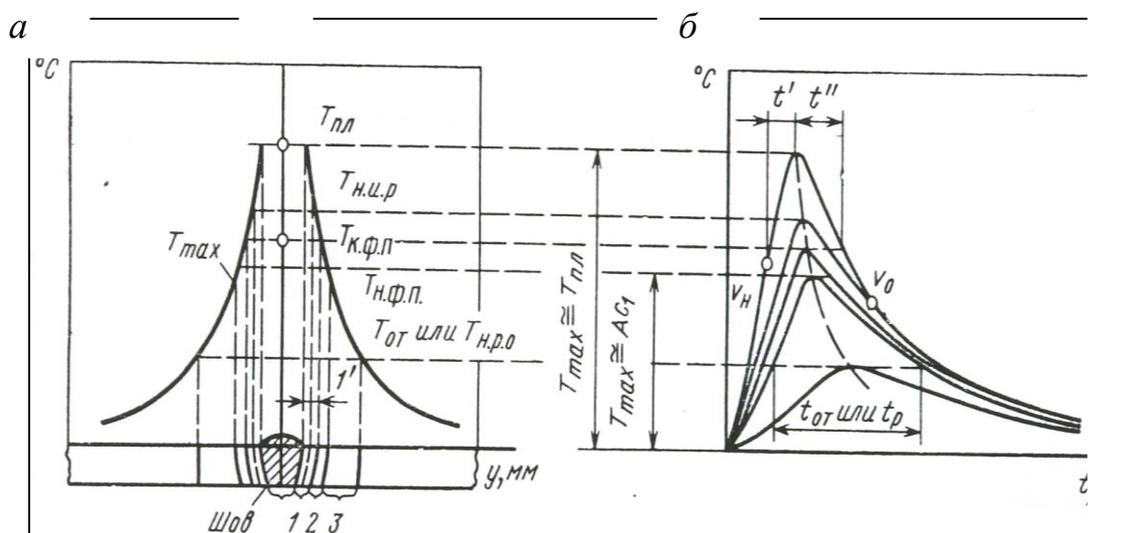


Рис. 36. Строение зон стыкового сварного соединения сталей с полиморфным превращением: *а* – распределение максимальных температур  $T_{max}$  поперек шва и соответствующие им участки зоны термического влияния; *б* – термические циклы на границах отдельных участков зоны термического влияния, где:  $T_{пл}$  и  $T_{н.и.р}$  – температуры плавления и начала интенсивного роста зерна,  $T_{н.ф.п}$  и  $T_{к.ф.п}$  – температуры начала и конца фазового превращения при нагреве,  $T_{от}$  и  $T_{н.р.о}$  – температуры отпуска закаленного основного металла перед сваркой и начала рекристаллизации обработки

В металле сварного шва и зоне сплавления вследствие характерных особенностей кристаллизации и активности физико-химических процессов наблюдаются наибольшие изменения химического состава металла, его неоднород-

ность, а также образование различных дефектов сварного соединения: поры (в сталях всех классов, медных и алюминиевых сплавах), горячие и холодные трещины (в высоколегированной стали, титановых сплавах, цветных металлах) [4]. Металлографический анализ стыковых сварных соединений показал наличие структурной неоднородности, возникающей в процессе структурных изменений металла при сварке.

На рис. 37 приведена типичная панорама структуры стыкового сварного соединения из стали Ст3 толщиной 3 мм, включающая в себя сварной шов, зону сплавления основного металла с участком перегрева, участок перегрева, зону полной перекристаллизации стали и основной металл.

Анализ панорамы показывает, что микроструктура сварного шва имеет дендритное строение (рис. 38), что определяется условиями сварки и свойствами свариваемой стали Ст3. В отличие от массивных слитков, в сварных швах оси роста кристаллов выглядят в виде пространственных кривых, что, вероятно, связано с изменением формы сварочной ванны в плоскостях, параллельных плоскости свариваемого листа, а также перемещением теплового поля в направлении проводимой сварки (рис. 39, *а*).

Следует подчеркнуть, что при стыковой сварке тонких листов пространственная схема кристаллизации сменяется плоской, при этом криволинейные оси роста образующихся кристаллов оказываются расположенными в параллельных плоскостях. Небольшой объем сварочной ванны, а также большая кривизна оплаиваемой поверхности приводят к большей разориентации кристаллов в сварном шве, чем в слитках (рис. 39, *б*).

В зоне сплавления сварного шва с участком перегрева (рис. 40) металл в процессе сварки находится в твердожидком состоянии, т.е. между температурами ликвидус и солидус. Ширина зоны сплавления в основном зависит от химсостава стали, т.е. от неравновесных температур ликвидуса и солидуса. Кроме того, в этой зоне происходят значительные изменения химсостава и свойств стали как за счет особенностей процесса кристаллизации, так и интенсивного протекания диффузионных процессов.

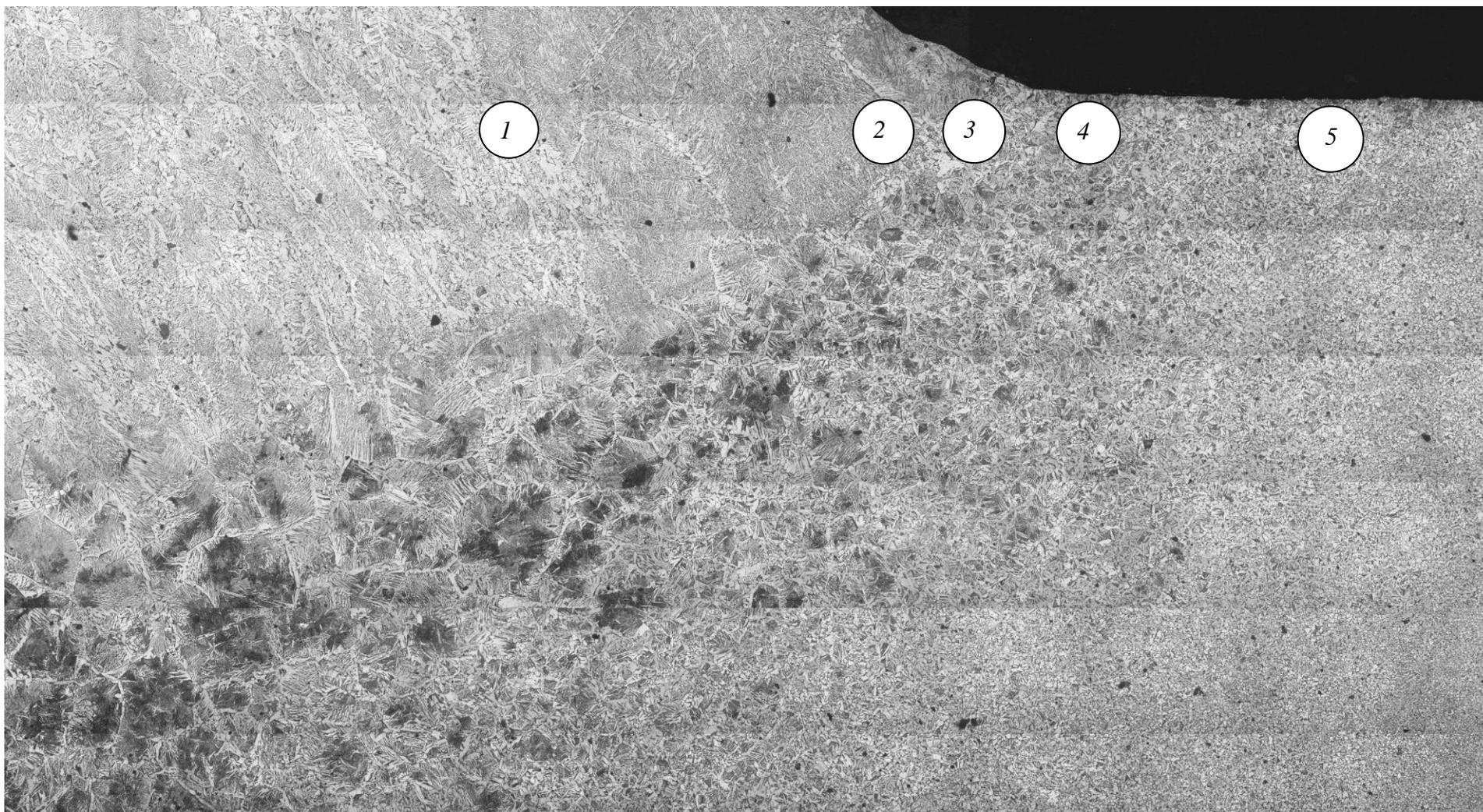


Рис. 37. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3, х50: 1 – сварной шов; 2 – зона сплавления основного металла с участком перегрева; 3 – участок перегрева; 4 – зона полной перекристаллизации; 5 – основной металл

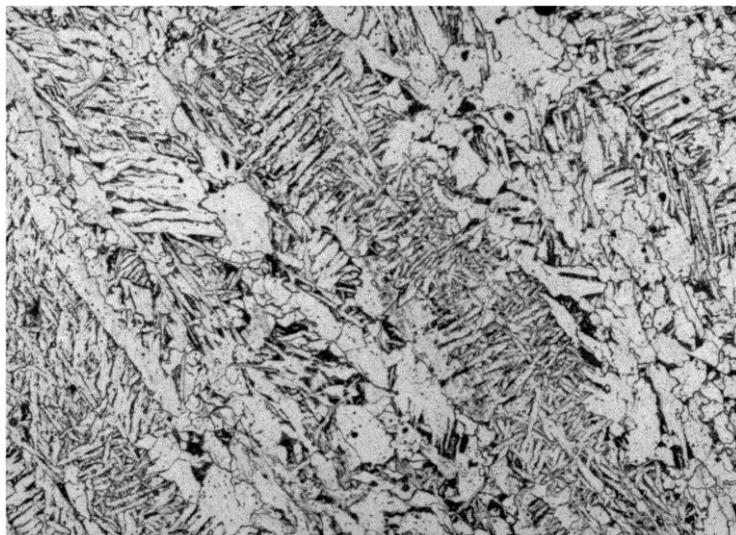


Рис. 38. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 в сварном шве,  $\times 200$

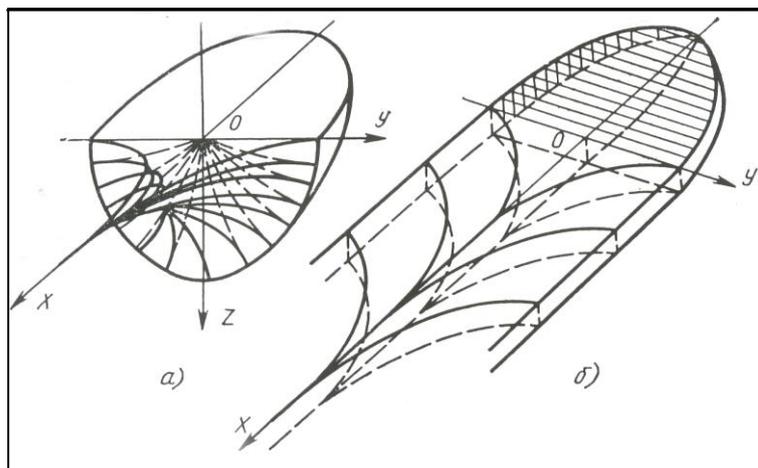


Рис. 39. Траектории роста кристаллитов в сварочной ванне при схемах кристаллизации: *a* – пространственной; *б* – плоской

Так, например, изменение строения перлита в этих зонах в малоуглеродистых сталях, обусловленное высокими скоростями охлаждения, приводит к снижению пластичности и увеличению прочности металла шва (рис. 41).

Одной из важных зон является участок перегрева, в котором температура стали изменяется от линии солидус до  $A_{c3}$ . Эта зона характеризуется тем, что металл в ней претерпевает полные структурные и фазовые превращения, характерные для углеродистых сталей, в связи с чем на участке перегрева формируется крупнозернистая структура, имеющая низкие

прочностные свойства (рис. 42). В этой зоне температура нагрева металла является достаточной для полного или частичного протекания фазовых превращений и рекристаллизации.



Рис. 40. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3в зоне сплавления с участком перегрева, х200

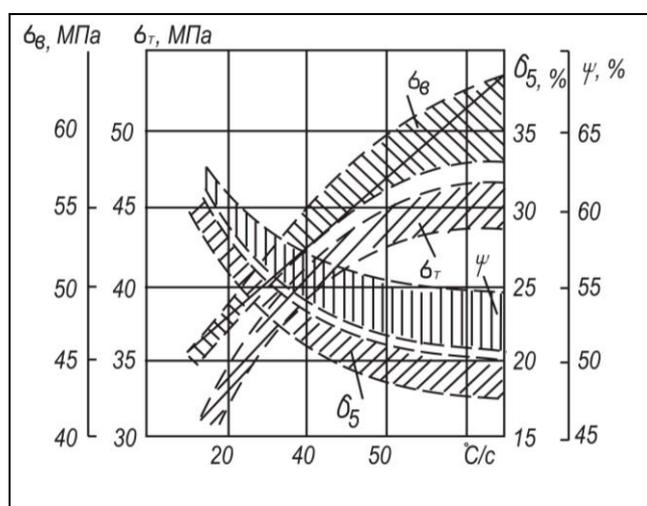


Рис. 41. Зависимость между скоростью охлаждения и механическими свойствами металла сварного шва

Следует отметить, что зона сплавления и находящийся рядом с ней участок перегрева являются также и местами вероятного образования горячих и холодных трещин. Для малоуглеродистых сталей в зоне нагрева свыше 1000 °С наблюдается значительный рост зерен, особенно при электрошлаковой и газовой сварке, что существенно снижает механические свойства сталей.

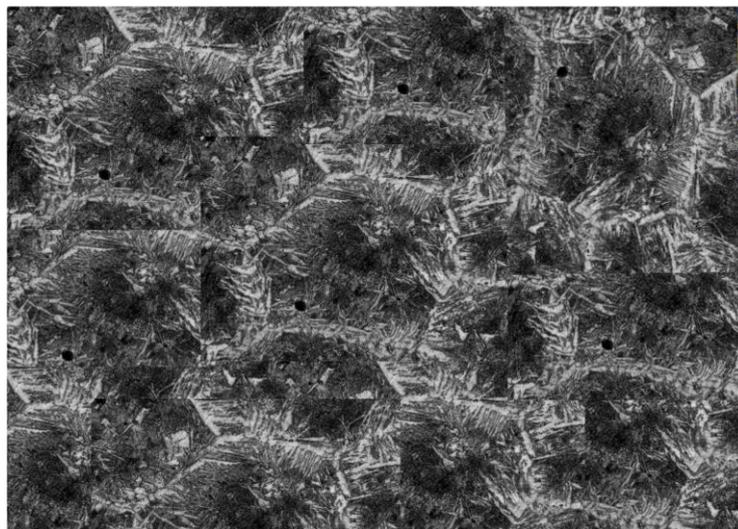


Рис. 42. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 на участке перегрева, х200

За участком перегрева следует область механического и термомеханического влияния, в которой температура нагрева металла и время этого нагрева не достаточны для протекания фазовых и структурных изменений (рис. 43). На этом участке сварного соединения в полной мере сохраняются все изменения, вызванные упругой и пластической деформацией под действием сварочных напряжений.

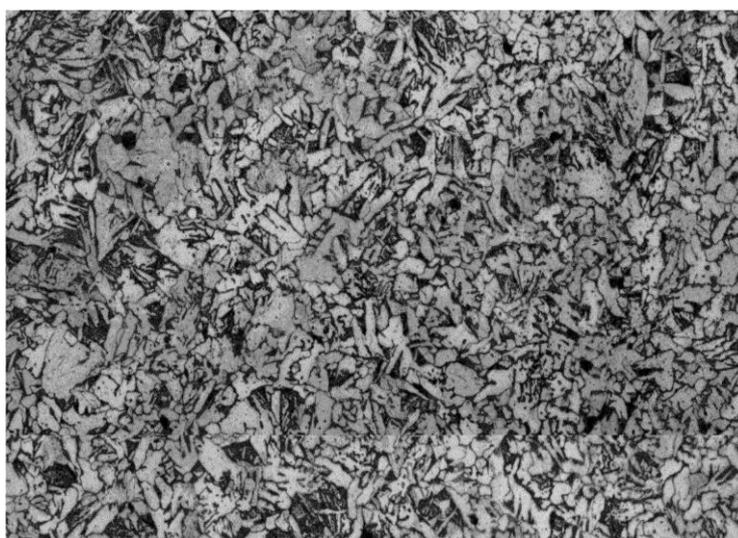


Рис. 43. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 на участке полной перекристаллизации, х200

Микроструктура в зоне основного металла, не претерпевшая структурных изменений в процессе сварки, показана на рис. 44. Видно, что эта

структура по сравнению со структурой сварного шва и зоной сплавления с участком перегрева является более мелкозернистой, и, в соответствии с уравнением Холла-Петча [15], обладает более высокими прочностными свойствами.

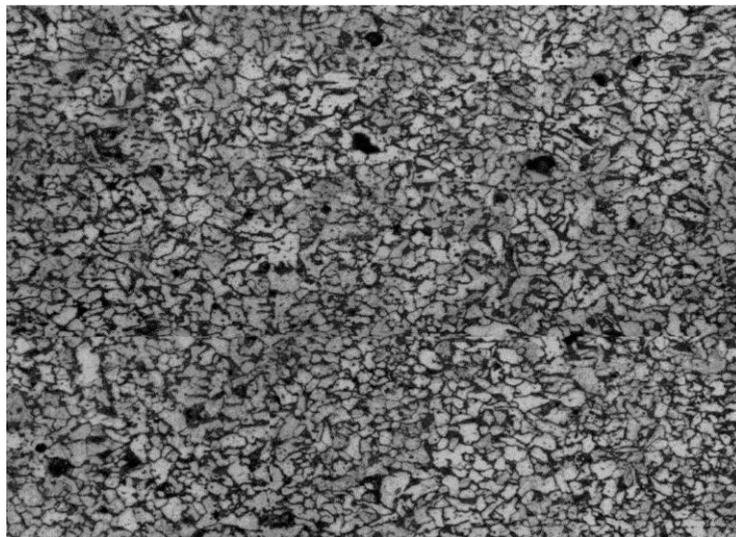


Рис. 44. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 в зоне основного металла, x200

Авторы работы [35] показали, что с уменьшением величины размера зерен значительно увеличиваются такие характеристики металлов, как пределы текучести и прочности, твердость и ударная вязкость.

Данные по измерению микротвердости стыкового сварного соединения, включающего сварной шов, зону термического влияния и основной металл (рис. 45), приведены на рис. 46, *а*.

Видно, что сварному соединению присуща прочностная неоднородность: микротвердость в зонах с крупнозернистой структурой значительно ниже, чем с более мелкозернистой. На рис. 46, *б* приведена структура основного металла сварного соединения с отпечатком микротвердости.

В работе была рассмотрена микроструктура сварных соединений толщиной 5 и 10 мм, панорама которых качественно ничем не отличается от панорамы, приведенной на рис. 37. Однако ширина зон и участков сварного соединения с увеличением толщины основного металла повышается.

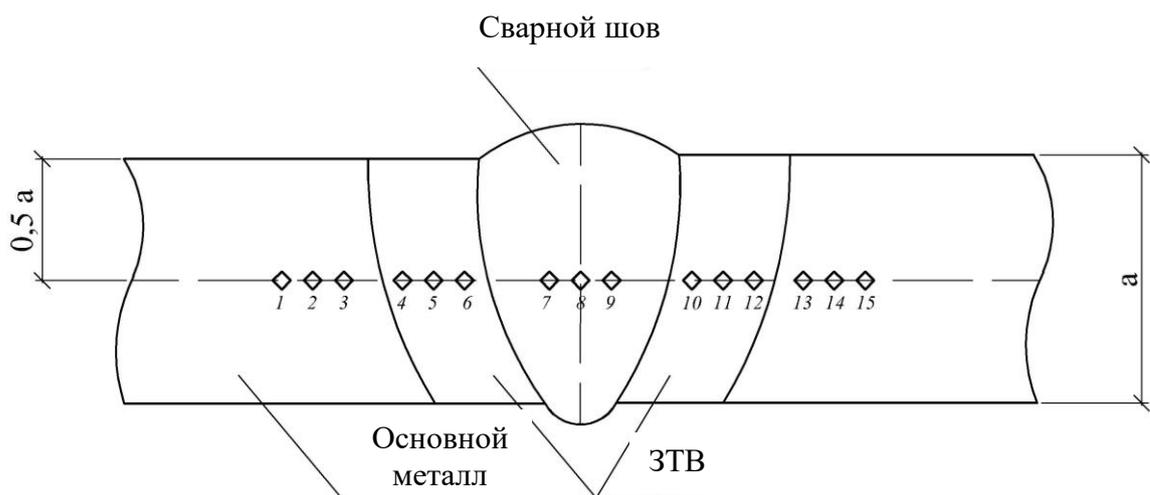
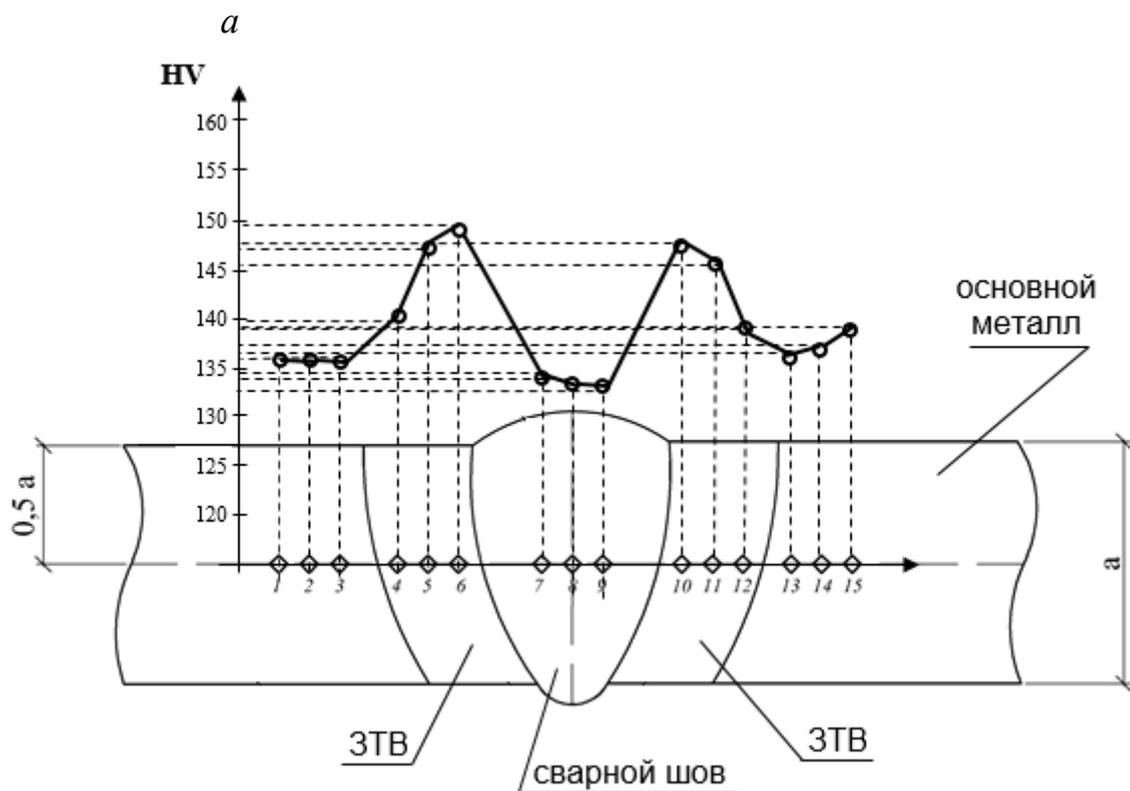


Рис. 45. Схема измерения микротвердости стыкового сварного соединения из стали Ст3

В табл. 11 приведены примерные температуры и обобщенные размеры различных зон сварных соединений в зависимости от толщины основного металла.

Таблица 11

Зона сварного соединения	Структура металла	Температура, °С	Ширина, мм
Сварной шов	Столбчатая, литая, с пониженными механическими свойствами	1530±5	½ ширины шва
Линия сплавления	Рост зерна, образование игольчатой структуры с повышенной хрупкостью	1530-1470	0,1-0,4
Участок перегрева	Крупнозернистое строение с пониженной ударной вязкостью и пластичностью	1470-1100	3-4
Участок полной перекристаллизации	Измельчение зерна, повышение механических свойств	1100-880	0,2-4,0
Основной металл	Структурных изменений не имеет	510-200	0,8-12



*б*

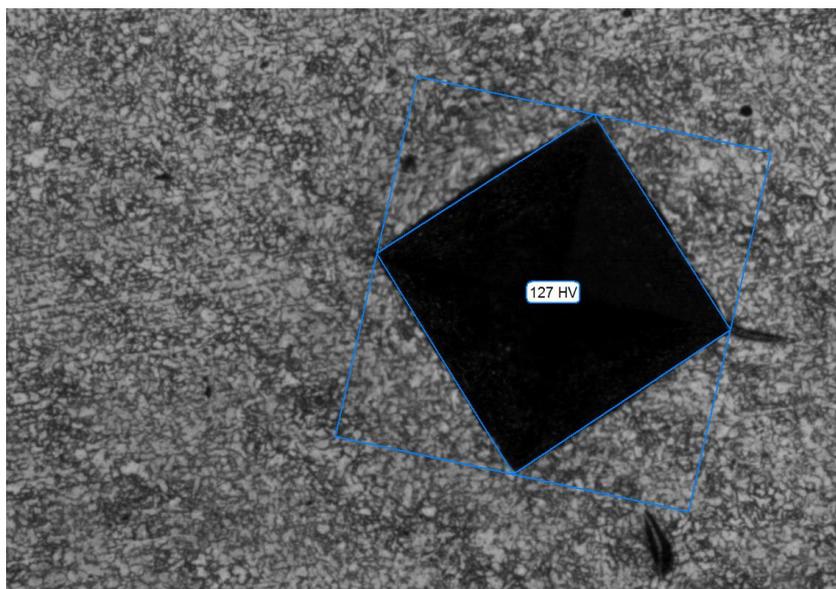


Рис. 46. Изменение микротвердости металла стыкового сварного соединения из стали Ст3 (*a*); микроструктура основного металла с отпечатком микротвердости (*б*),  $\times 100$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что одним из наиболее опасных мест сварного соединения является зона сплавления сварного шва с основным металлом и примыкающим участком перегрева. Наличие радиусов перехода от металла сварного шва к основному металлу

может только усугублять эту опасность и способствовать возникновению трещин в малом объеме крупнозернистого участка зоны термического влияния. Поэтому при диагностическом контроле сварных соединений МК необходимо в первую очередь контролировать зону сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева и во вторую- сварной шов.

В то же время, именно в этих опасных локальных зонах КН нужно знать фактические значения действующих напряжений, так как они определяют несущую способность сварных металлоконструкций строительных машин в целом. Отсутствие знаний о величине действующих напряжений в таких локальных опасных зонах КН в значительной мере снижает ценность прочностных расчетов и фактически приводит к неправильной оценке несущей способности сварных МК строительных машин. Следовательно, сложившееся положение требует не только разработки новых способов выявления опасных локальных зон КН в сварных соединениях, но и новых способов усиления металла в таких зонах до нормативного уровня.

### **3.3. Разработка оптимальных режимов термоциклической обработки для снижения структурной неоднородности сварных соединений**

Современные сварные металлические конструкции строительных машин во многих случаях изготавливают из листового прокатного металла малоуглеродистых и низколегированных сталей без проведения термической обработки после сварки. В состоянии поставки металл этих сталей имеет феррито-перлитную структуру с более или менее выраженной, в зависимости от толщины листов, прокатной текстурой. Свойства сварных соединений таких сталей в основном определяются степенью развития рекристаллизации и огрубления структуры околошовной зоны и сварного шва. Выбор режимов и технологии сварки стали определяется типом конструкции, условиями её эксплуатации и характером термической обработки до и после сварки.

Высокая работоспособность сварных конструкций во многих случаях зависит от структуры и механических свойств сварных соединений, реже от их физических или химических свойств, например, таких, как электро-

проводность, сопротивление коррозии и др.

При оценке работоспособности сварной металлоконструкции необходимо исходить из анализа процесса возникновения и развития различных дефектов с учетом их специфики в каждом отдельном случае. Однако сложность такого анализа заключается не только в многообразии сочетания разных факторов, влияющих на процесс разрушения (рис. 47), но и ограниченностью представлений о возможных механизмах появления и роста трещин применительно к металлу сварных металлических конструкций с их структурной и механической неоднородностью.

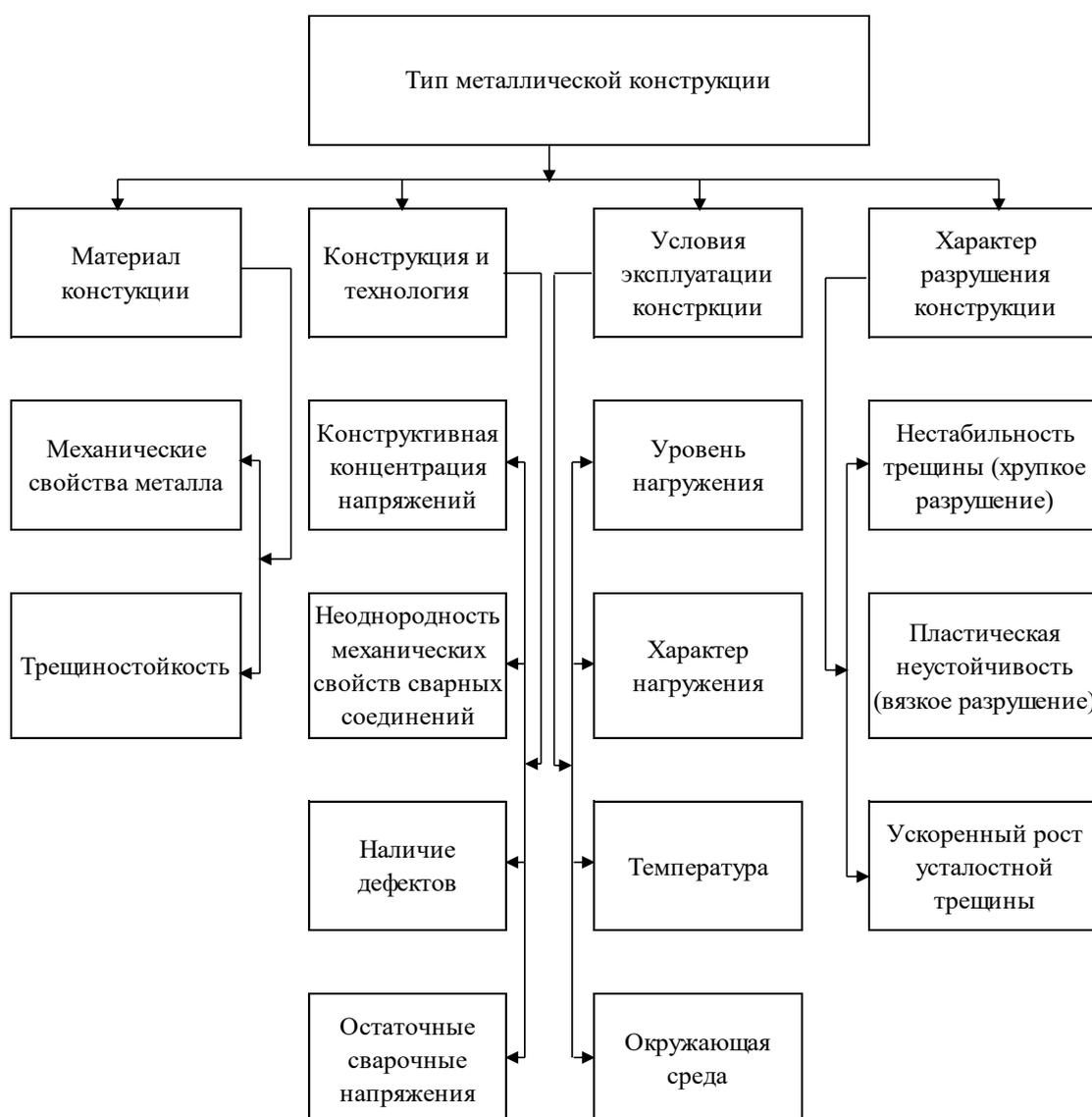


Рис. 47. Факторы, определяющие возможность наступления предельного состояния разрушения сварных металлических конструкций и его характер

В процессе длительной эксплуатации сварных МК строительных машин в сварных соединениях, имеющих структурную и механическую неоднородность, и элементах МК образуются локальные зоны концентрации напряжений. Их отличительной особенностью является то, что они сравнительно малы по сравнению со сварными соединениями и размерами элементов металлоконструкций. В связи с чем усиление таких зон существующими методами не всегда удается. Так, например, усиление элементов сварных металлоконструкций за счет увеличения площади поперечного сечения путем приварки новых дополнительных деталей обладает значительным недостатком: усиливающие элементы поздно включаются в работу, кроме того, приварка таких усиливающих элементов вызывает в сжатых стойках дополнительные деформации, что снижает эффективность проводимого усиления.

К недостаткам усиления конструкций изменением конструктивной схемы являются значительные затраты на проведение дополнительных работ, увеличенный расход металла, высокая трудоемкость, а также введение в элементы конструкции остаточных сварочных напряжений, возникающих в процессе сварки, которые могут существенно снизить надежность и работоспособность усиленной конструкции.

Общими недостатками других способов усиления (усиление сварных соединений; установка элементов, перекрывающих местные дефекты; установка дополнительных ребер жесткости и другие) являются высокие металлоемкость и трудоемкость, значительная длина сварных швов, дополнительные работы по устройству подмостей, разборка ограждений и т.д. Кроме того, усиление сварных соединений за счет увеличения поперечного сечения вышеперечисленными способами может приводить к возникновению новых локальных зон КН, временами не менее опасных, чем устраняемые. Наиболее надежным способом усиления металла в локальных зонах КН является получение в них мелкозернистой структуры с более высокими прочностными свойствами.

Проведенный анализ показал, что наиболее приемлемым способом для этого является проведение ТЦО. Поэтому для усиления металла в локальных зонах КН в сварном шве и зоне термического влияния была раз-

работана методика получения мелкозернистой структуры за счет применения ТЦО с контролем структурных изменений металла пассивным феррозондовым методом.

Одним из основных структурных изменений стали при ТЦО является не только значительное измельчение зерен, но и уменьшение разнородности и более однородное распределение химических элементов. Главная причина, вызывающая подобные изменения в структуре конструкционных сталей, состоит в интенсификации диффузионных процессов за счет усиленного воздействия теплофизических процессов.

Так накопление дислокаций и образование полигональной субструктуры после ТЦО чистого железа [16] и малоуглеродистой стали [26] позволяет считать, что за формирование дислокационной структуры отвечают полиморфные превращения, которые приводят к фазовому наклепу преимущественно посредством разницы удельных объемов и модулей упругости образующихся фаз. При этом фазовый наклеп может сопровождаться процессами рекристаллизации, которые по мере накопления дефектов деформации могут повторяться от цикла к циклу [35].

Применение ТЦО позволяет получать микроструктуры сталей, характерные для заводского проката (горячекатаное, холоднокатаное, термически обработанное), а также такие мелкозернистые структуры, которые недостижимы при обычных видах термической обработки [35]. Это в свою очередь позволяет использовать ТЦО для усиления опасных зон КН в сварных соединениях, обладающих структурной и механической неоднородностью, за счет формирования в локальных зонах мелкозернистой структуры, имеющей повышенные прочностные свойства.

Одной из основных задач повышения надежности и безопасности эксплуатации строительных машин является поддержание несущей способности их металлических конструкций, что при длительной эксплуатации осуществляется путем оценки напряженно-деформированного состояния МК при проведении технического диагностирования.

Однако оценка фактического напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций строительных машин представляет существенные трудности, особенно при оценке локальных опасных зон кон-

центрации напряжений в сварных соединениях металлических конструкций, которые в виду их небольших размеров трудно выявлять.

Тем не менее, в разделе 3.2. нами было показано [65], что наиболее опасными зонами в сварных соединениях являются зона сплавления сварного шва с участком перегрева и сварной шов, которые мы рекомендовали контролировать в первую и вторую очередь соответственно.

Другой не менее важной задачей является восстановление до допустимого уровня несущей способности сварных металлоконструкций путем усиления металла в опасных зонах КН сварных соединений и элементах МК, что, как было показано выше, является весьма сложной задачей.

Одним из путей решения этой задачи является проведение термоциклической обработки сварных соединений, имеющих литую дендритную структуру в сварном шве и крупнозернистую в зоне сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева (где чаще всего образуются опасные локальные зоны КН) для перевода ее в более мелкозернистую.

Поэтому разработка методики получения структуры с заданной степенью дисперсности зерен в различных зонах сварных соединений представляет большой научный и практический интерес, что открывает широкие перспективы для восстановления несущей способности сварных длительно эксплуатируемых МК строительных машин.

Для проведения экспериментальных исследований на сварных образцах из конструкционной стали 08пс и Ст3 была разработана методика получения мелкозернистых структур с различной степенью дисперсности в различных зонах сварного соединения (сварном шве, зоне термического влияния и основном металле). Для этих целей из малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3 в соответствии с [43] изготавливались сварные образцы, которые подвергались термоциклической обработке по следующим режимам: нагрев до 770 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Процесс формирования мелкозернистой структуры при ТЦО контролировался ПФ методом, а также методом микроструктурного анализа и твердометрии. Измерение напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  сварных соединений проводилось с помощью прибора ИКНМ-2ФП с двухканальным феррозондовым преобразователем. Значения магнитного

параметра  $H_p$  замеряли как перед началом, так и по окончании каждого из циклов ТЦО нагрев-охлаждение. При построении зависимостей величин  $H_p$  от числа циклов принималось среднее значение магнитного параметра  $H_p$  контролируемых зон. Число циклов было следующее: 1, 3, 5, 7, 10.

На рис. 48 приведена зависимость магнитного параметра  $H_p$  от числа циклов ТЦО для сталей 08пс и Ст3 в наиболее опасных зонах сварного соединения и основном металле сварного соединения.

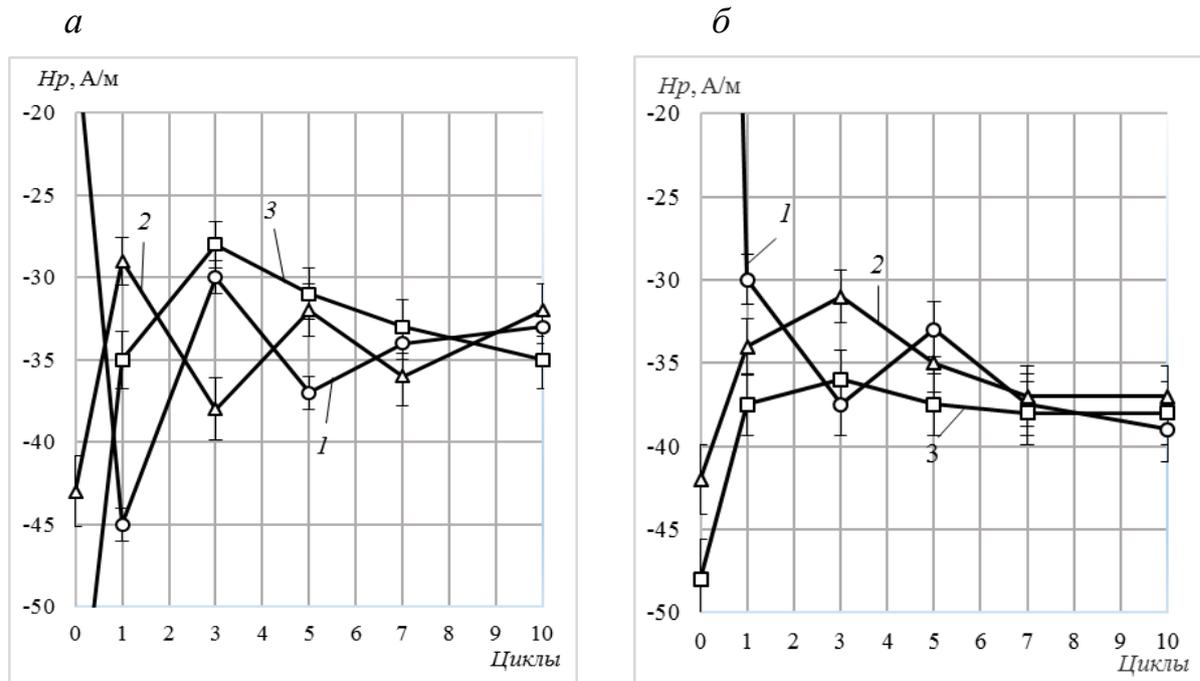


Рис. 48. Зависимость напряженности магнитного поля  $H_p$  от числа циклов при термоциклировании сварных соединений из сталей 08пс (а) и Ст3 (б) в: 1- сварном шве; 2- зоне сплавления с участком перегрева; 3- основном металле

Видно, что наибольшие изменения значений  $H_p$  в зоне основного металла сварного соединения наблюдаются в процессе первых 3-5 циклов ТЦО. При дальнейшем увеличении числа циклов происходит стабилизация значений магнитного поля  $H_p$ , что заметно по уменьшению амплитуды значений  $H_p$ . Увеличение числа циклов с 5 до 7 и 10 практически не оказывает влияния на изменение напряженности магнитного поля рассеяния.

Для сварного шва и участка перегрева сварного соединения наблюдается несколько иная картина изменения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$ . Практически с 1 по 7 цикл нагрев-охлаждение амплитуда значений  $H_p$  остается постоянной, и только после 7 цикла несколько снижается, что, вероятно, свидетельствует о примерно одинаковом уровне

проходящих структурных изменений металла в процессе 10 кратной ТЦО.

Таким образом, видно, что в зависимости от зоны сварного соединения в одном случае (для основного металла) после пятого цикла нагрев-охлаждение амплитуда  $H_p$  значительно уменьшается, тогда как для сварного шва и участка перегрева остается практически на прежнем уровне, что свидетельствует о некотором различии структурных изменений металла в процессе термоциклической обработки. При этом, увеличение числа циклов нагрев-охлаждение до 10 практически не уменьшает разброса значений магнитного параметра  $H_p$ .

Металлографические исследования показали, что изменения значений магнитного параметра  $H_p$  в зависимости от числа циклов ТЦО связаны со значительными структурными изменениями в сварных соединениях конструкционных сталей, происходящими в процессе ТЦО. При этом было показано, что в исследуемых сварных образцах, изготовленных из сталей 08пс и Ст3, в процессе ТЦО формируется более мелкозернистая структура во всех зонах и участках сварного соединения. При этом, формирование мелкозернистой структуры в основном металле заканчивается после 3-5 циклов нагрев-охлаждение, т.е. на более ранней стадии.

Увеличение числа циклов более 5 менее значительно измельчает структуру, что хорошо согласуется с данными изменения  $H_p$ , так как при последующих циклах наблюдается уменьшение амплитуды колебаний магнитного поля  $H_p$ . Аналогичные данные были получены авторами [35], где на углеродистых сталях 30, 40 и 60 было показано, что для получения мелкозернистой структуры и оптимальных механических свойств число циклов ТЦО равнялось 5-6. Сильное измельчение зерен в одних областях металла по сравнению с другими после 1-го цикла отмечалось авторами [29]. При дальнейшем увеличении числа циклов происходило измельчение структуры во всех областях.

Рассмотрим более подробно микроструктуру металла в других зонах сварных соединений до и после ТЦО для малоуглеродистой стали Ст3 и, в первую очередь, в сварном шве и участке перегрева.

Литая структура сварного шва в процессе термоциклической обра-

ботки испытывает значительные структурные изменения, хотя до такой ТЦО сварной шов обладал специфической дендритной ориентированной структурой (рис. 49-51).

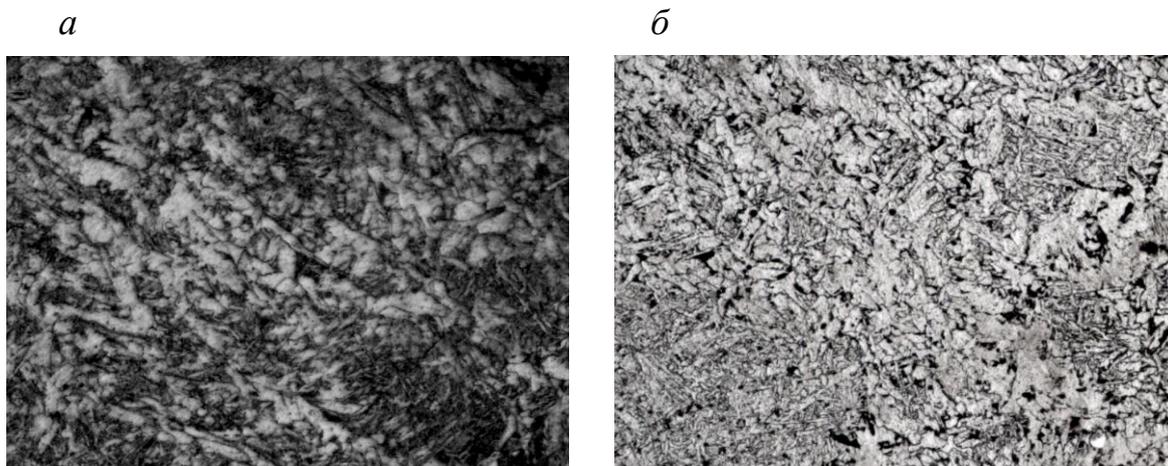


Рис.49. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 в сварном шве после 3 циклов ТЦО, х200: *а* – сварной шов; *б* – участок перегрева

В зоне сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева с увеличением числа циклов также наблюдается значительное измельчение структуры (рис. 49-51).

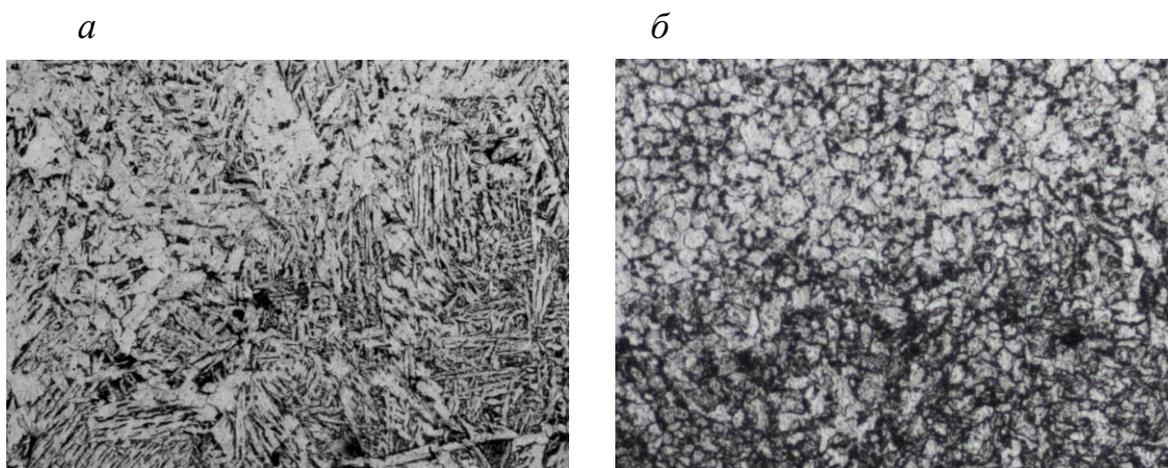


Рис.50. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 после 5 циклов ТЦО, х200: *а* – сварной шов; *б* – участок перегрева

Существенные структурные изменения происходят на участке перегрева, при этом размер зерен после ТЦО значительно уменьшается, что способствует повышению прочностных свойств конструкционной стали Ст3.

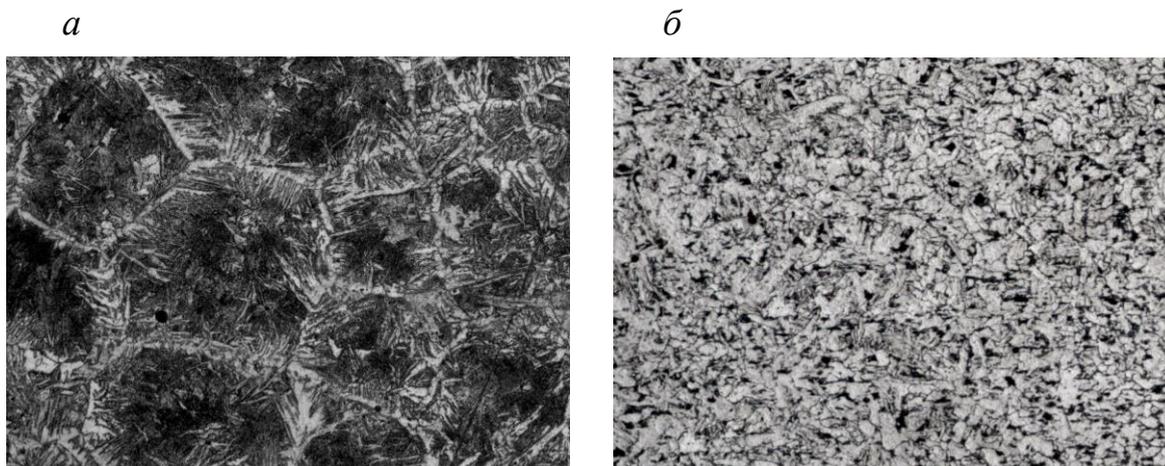


Рис.51. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 после 10 циклов ТЦО, x200: *а* – сварной шов; *б* – участок перегрева

Типичное изменение структуры основного металла сварного соединения из стали 08пс в состоянии заводской поставки в процессе пятикратной термоциклической обработки представлено на рис. 52.

Видно, что первый цикл ТЦО в стали формирует разнотернистую микроструктуру, то есть в одних местах происходит наиболее ошутимое измельчение зерен, чем в других, соседних. При увеличении числа циклов измельчение зерен происходит практически во всех областях, в которых они были крупнее. При этом разнотернистость значительно уменьшаться после 3-го цикла, а после 5 циклов обработки в стали 08пс формируется довольно однородная структура металла с мелким зерном.

Представляло практический интерес рассмотрение структуры сварного соединения из малоуглеродистой стали Ст3 с толщиной свариваемых деталей до 10 мм, характерных для сварных МК строительных машин, после сварки и последующей ТЦО.

На рис. 53 представлена микроструктура сварного шва с линией сплавления и участком перегрева до и после 10-кратной термоциклической обработки. Видно, что после сварки пластин толщиной 10 мм сварной шов имеет менее выраженную литую дендритную структуру (рис. 53 *а*) в отличие от сварных образцов толщиной 3 мм, рассмотренных нами ранее. Вероятно, это связано с некоторым изменением формы сварочной ванны в плоскостях, параллельных плоскости свариваемых более толстых пластин, а также перемещением теплового поля в направлении проводимой сварки.

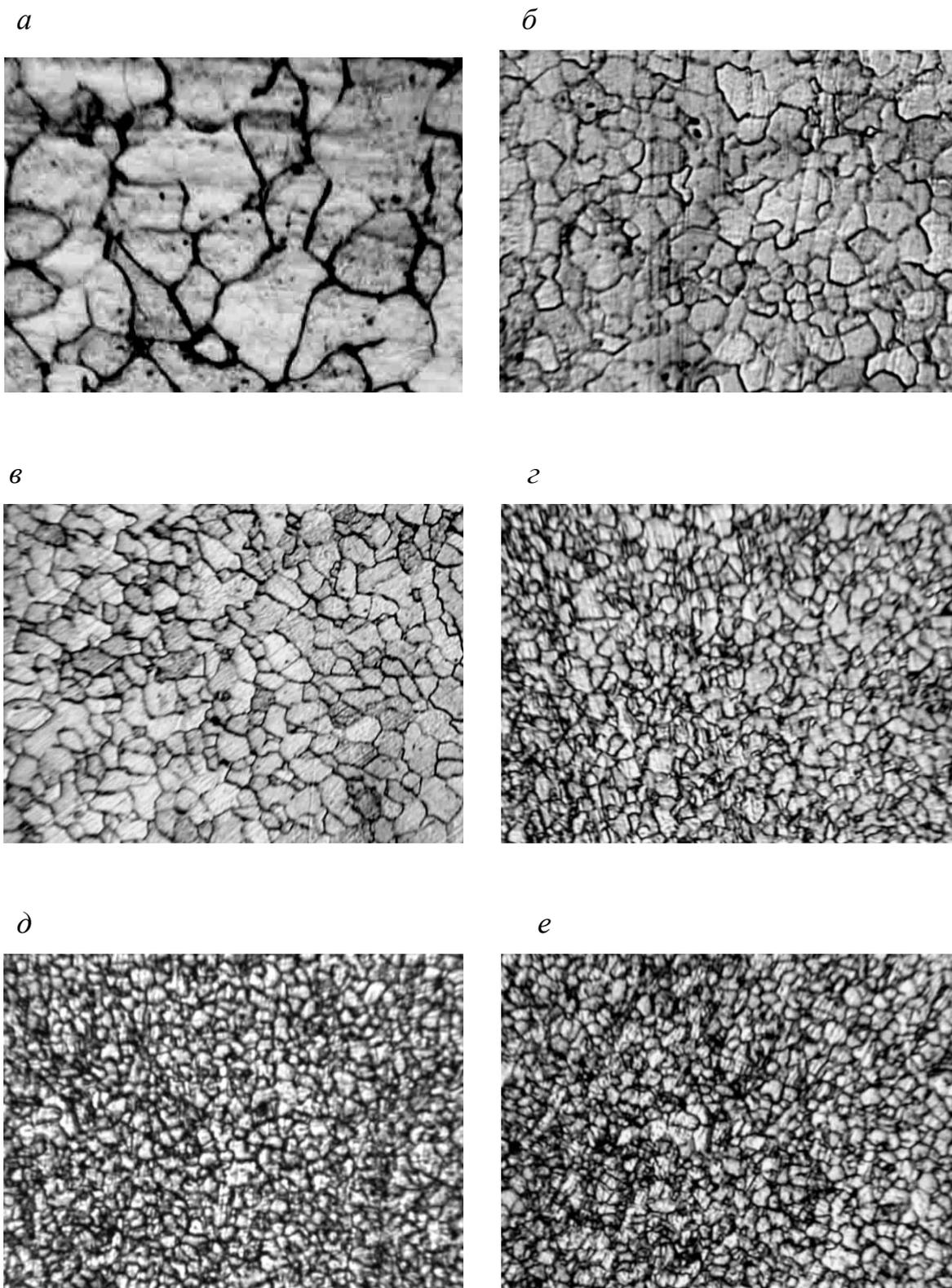


Рис. 52. Изменение структуры стали 08пс при термоциклической обработке, х650:  
а- основной металл в состоянии заводской поставки;  
б-е- после 1-5 циклов соответственно

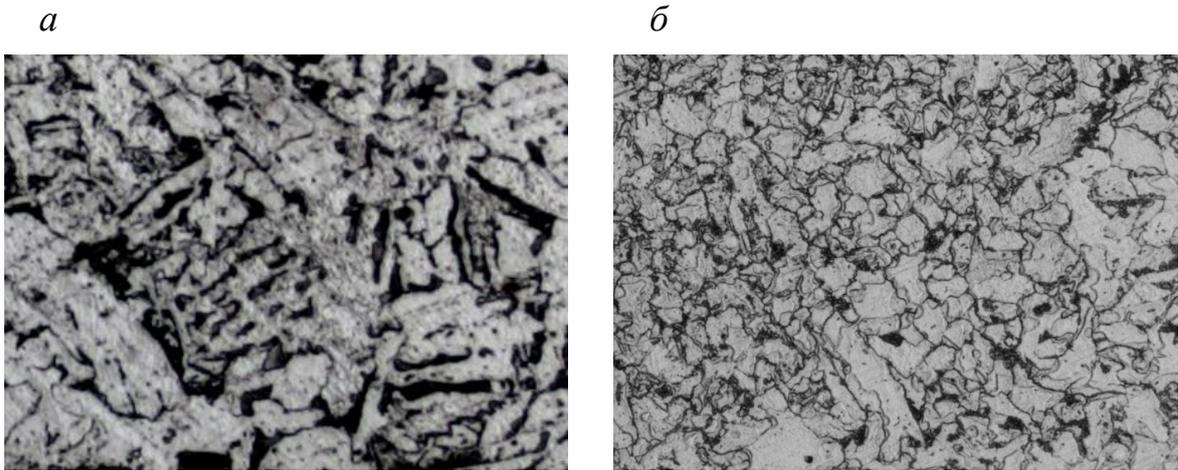


Рис. 53. Микроструктура сварного шва с зоной сплавления и участком перегрева сварного соединения толщиной 10 мм из стали Ст3, x200:

*a* – до и *б* – после проведения 10-кратной ТЦО

Проведение ТЦО позволяет значительно измельчить микроструктуру стали во всех зонах сварного соединения, а также и в основном металле (рис. 54) толщиной 10 мм. То есть независимо от толщины свариваемых деталей и различных зон сварного соединения удается в результате ТЦО получить более мелкозернистую структуру.

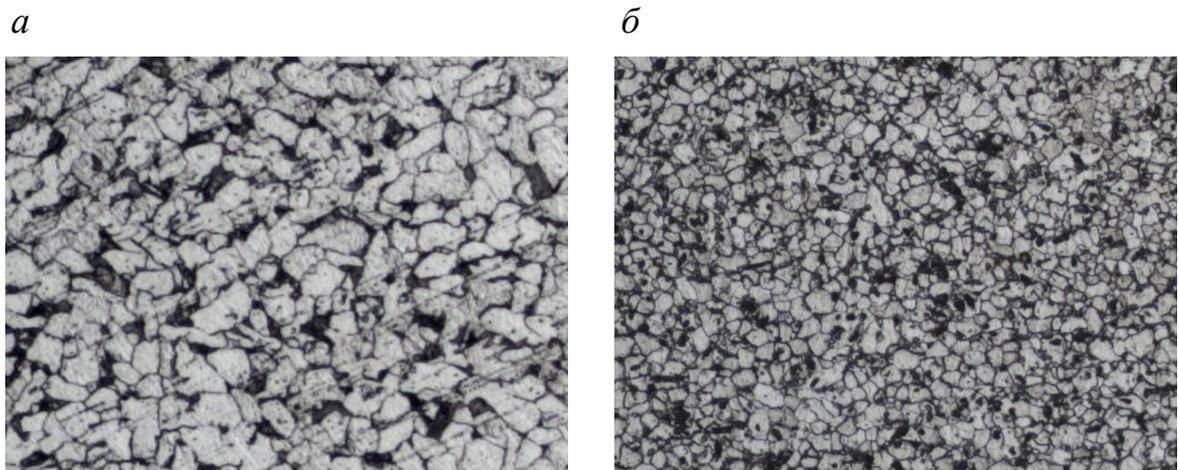


Рис. 54. Микроструктура основного металла сварного соединения толщиной 10 мм из стали Ст3, x200: *a* – до и *б* – после проведения 5-кратной ТЦО

Таким образом, интенсивное прохождение структурных изменений и практически полное формирование мелкозернистой структуры после 3-5 циклов подтверждается значительным изменением напряженности маг-

нитного поля рассеяния  $H_p$  в процессе термоциклической обработки. Следовательно, с помощью пассивного феррозондового метода появляется возможность контроля структурных изменений металла при формировании мелкозернистой структуры в сварных соединениях независимо от их толщины из конструкционных сталей на самых ранних стадиях термоциклической обработки.

Поэтому можно констатировать, что в результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между значениями магнитного поля  $H_p$  и структурными изменениями в сварных соединениях при ТЦО. Самое сильное изменение значений  $H_p$  происходит в процессе первых 3-5 циклов нагрев-охлаждение. Дальнейшее увеличение числа циклов до 7-10 незначительно уменьшает амплитуду магнитного поля  $H_p$ , что связано с менее ощутимым измельчением структуры металла в различных зонах сварных соединений и основном металле при последующих циклах. Поэтому такой характер изменения значений  $H_p$  можно использовать при контроле формирования мелкозернистой структуры в конструкционных сталях при ТЦО как в сварных соединениях, так и элементах сварных МК строительных машин.

#### **3.4. Влияние ТЦО на повышение прочностных свойств конструкционных сталей в различных зонах сварных соединений**

Термоциклическая обработка, позволяющая получать мелкозернистую структуру в сталях, значительно изменяет их механические характеристики (предел текучести, предел прочности, ударную вязкость, пластичность, усталостную прочность).

Так, прочностные и механические свойства сталей можно повысить проведением ТЦО за счет измельчения зерен и сфероидизации частиц цементита при 3-6- кратном ускоренном нагреве углеродистых сталей 30, 40, 45, 60 до температуры на 30...50 °С выше точки  $A_{c1}$  с последующим охлаждением на воздухе до окончания  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения и далее в воде или масле [35]. Сфероидизация сталей термоциклической обработкой повышает прочность, пластичность и ударную вязкость. Например, предел текуче-

сти повышается на 6...15 %, пластичность на 10...25 %, а ударная вязкость на 70...110 %. При этом, ударная вязкость повышается как при комнатной температуре, так и при пониженных температурах, что особенно важно для сварных МК, работающих в условиях Севера.

Авторы работы [28] в литой стали 20Л после проведения ТЦО наблюдали резкое увеличение вязкости разрушения и трещиностойкости стали, которые объяснили получением мелкозернистой структуры с размером зерен 5...11 мкм. Механические свойства при этом по сравнению с нормализацией стали, закалкой и отпуском повышались:  $\sigma_{0,2}$  с 290 до 330 Мпа,  $\sigma_b$  – с 520 до 530 Мпа, а пластичность  $\delta$  до 24 %.

В работе [97] при испытании углеродистой стали 45 на циклическую прочность (усталость) нормализованная сталь показала  $\sigma_{1К} = 130$  Мпа, а после ТЦО- 150 Мпа. Следовательно, термоциклическая обработка снижает чувствительность стали к концентрации напряжений в связи с ее большей пластичностью, что очень важно при усилении локальных опасных зон концентрации напряжений в сварных соединениях и элементах МК проведением регулируемой ТЦО этих зон с поэтапным пассивным феррозондовым контролем.

Существенное влияние оказывает термоциклическая обработка и на механические свойства легированных сталей.

Так, в работе [96] стали 20Х и 12Х2Н4А подвергали пятикратной ТЦО и изотермической закалке с охлаждением образцов в масле. После ТЦО механические свойства низколегированной стали 20Х по сравнению с изотермической закалкой повысились на 20...25 %, ударная вязкость в 2 раза, что соответствовало уровню свойств среднелегированной стали 12Х2Н4А.

Проведение 5-8-кратной ТЦО на сталях 15Х и 20 приводило к резкому измельчению исходной структуры и, как следствие этого, к повышению пластичности и ударной вязкости [35]. При этом изменение твердости низколегированной стали 15Х при увеличении числа циклов показало наличие чередующихся максимумов и минимумов. По мнению авторов, это свидетельствует о том, что при термоциклической обработке происходит чередование накопления дефектов кристаллического строения металлов (твер-

дость возрастает) и их аннигиляции (твердость снижается).

В работе [17] на низколегированной стали 30ХГСА проведен сравнительный анализ механических свойств после ТЦО и закалки с последующим отпуском. На основании экспериментальных данных даны рекомендации о целесообразности применения ТЦО для повышения как пластических, так и прочностных характеристик.

Таким образом, видно, что в отличие от обычной термической обработки проведение ТЦО оказывает наиболее благоприятное воздействие легирования на механические характеристики сталей. При этом, повышая прочность, ударную вязкость и пластичность, можно получить ранее недостижимые значения работы разрушения низколегированных сталей при статических, динамических и ударных видах нагружения. Следовательно, ТЦО является высокоэффективной обработкой для восстановления прочностных свойств металла в локальных опасных зонах КН, позволяющая повысить надежность и долговечность сварных МК в процессе длительной эксплуатации.

Нами в работе [65] и более подробно в разделе 3.2 диссертации было показано, что наиболее опасными зонами в сварных соединениях являются зона сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева и сварной шов, которые авторы рекомендовали контролировать в первую и вторую очередь соответственно.

Другой не менее ответственной задачей является повышение прочностных свойств металла до нормативного уровня в локальных опасных зонах КН сварных соединений. Так как локальные зоны КН малы по сравнению с размерами элементов сварных МК, то обычные методы усиления при сварке к ним практически не применимы, так как они могут повысить трудоемкость и снизить надежность и безопасность сварных конструкций в целом.

Учитывая это, нами была проведена оценка влияния структуры основного из стали 08пс и различных зон сварного соединения (сварного шва, участка перегрева и основного металла) из стали Ст3 с разной степенью дисперсности после различного количества циклов ТЦО на механические свойства. При этом предполагалось использование эффекта повыше-

ния прочностных свойств конструкционных сталей 08пс и Ст3 в процессе ТЦО для усиления сварных соединений металлоконструкций строительных машин в опасных зонах КН при ремонте. Прочностные свойства исследуемых сталей после различного числа циклов ТЦО представлено в таблицах 12 и 13.

Таблица 12

Марка стали	Механические свойства	Число циклов ТЦО							
		0	1	2	3	4	5	7	10
08пс	$\sigma_T$ , МПа	168	175	182	189	191	193	194	195
	$\sigma_B$ , МПа	284	296	303	310	316	320	323	324
	$\delta$ , %	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

Таблица 13

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

Видно, что как для малоуглеродистой стали 08пс в состоянии заводской поставки, так и для основных зон сварного соединения из стали Ст3 после проведения ТЦО наблюдается значительное повышение прочностных свойств металла. Увеличение пределов текучести и прочности сталей происходит, в основном, в течение первых трех-пяти циклов ТЦО, далее эти изменения становятся менее значительными, что хорошо согласуется с экспериментальными данными магнитного контроля, металлографическо-

го анализа и твердометрии. Следует отметить, что увеличение числа циклов способствует одновременному повышению как предела текучести малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3, так и предела прочности. Так, предел текучести малоуглеродистых сталей с крупнозернистой структурой после проведения термоциклической обработки повышается на 12...15 %, а предел прочности – на 13...14 % соответственно, что повышает эффективность прочностного усиления металла конструкций в опасных зонах КН сварных соединений. Аналогичные результаты были получены на низколегированных сталях 09Г2С и 10ХСНД в работе [51]. Такое повышение механических свойств сталей позволяет рекомендовать ТЦО для повышения прочностных свойств металла в опасных локальных зонах КН как в сварных соединениях, обладающих структурной и прочностной неоднородностью, так и в элементах МК при ремонте.

Таким образом, проведение ТЦО по разработанным режимам, контролируемой пассивным феррозондовым методом, позволяет снизить структурную неоднородность различных зон сварных соединений, повысить их равнопрочность, а также повысить прочность металла в опасных локальных зонах КН на 12...15 %.

### **3.5. Определение действующих напряжений в конструкционных сталях с различной исходной структурой в процессе упругопластического деформирования**

Обеспечение надежной и безопасной работы сварных металлических конструкций является сложной задачей, которая требует для ее решения достоверной информации при оценке технического состояния конструкций с целью прогнозирования их последующей работоспособности.

Для полной оценки структурного состояния и косвенного определения действующих напряжений в сварных соединениях металлических конструкций требуется применение не только существующих, но и разработка новых методов и приборов контроля. Одним из таких методов является пассивный феррозондовый метод, основанный на магнитомеханическом явлении, включающем магнитоупругий эффект и магнитомеханический

гистерезис, что позволяет изучать закономерности обратимых и необратимых магнитоупругих явлений при нагружении и разгрузке элементов сварных МК в условиях воздействия коррозионных сред с учетом различного структурного состояния металла. Однако, на практике такой контроль осложняется тем, что зачастую остается неизвестным и химсостав, и структура металла, магнитная и механическая предыстория элементов сварных конструкций и сварных соединений. Поэтому возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований на конструкционных сталях с различным исходным структурным состоянием (крупнозернистым, мелкозернистым, деформированным на ту или иную степень).

Экспериментальные исследования проводились на образцах в различных исходных состояниях:

- в состоянии заводской поставки;
- после высокотемпературного отжига;
- после термоциклической обработки;
- после холодной пластической деформации.

Измерение магнитного параметра  $H_p$  проводилось в искусственно созданной зоне максимальных действующих напряжений, которая моделировалась уменьшением площади поперечного сечения образца в его центральной части за счет создания боковых радиусных проточек.

Механические испытания образцов из сталей 08пс и Ст3 проводились при ступенчатом нагружении и разгрузке образцов со скоростью 2 мм/мин. Во время остановок измерялись значения  $H_p$  в центре каждого образца, при этом в процессе всего испытания осуществлялся постоянный непосредственный контакт феррозондового преобразователя, зафиксированного перпендикулярно поверхности зоны контроля.

Приведены типичные зависимости  $H_p(\sigma)$  малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3 в различных структурных состояниях. В процессе статических испытаний было показано, что при растяжении лабораторных образцов в упругой области деформирования с увеличением действующих напряжений значения магнитного параметра  $H_p$  уменьшаются, при снижении действующих напряжений  $\sigma$  (разгрузка) значения  $H_p$  возрастают (рис. 55), вследствие чего происходит образование петли магнитного гистерезиса.

При 1-ом цикле нагружение-разгрузка петля магнитного гистерезиса обычно не замкнута, то есть конечные значения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  после разгрузки не совпадают с исходным значением до нагружения. После 2-го и последующих циклов, независимо от исследуемой стали, петля магнитного гистерезиса замыкается. При этом приращение напряженности магнитного параметра  $H_p$  пропорционально изменению действующих напряжений  $\sigma$ .

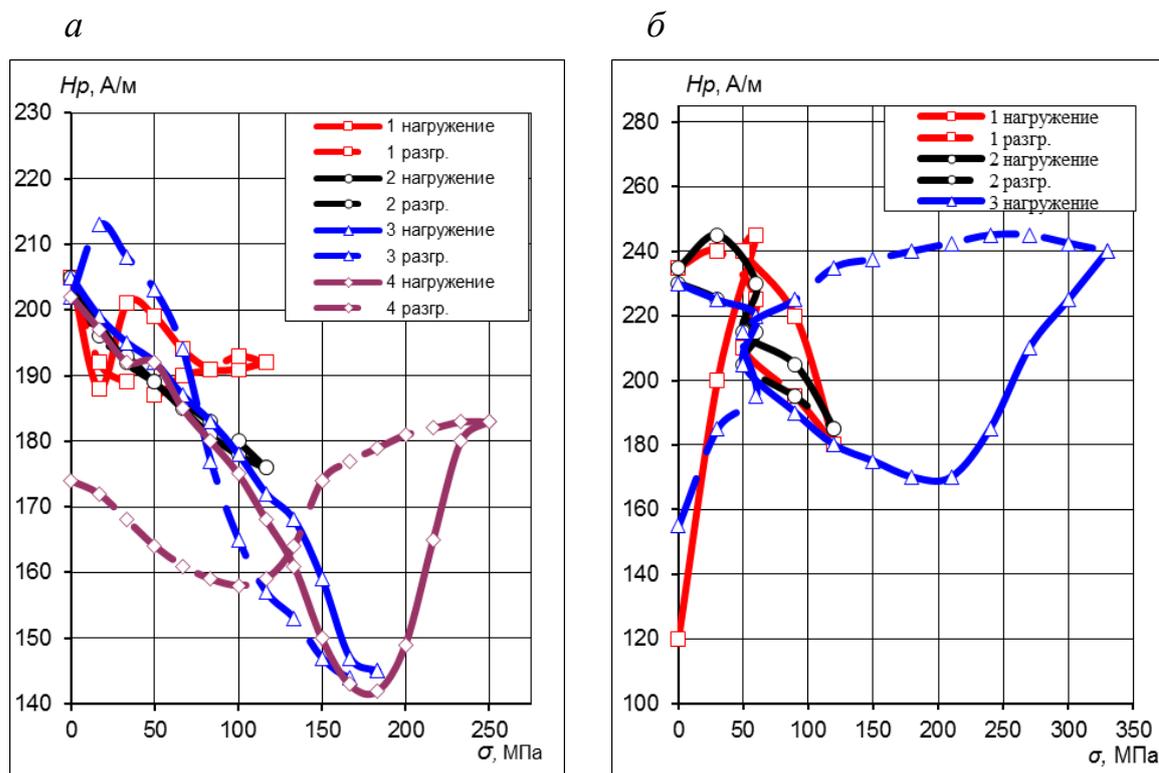


Рис. 55. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от одноосных напряжений растяжения для образцов из малоуглеродистых сталей в состоянии заводской поставки: *а*- 08пс; *б*- Ст3

Следовательно, независимо от исходных значений  $H_p$ , после проведения 1-го цикла нагружение-разгрузка стирается магнитная предыстория образцов, а последующее увеличение числа циклов существенно не влияет на изменение характера хода кривых  $H_p(\sigma)$ , что повышает степень достоверности последующих измерений. Аналогичная зависимость магнитных параметров от действующих напряжений растяжения отмечалась в работе [52].

В работе проводилась оценка влияния исходной структуры на изме-

нение напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от действующих напряжений  $\sigma$ .

Наличие неравновесной мелкозернистой структуры сталей 08пс и Ст3, полученной в результате пятикратной термоциклической обработки, приводит к увеличению амплитуды значений магнитного параметра  $H_p$  по сравнению с образцами, имеющими крупнозернистую структуру, или в состоянии заводской поставки. На рис. 56 приведена типичная зависимость  $H_p(\sigma)$  для сталей 08пс и Ст3 после термоциклической обработки.

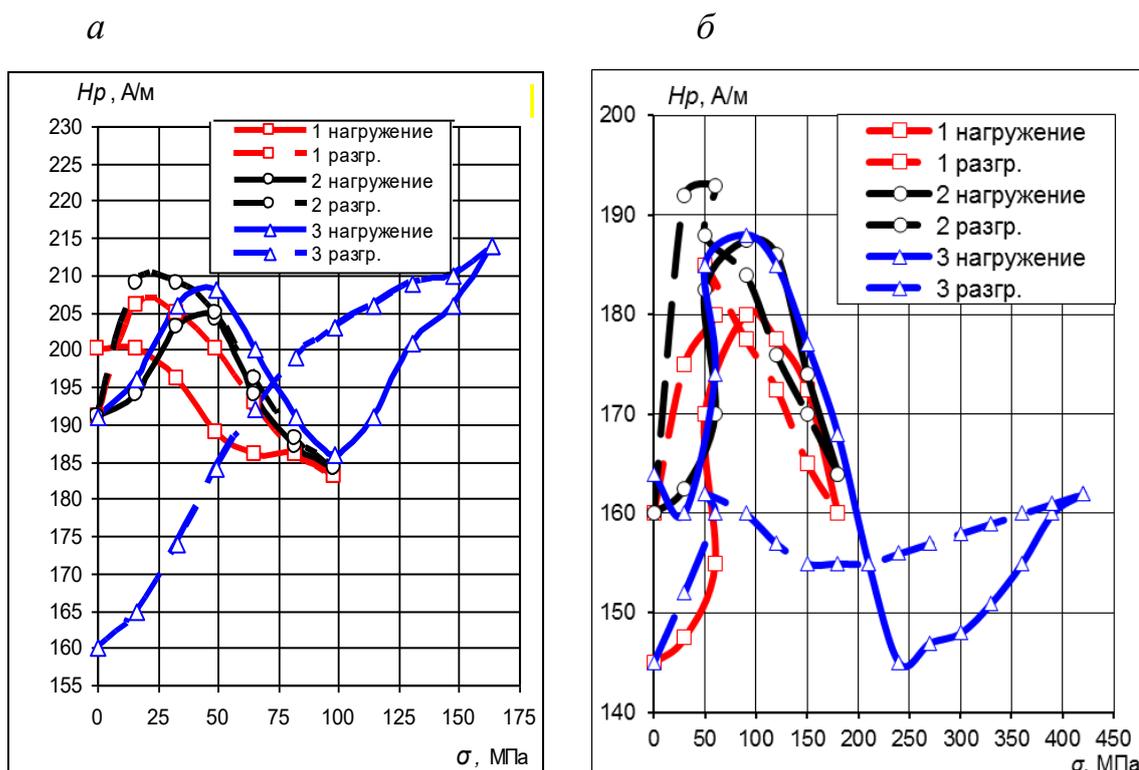


Рис. 56. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от одноосных напряжений растяжения для образцов из малоуглеродистых сталей в состоянии (поставка + отжиг при 900 °С и поставка + 5- кратная ТЦО соответственно):

*a*- 08пс; *б*- Ст3

Видно, что увеличение действующих напряжений приводит к существенным изменениям  $H_p$  при всех исследуемых циклах нагружение-разгружение, но, как и в предыдущих случаях, виден магнитный гистерезис после 1-го цикла и характерная зависимость  $H_p(\sigma)$  при увеличении и уменьшении действующей нагрузки на образец.

Проведение предварительной холодной пластической деформации

стальных образцов оказывает значительное влияние на зависимость  $H_p(\sigma)$  (рис. 57) при упругом деформировании, которое при первом цикле нагружение-разгрузка существенно отличается своей шириной. При втором цикле петля магнитного гистерезиса становится более узкой. Однако, и в этом случае, как и ранее, при увеличении  $\sigma$  происходит понижение значений  $H_p$ , а при разгрузке - их повышение. При этом после 1-го цикла происходит стирание магнитной предыстории испытываемых образцов.

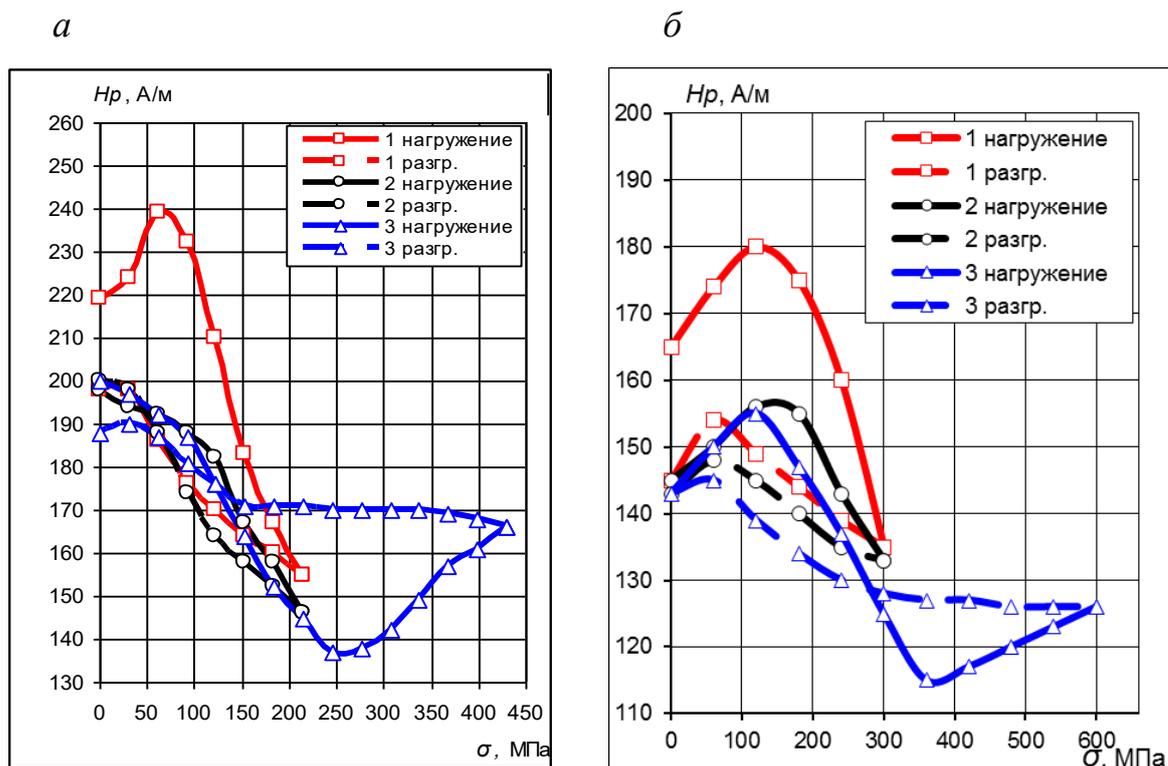


Рис. 57. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от одноосных напряжений растяжения для образцов из малоуглеродистых сталей в состоянии (поставка + прокатка на  $\epsilon = 50\%$ ): а- 08пс; б- Ст3

Следует подчеркнуть, что при упругом деформировании сталей 08пс и Ст3, т.е. до достижения минимальных значений  $H_p$ , независимо от исходной структуры и химического состава, приращения  $\Delta H_p$  пропорциональны изменению действующих напряжений, петля магнитного гистерезиса после 1-го цикла нагружение-разгрузка обычно не замкнута. Она замыкается после 2-го цикла, при этом различие начальных и конечных значений  $H_p$  становится незначительным, что повышает достоверность результатов последующих измерений  $H_p$ .

Нарушение пропорциональности  $H_p$  от  $\sigma$  свидетельствует о приближении действующих напряжений к пределу текучести стали.

Таким образом, по характеру изменения магнитного параметра  $H_p$  от действующих напряжений  $\sigma$  при растяжении в упругой области деформирования можно решать следующие задачи:

- косвенно определить уровень действующих напряжений, а, следовательно, оценить степень опасности зон концентрации напряжений. При этом, чем выше приращение, тем больше действующие напряжения и выше степень опасности выявленных зон КН. Кроме того, в наиболее опасных зонах КН по изменению значения  $H_p$  можно косвенно определить уровень действующих напряжений:

- действующие напряжения соответствуют пределу пропорциональности, если начинает нарушаться пропорциональность  $H_p(\sigma)$ ;

- напряжения ниже предела пропорциональности, если нет нарушения пропорциональности изменения  $H_p(\sigma)$ ;

- напряжения выше предела пропорциональности, если нарушена пропорциональность  $H_p(\sigma)$ .

Так как в процессе длительной эксплуатации в сварных соединениях и элементах сварных МК могут возникать зоны КН, в которых прошла или проходит пластическая деформация, предшественница разрушения металлоконструкций, то нахождение таких зон является актуальной задачей. В связи с чем была проведена работа по выявлению влияния пластической деформации на магнитный параметр  $H_p$ .

При растяжении образцов в пластической области деформирования наблюдается обратная картина, чем при деформации в упругой области. В этом случае с увеличением действующих напряжений магнитный параметр  $H_p$  возрастает (рис. 55–57). Это типично как для образцов с крупнозернистой исходной структурой (состояние заводской поставки), мелкозернистой (после 5-кратной ТЦО), так и деформированных (после предварительной холодной пластической деформации) конструкционных сталей.

При растяжении образцов с крупнозернистой структурой (состояние поставки) в упругой области деформирования происходит падение значе-

ний  $H_p$  до минимальных и их подъем в области пластического деформирования. После снятия нагрузки наблюдается магнитный гистерезис, в этом случае конечные значения магнитного параметра  $H_p$  отличаются от исходных значений.

Мелкозернистая структура конструкционных сталей (поставка + 5-кратная ТЦО), полученная после ТЦО, смещает минимальные значения  $H_p$  в сторону больших действующих напряжений, при этом значения магнитного параметра  $H_p$  при снятии нагрузки остаются постоянными практически до полного разгрузки при сохранении стадийности изменения  $H_p(\sigma)$  за пределы упругости. Аналогичная зависимость  $H_p(\sigma)$  характерна и для сталей, подвергнутых холодной пластической деформации на степень  $\varepsilon = 50\%$  (рис. 57). В этом случае также наблюдается смещение минимума  $H_p$  в область высоких действующих напряжений; при снятии внешней нагрузки постоянные значения магнитного параметра  $H_p$  остаются постоянными вплоть до полного разгрузки.

Таким образом, при уменьшении усилий нагружения в образцах с более мелкозернистой структурой исследуемых сталей происходит смещение минимальных значений  $H_p$  в область более высоких действующих напряжений, которые при повышении дисперсности возрастают. При разгрузке образующийся магнитный гистерезис с уменьшением размера зерен принимает все большие размеры, а в случае разгрузки образцов, прошедших холодную пластическую деформацию, значения  $H_p$  остаются практически постоянными.

Таким образом, установлена взаимосвязь между структурой, магнитным параметром  $H_p$  и действующими напряжениями  $\sigma$  в малоуглеродистых сталях 08пс и Ст3. При этом, при упругом деформировании растяжением с увеличением  $\sigma$  значения  $H_p$  уменьшаются, при деформации в пластической области - увеличиваются. Уменьшение исходного размера зерен приводит к смещению минимума значений  $H_p$  в сторону более высоких действующих напряжений.

При снижении действующих напряжений  $\sigma$  происходит запаздывание изменений магнитного параметра  $H_p$ , за счет чего образуется петля

магнитного гистерезиса. Ее ширина увеличивается с уменьшением исходного размера зерен стали, то есть запаздывание изменения значений  $H_p$  наблюдается почти до полного снятия нагрузки на испытуемые образцы. Более четкая картина отмечается при разгрузке образцов, подвергнутых предварительной холодной пластической деформации, что говорит о необратимом намагничивании лабораторных образцов в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея).

Следует подчеркнуть, что проведенные исследования позволили установить, что:

- пассивный феррозондовый контроль позволяет без предварительной подготовки поверхности контроля по аномальным отклонениям значений  $H_p$  выявлять локальные зоны КН;
- растяжение образцов в упругой области деформирования с увеличением действующих напряжений способствует снижению магнитного параметра  $H_p$ , при снижении напряжений - увеличению значений  $H_p$ ;
- проведение 1-го цикла нагружение- разгрузка в упругой области деформирования снимает магнитную предысторию образцов;
- при нагружении образцов в упругой области деформирования (область выполнения закона Гука) приращение значений  $H_p$  пропорционально изменению действующих напряжений;
- в образцах с исходной мелкозернистой структурой и после холодной пластической деформации с уменьшением действующих напряжений наблюдается более высокий магнитный гистерезис, чем для сталей с крупнозернистой структурой: увеличение ширины петли магнитного гистерезиса свидетельствует о повышении степени опасности зон КН, что необходимо учитывать при оценке степени опасности выявленных зон КН при техническом диагностировании сварных МК.

**Математическая обработка экспериментальных данных.** Проведение математической обработки экспериментальных данных по выявлению взаимосвязи действующих напряжений  $\sigma$  и магнитного параметра  $H_p$  на конструкционных сталях 08пс и Ст3 позволило представить полученные зависимости в аналитическом виде:

$$\sigma = a \cdot H_p^2 + b \cdot H_p + c, \quad (5)$$

где  $\sigma$  и  $H_p$  – текущие действующие напряжения и магнитный параметр;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – экспериментальные коэффициенты, зависящие от исходной структуры металла;  $R^2$  – коэффициент корреляции.

В табл. 14 приведены коэффициенты для малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3, которые могут применяться при оценке напряженно-деформированного состояния металлических конструкций строительных машин и сталей, близких к исследуемым по химическому составу и свойствам.

Полученные экспериментальные данные по выявлению связи структурных, магнитных и механических параметров на сталях 08пс и Ст3 с различной исходной структурой позволяют выявлять в различных зонах сварных соединений опасные локальные зоны КН и косвенно определять в них действующие напряжения, используемые в дальнейших прочностных расчетах.

Таблица 14

Марка материала	08пс		Ст3	
	Заводская поставка	Поставка + отжиг 900 °С	Заводская поставка	Поставка + отжиг 900 °С
Структурное состояние				
Коэфф-ты уравнений				
$a$	0,0385	-0,0234	0,0435	-0,0011
$b$	-19,1703	11,2430	-9,2413	-0,0279
$c$	2515,3446	-604,0105	567,8432	204,7346
$R^2$	0,99	0,87	0,9	0,96

### 3.6. Влияние холодной пластической деформации на структурную неоднородность металла различных зон сварных соединений

Проведенные исследования показывают, что самыми распространенными местами разрушения сварных МК являются сварные соединения, об-

ладающие структурной неоднородностью. Так, для сварного шва характерна литая дендритная структура, для зоны сплавления и участка перегрева - крупнозернистая структура, для участка полной перекристаллизации – мелкозернистая, а у основного металла – структура в состоянии поставки.

Учитывая, что структура металла определяет его свойства, то в сварном соединении наблюдается и механическая неоднородность различных зон. В работе [65] и разделе 3.3 данной диссертации были приведены разработанные режимы повышения прочностных свойств металла в различных зонах сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния) за счет измельчения исходной структуры в процессе контролируемой ТЦО. Такая обработка позволяет не только снизить структурную неоднородность сварного соединения, но и повысить равнопрочность металла в различных зонах и прочностные свойства металла в ослабленных зонах КН на 12...15 %.

Однако в сварных соединениях и элементах длительно эксплуатируемых металлоконструкций строительных машин могут встречаться такие локальные зоны КН, в которых прошла или проходит пластическая деформация или металл находится на стадии предразрушения. Существующая структурная и механическая неоднородность сварного соединения и наличие участков с возникающей или проходящей пластической деформацией нарушает равнопрочность сварного соединения, способствует возникновению и развитию трещин, приводящих впоследствии к авариям.

Поэтому представляло научный и практический интерес рассмотреть влияние холодной пластической деформации на структурную и механическую неоднородность сварных соединений (зону сварного шва, зону термического влияния и основной металл) и наметить пути восстановления прочностных свойств металла за счет проведения последующей ТЦО. Для этого сварные образцы из малоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм со снятой выпуклостью подвергались дробной прокатке при комнатной температуре на степень деформации  $\varepsilon = 20 \%$ , то есть на степень деформации, практически соответствующей пластичности конструкционных сталей в состоянии заводской поставки, а также на  $\varepsilon = 50 \%$ .

Магнитный параметр  $H_p$  на поверхности сварных образцов в процес-

се холодной пластической деформации измерялся в центре сварного шва и в зоне основного металла. Выпуклость сварного шва была предварительно снята механическим способом до уровня основного металла сварного соединения.

На рис. 58 приведена зависимость магнитного параметра  $H_p$  от степени пластической деформации сварного шва и основного металла. Видно, что несмотря на разброс значений и разные знаки  $H_p$  в исходном состоянии металла сварного соединения, с увеличением степени деформации этот разброс уменьшается, и при  $\varepsilon = 10\%$  значения напряженности магнитного поля рассеяния близки друг к другу [111].

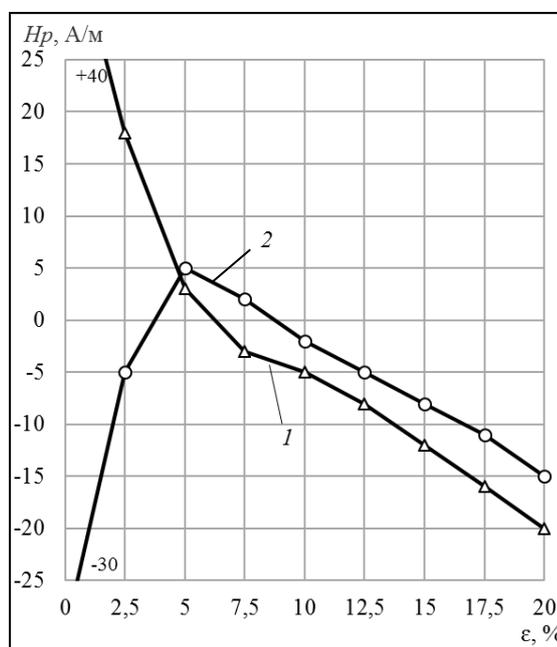


Рис. 58. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от степени холодной пластической деформации  $\varepsilon$ : 1 – сварного шва; 2 – основного металла

Значительные изменения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  в процессе холодной пластической деформации, вероятно, в большей степени обусловлены структурными изменениями, происходящими в сварных соединениях.

Микроструктура сварного соединения (сварного шва, зоны термического влияния и основного металла) до проведения холодной пластической деформации включает в себя на участке сварного шва литую дендритную

структуру, в зоне сплавления и участке перегрева – крупнозернистую, на участке полной перекристаллизации и в основном металле – более мелкозернистую (рис. 59).

Структура стали в тех же зонах сварного соединения после холодной пластической деформации имеет существенные отличия. Так, в сварном шве, при заданной степени холодной пластической деформации начинает формироваться текстура прокатки (рис. 59, *д*). На участке перегрева (рис. 59, *е*) текстура прокатки имеет более выраженный характер, при этом начинает различаться кристаллографическая ориентированность зерен вдоль направления прокатки. В то же время, в деформированной структуре различаются недеформированные зерна, тогда как поблизости от них располагаются зерна со значительной степенью деформации.

Несколько иной характер формирования текстуры прокатки отмечается на участке полной перекристаллизации стали и в основном металле (имеющих более мелкозернистую исходную структуру). Формирование текстуры в этом случае происходит на более ранней стадии, вследствие чего в структуре стали практически отсутствуют слабдеформированные зерна. После дробной прокатки сварного соединения на  $\varepsilon = 50\%$  текстура прокатки во всех зонах и участках имеет более выраженный характер. В процессе разработки методики установлена связь между степенью пластической деформации металла в различных зонах и местах сварного соединения 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 пластической деформации более 10 % значения параметра  $H_p$  принимают отрицательные значения, а их наибольшее изменение происходит с самых малых степеней деформации. Такой характер изменения  $H_p(\varepsilon)$  необходимо использовать при диагностике технического состояния длительно эксплуатируемых сварных МК строительных машин, так как он позволяет повысить достоверность оценки технического состояния сварных МК в зонах КН, где прошла или проходит холодная пластическая деформация.

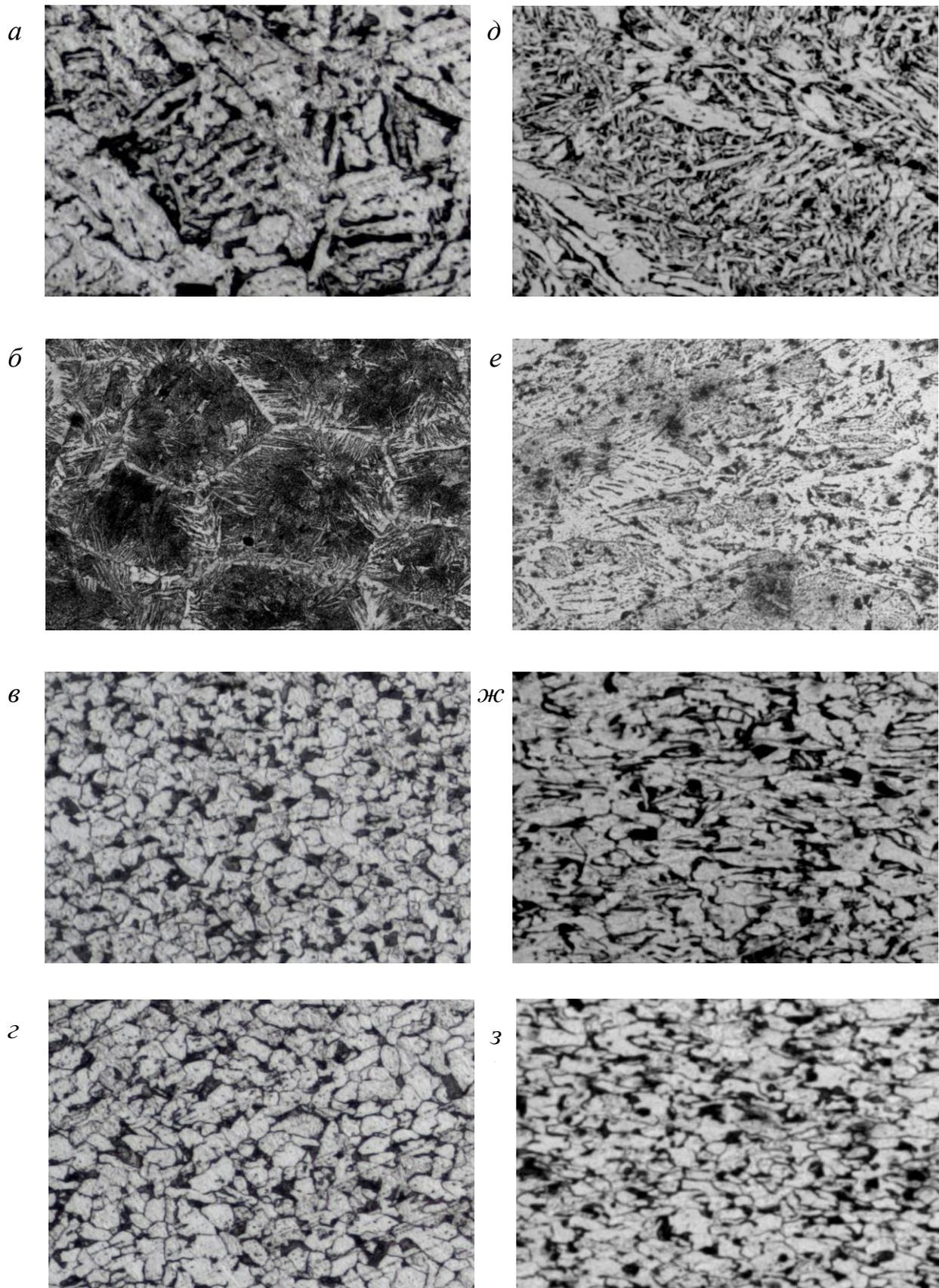


Рис. 59. Микроструктура сварного шва, участка перегрева, участка полной перекристаллизации и основного металла сварного соединения из стали Ст3, х200: а, б, в, з – до деформации; д, е, ж, з – после деформации на  $\epsilon = 20\%$  соответственно

### 3.7. Особенности влияния ТЦО на равнопрочность зон деформированных сварных соединений

Одной из важных задач при длительной эксплуатации сварных МК является восстановление прочностных свойств металла в зонах КН сварных соединений и элементов сварных МК, где прошла или проходит пластическая деформация, или металл находится на стадии предразрушения. Особенно это важно для сварных соединений, имеющих небольшие размеры, но обладающие ярко выраженной структурной неоднородностью.

Для этого сварные образцы, прошедшие дробную прокатку на степень  $\varepsilon=20$  и 50 % подвергали термоциклической обработке по следующему режиму: нагрев до 770 °С с последующим охлаждением на воздухе после каждого цикла. Число циклов составило 1, 3, 5, 7, 10. Процесс структурных превращений металла контролировался пассивным феррозондовым методом, а также с помощью микроструктурного анализа.

На рис. 60 приведена типичная зависимость магнитного параметра  $H_p$  от числа циклов ТЦО сварного соединения из малоуглеродистой стали Ст3 в зоне сварного шва и основного металла, которые по исходной структуре значительно отличаются друг от друга.

При проведении ТЦО деформированных сварных образцов наибольшие изменения значений  $H_p$  в том и в другом случае наблюдаются в процессе 3–5 циклов. С увеличением числа циклов происходит некоторая стабилизация величин магнитного параметра  $H_p$ .

Следует отметить, что характерное изменение значений  $H_p$  в зависимости от исходной структуры и числа циклов ТЦО вероятно зависит от структурных изменений, происходящих при проведении ТЦО. Металлографические исследования показали, что наиболее интенсивное измельчение исходной деформированной структуры различных зон сварного соединения на  $\varepsilon=20$  % наблюдается в процессе первых 3–5 циклов ТЦО, дальнейшее увеличение числа циклов до 7 и 10 в меньшей степени измельчает структуру, однако, снижает ее разнородность. На рис. 61 видно, что во всех зонах сварного соединения происходит значительное измельчение структуры.

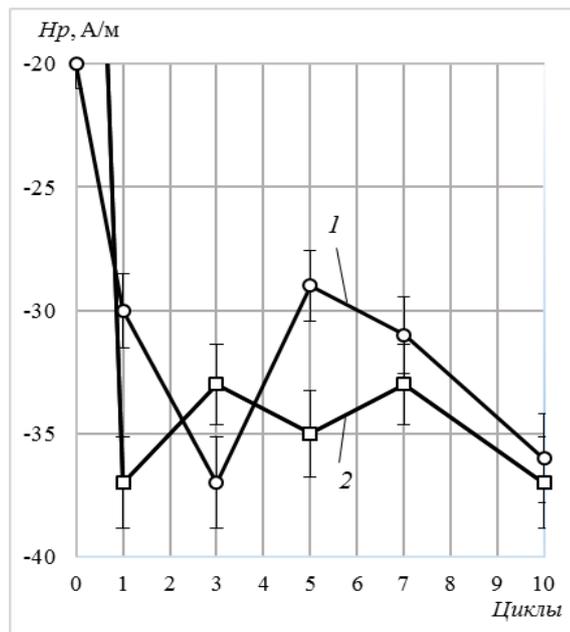


Рис. 60. Зависимость магнитного параметра  $H_p$  от числа циклов при ТЦО сварного соединения из малоуглеродистой стали Ст3: 1 – сварного шва; 2 – основного металла

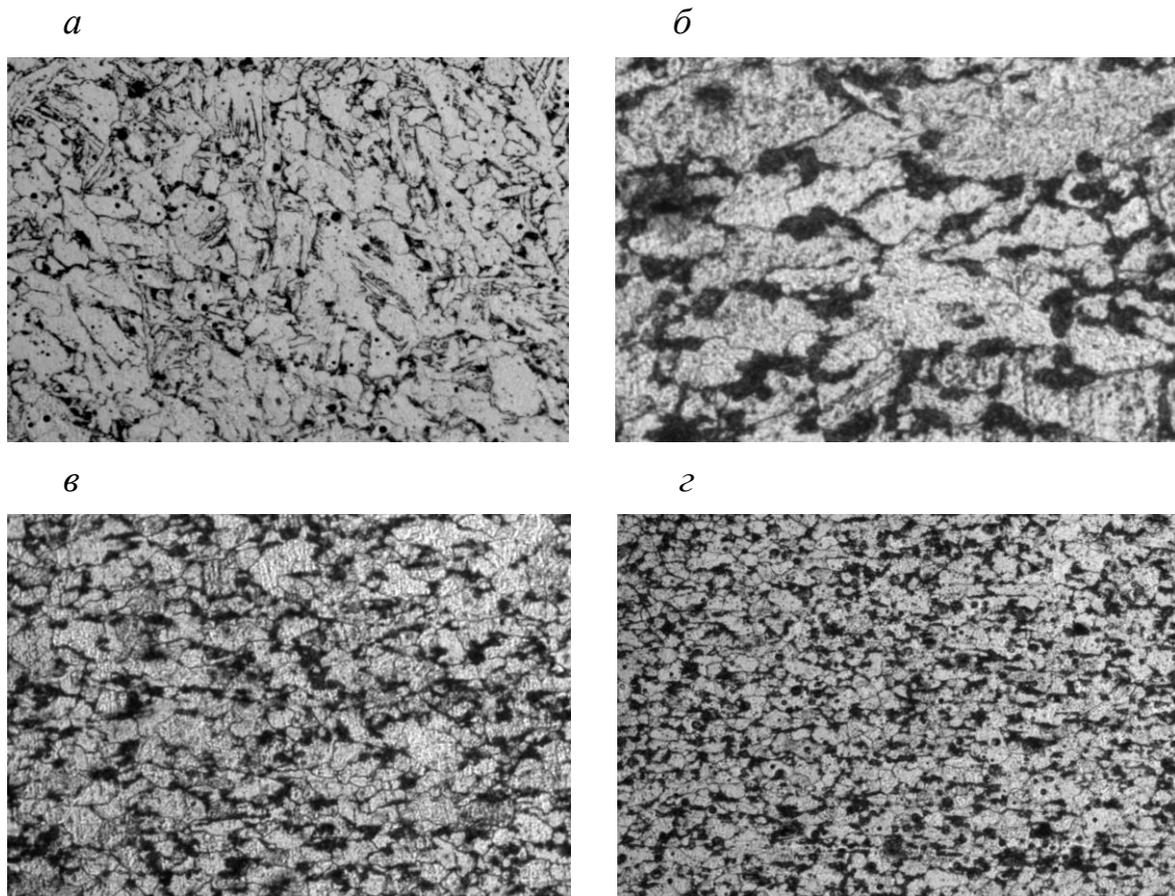


Рис. 61. Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст3 после деформации на  $\varepsilon = 20\%$  и 3 циклов ТЦО,  $\times 200$ : а - сварного шва; б- участка перегрева; в - участка полной перекристаллизации; г - основного металла

При этом более значимые изменения происходят в зоне полной перекристаллизации и основном металле сварного соединения. Литая структура сварного шва претерпевает в общем случае существенные структурные изменения (рис. 61, *а*), хотя до ТЦО сварной шов обладал специфической дендритной ориентированной структурой. Не менее значительные структурные изменения происходят в зоне перегрева, при этом размер зерен после ТЦО значительно уменьшается (рис. 61, *б*). Существенные изменения структуры характерны как для участка полной перекристаллизации стали, так и основного металла (рис. 61, *в, г*).

Дальнейшее увеличение числа циклов до 5 и 10 в меньшей степени измельчает структуру во всех зонах сварного соединения (рис. 62–65).

Однако, заводская строчечность структуры и разнотерность после 5 и 10-кратной ТЦО значительно уменьшается (рис. 65).

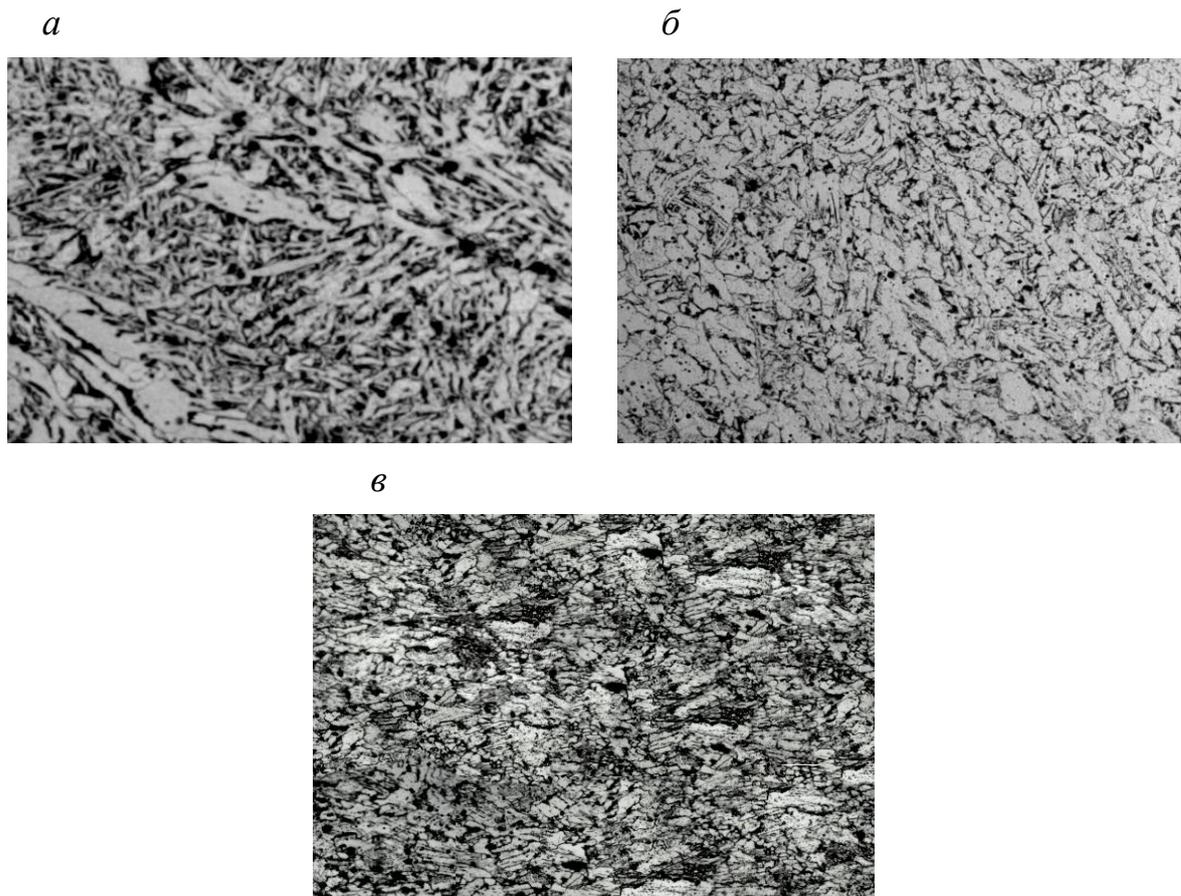


Рис. 62. Изменение структуры сварного шва сварного соединения из стали Ст3, деформированного на  $\varepsilon = 20\%$ ,  $\times 200$ : *а* - после деформации на  $\varepsilon = 20\%$ ;  
*б, в* - после 5 и 10 циклов ТЦО соответственно

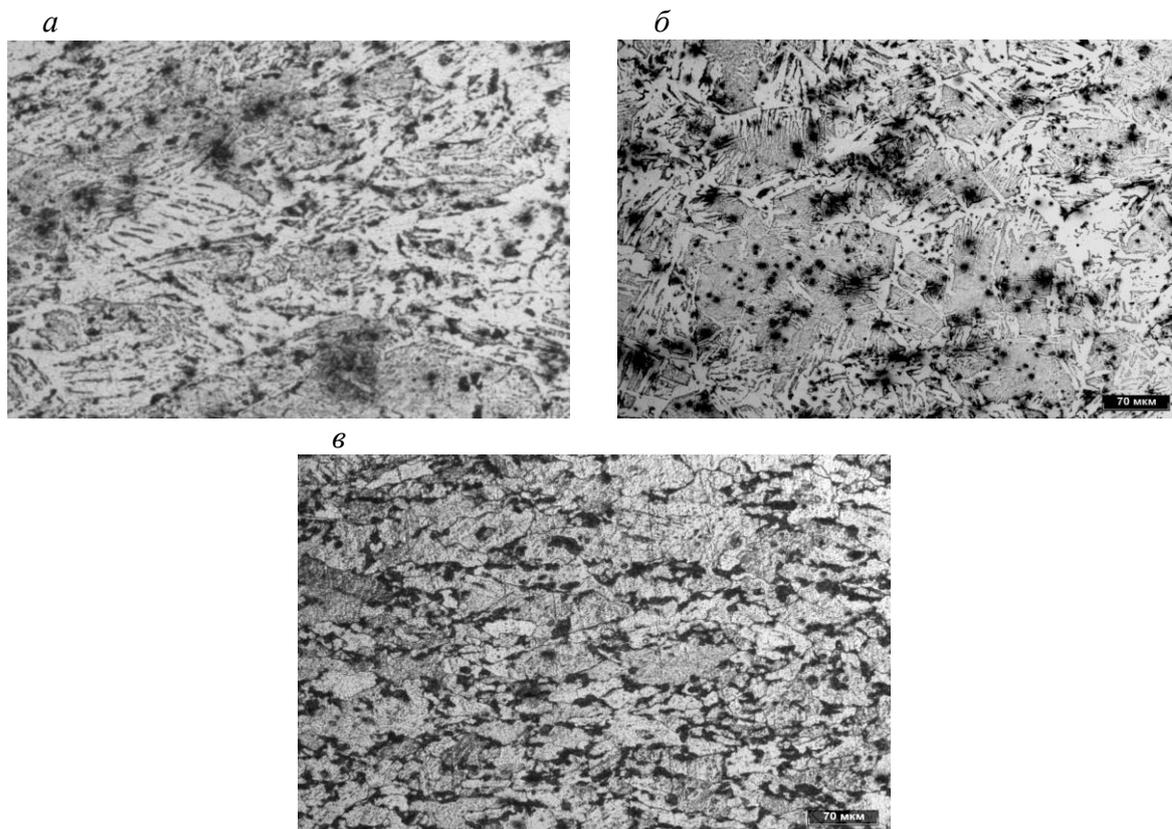


Рис. 63. Изменение структуры участка перегрева сварного соединения из стали Ст3, деформированного на  $\varepsilon = 20\%$ : *a* - после деформации на  $\varepsilon = 20\%$ ,  $\times 200$ ; *б, в* - после 5 и 10 циклов ТЦО соответственно

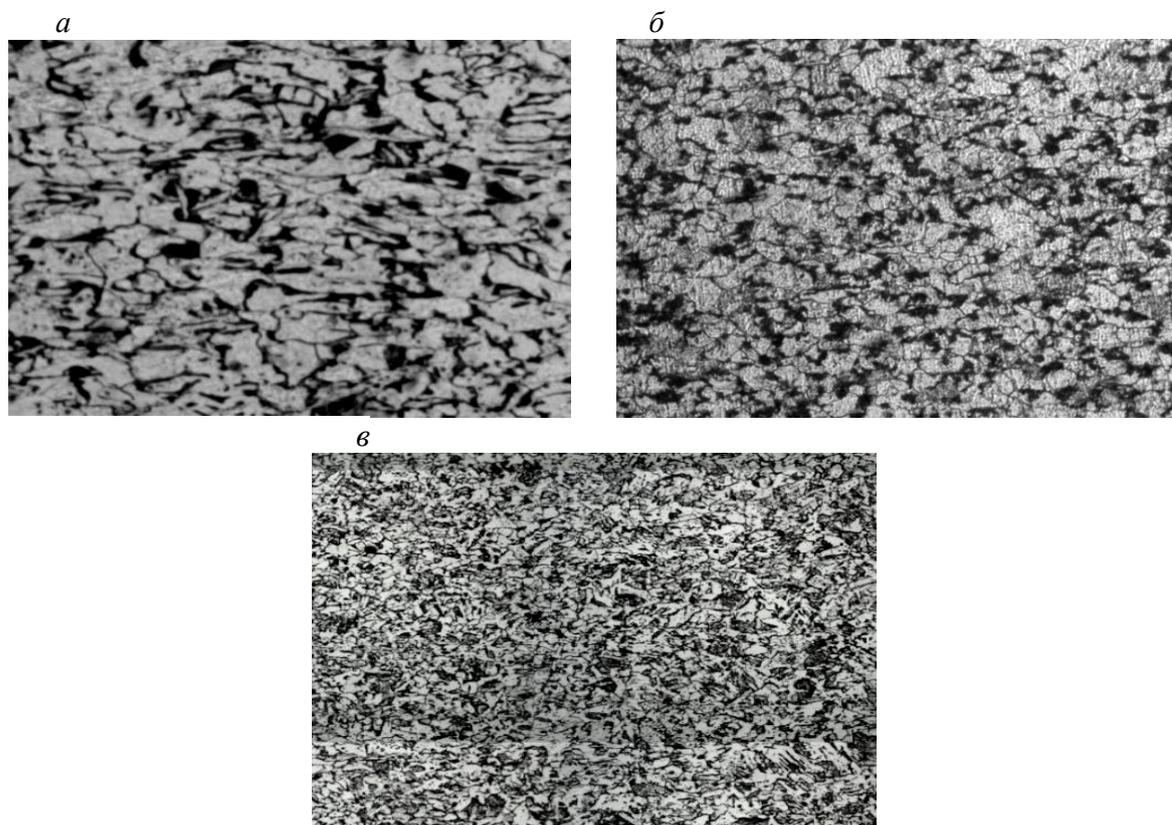


Рис. 64. Изменение структуры участка полной перекристаллизации сварного соединения из стали Ст3, деформированного на  $\varepsilon = 20\%$ ,  $\times 200$ : *a* - после деформации на  $\varepsilon = 20\%$ ; *б, в* - после 5 и 10 циклов ТЦО соответственно

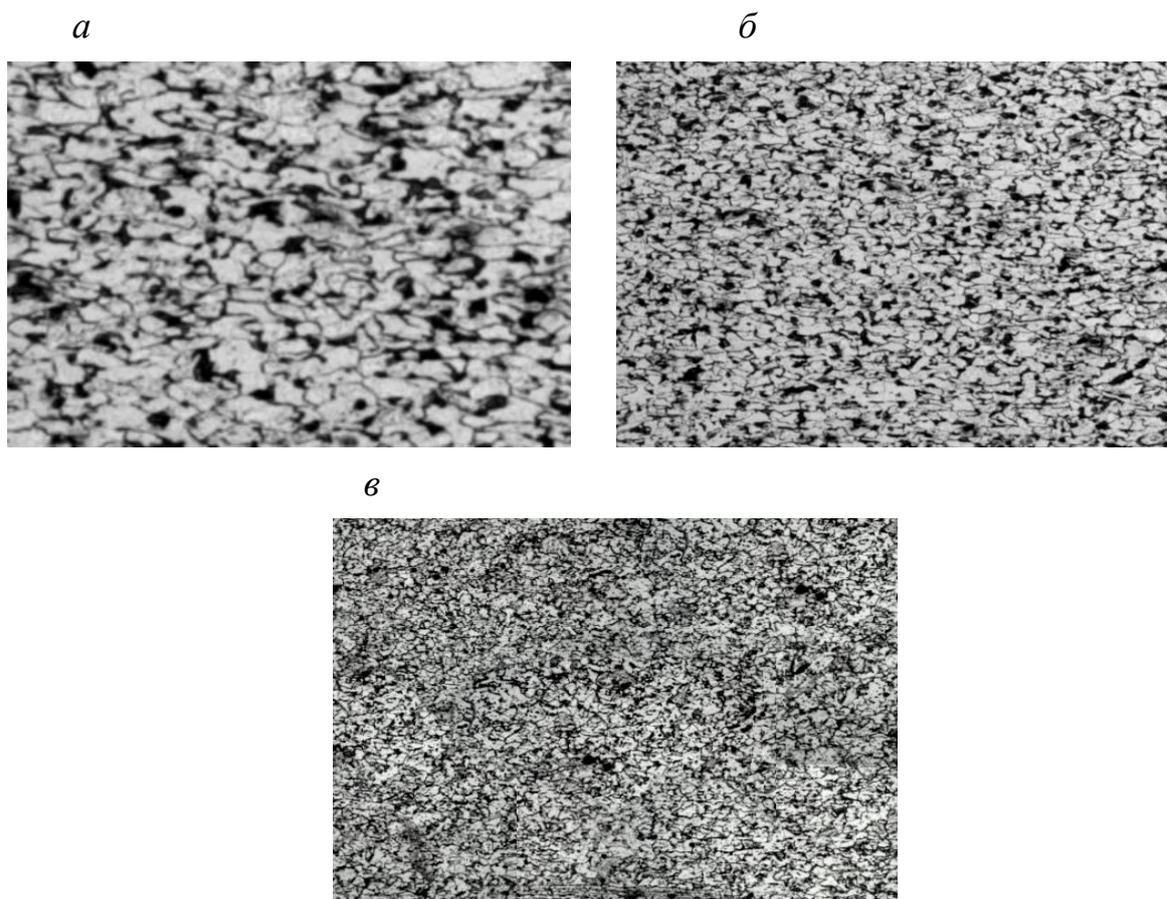


Рис. 65. Изменение структуры основного металла сварного соединения из стали Ст3, деформированного на  $\varepsilon = 20\%$ ,  $\times 200$ : *а* - после деформации на  $\varepsilon = 20\%$ ; *б, в* - после 5 и 10 циклов ТЦО соответственно

При увеличении предварительной холодной пластической деформации сварного соединения до 50 % после ТЦО формируется более мелкозернистая структура во всех зонах и участках сварного соединения, в сварном шве, зоне сплавления сварного шва с участком перегрева и участке перегрева.

Видно, что увеличение степени холодной пластической деформации до  $\varepsilon = 50\%$  способствует более существенному измельчению литой дендритной структуры сварного шва (рис. 66, *а*). При этом увеличение числа циклов ТЦО с 5 до 10 позволяет значительно уменьшить средний размер зерен и повысить их равноосность (рис. 66, *б*).

Существенному измельчению размера зерен при повышении степени холодной пластической деформации подвергается металл в зоне сплавления сварного шва с основным металлом и на участке перегрева (рис. 67).

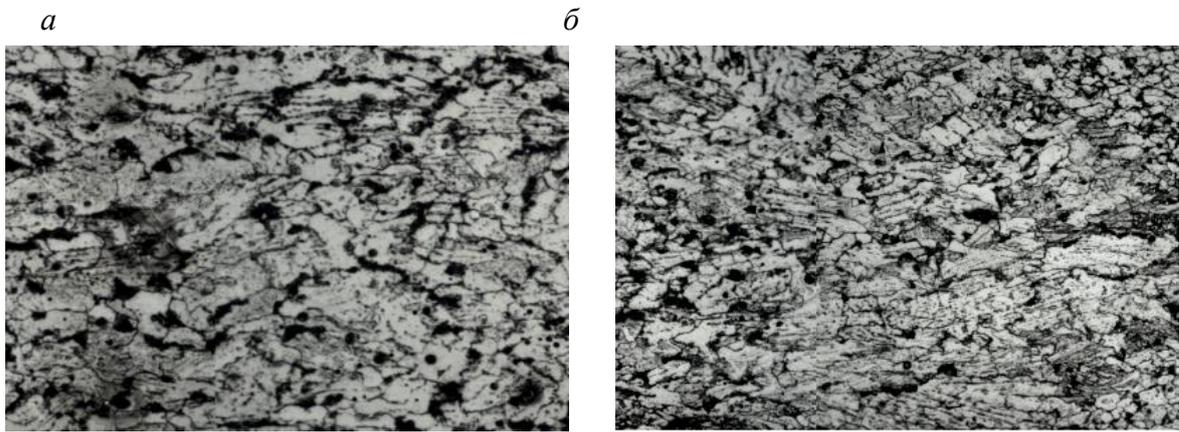


Рис. 66. Изменение структуры металла сварного шва из стали Ст3, деформированного на  $\epsilon = 50\%$ ,  $\times 200$ : *а, б* – после 5 и 10 циклов соответственно

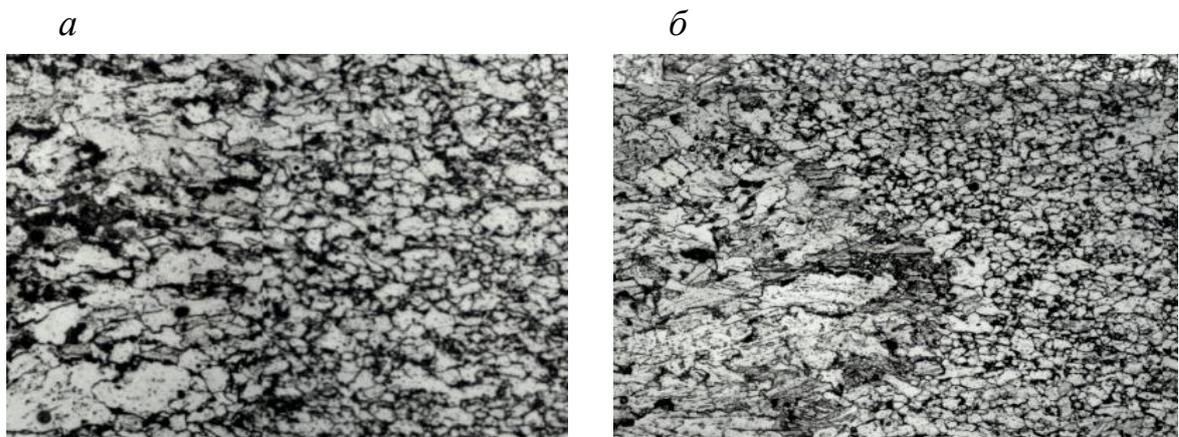


Рис. 67. Изменение структуры металла в зоне сплавления сварного шва с основным металлом и на участке перегрева сварного соединения из стали Ст3, деформированного на  $\epsilon = 50\%$ ,  $\times 200$ : *а, б* – после 5 и 10 циклов соответственно

Следует отметить, что повышение числа циклов ТЦО до 10 способствует уменьшению разнородности металла и получению более равнозернистой структуры (рис. 68).

Таким образом, можно констатировать, что во всех исследуемых зонах сварного соединения после 3–5 циклов ТЦО формируется более мелкозернистая структура, чем без проведения предварительной холодной пластической деформации.

Более высокая эффективность измельчения структуры после пластической деформации, вероятно, связана с активизацией структурных изменений, происходящих в процессе термоциклической обработки. Так, например, в экспериментах на образцах, прошедших предварительную хо-

лодную деформацию [15] при ТЦО резко возрастает число центров  $\gamma$  - фазы и, исходя из этого, интенсивное измельчение зерна аустенита. Если же деформирование проводится в межкритическом интервале температур, то в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$  – превращения [4] можно существенно ускорить процесс перекристаллизации стали и сильно наклепать составные части структуры и основательно измельчить зерно.

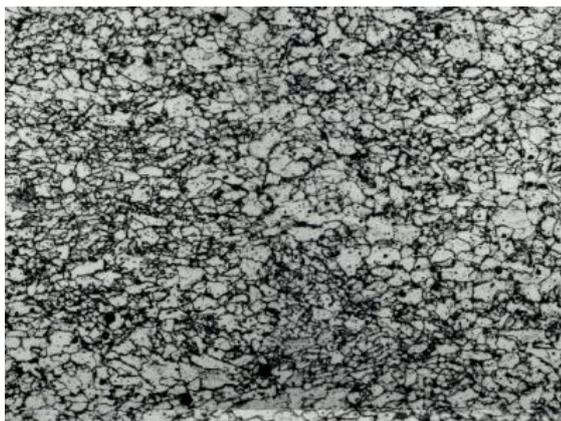


Рис. 68. Изменение структуры на участке перегрева и полной перекристаллизации металла сварного соединения из стали Ст3 после 10- кратной ТЦО, х200

Значительное изменение микроструктуры при термоциклической обработке холодно деформированных образцов авторы [35] объясняют тем, что холодная деформация перераспределяет и повышает плотность дефектов кристаллического строения: дефектов упаковки, дислокаций, вакансий, а также способствует как образованию, так и развитию мало- и высокоугловых границ. Так как дефекты кристаллической решетки оказывают значительное влияние на формирование мелкозернистой структуры металлов в процессе фазовых и структурных превращений, холодную пластическую деформацию можно эффективно использовать для получения структур с высокой степенью дисперсности и повышенной прочностью металла.

Таким образом, разработанные режимы ТЦО для конструкционных сталей 08пс и Ст3 с целью повышения прочностных свойств металла в различных зонах сварных соединений за счет измельчения исходной структу-

ры как с прошедшей в них деформацией, так и без, дают возможность снизить структурную и механическую неоднородность сварных соединений, максимально приблизить прочность металла сварного соединения к основному металлу, что необходимо учитывать при усилении локальных зон КН в сварных соединениях.

### **Выводы по главе 3**

1. Установлено, что структурная неоднородность сварного соединения (сварной шов, зона сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации, основной металл) оказывает существенное влияние на механические и магнитные параметры.

Показано, что при ступенчатом нагружении–разгружении сварных образцов со снятой выпуклостью в упругой области деформирования наибольшие действующие напряжения соответствуют зоне сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева, менее высокие – сварному шву, и более низкие – другим зонам, то есть наиболее опасными зонами являются первые две, что следует учитывать при оценке технического состояния сварных металлоконструкций строительных машин, при которой в первую очередь следует контролировать зону сплавления с участком перегрева, во вторую – сварной шов.

2. Разработаны режимы 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.

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

3. Установлена последовательность магнитного контроля в локаль-

ных зонах концентрации напряжений в процессе циклического упругопластического деформирования конструкционных сталей 08пс и Ст3 с различной исходной структурой (крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная), позволяющая выявлять в различных зонах сварных соединений металлоконструкций опасные локальные зоны концентрации напряжений и косвенно определять в них действующие напряжения, используемые в дальнейших прочностных расчетах.

5. Выявлено влияние степени холодной пластической деформации на структурные изменения и механические свойства металла в различных зонах сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния, основной металл) с применением пассивного феррозондового метода, что позволяет повысить достоверность оценки технического состояния сварных металлоконструкций, особенно в зонах концентрации напряжений, где прошла или проходит холодная пластическая деформация.

6. Разработаны режимы получения структуры с высокой степенью дисперсности и прочности металла в сварных соединениях с прошедшей в них пластической деформацией.

Установлено, что в процессе термоциклической обработки, контролируемой магнитным методом, во всех зонах формируется более мелкозернистая структура по сравнению со структурами без прохождения пластической деформации.

Показано, что увеличение степени пластической деформации до 50 % за счет повышения дисперсности микроструктур металла позволяет снизить структурную неоднородность и максимально приблизить прочность металла зон сварного соединения к прочности основного металла, что необходимо учитывать при усилении локальных зон КН в сварных соединениях.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

### **4.1. Особенности выбора методов и методик контроля при оценке технического состояния сварных металлоконструкций**

Повреждения и аварии сварных МК происходят по эксплуатационным, конструкционным и технологическим причинам [39]. К эксплуатационным причинам следует отнести следующее: длительность эксплуатации сварных МК и условия их нагружения: статические, циклические динамические и ударные нагрузки; температурные режимы, воздействия коррозионной среды и абразивный износ.

К конструктивным причинам относятся: особенности и сложность форм сварных МК (разнотолщинность и резкие переходы от одной толщины стенки к другой), конструкционные непровары, которые вызывают повышенную интенсивность действующих напряжений в местах расположения концентраторов напряжений.

К технологическим причинам относятся: структурная, химическая и механическая неоднородность металла по зонам сварных соединений и сварочные дефекты. Появление хрупких и малопрочных прослоек металла усиливает предрасположенность сварного соединения к преждевременному разрушению. В то же время, такие сварочные дефекты как трещины, подрезы, шлаковые включения, непровары, газовые поры, несплавления и т.д. в качестве опасных концентраторов напряжений значительно повышают склонность сварных соединений к различным повреждениям и образованию зон концентрации напряжений, что требует периодического контроля технического состояния сварных металлоконструкций.

В настоящее время контроль технического состояния сварных металлоконструкций немислим без применения методов как разрушающего, так и неразрушающего контроля. Одним из преимуществ разрушающих методов контроля является то, что при проведении экспериментальных исследований можно измерить механические свойства металла и другие ха-

рактики, которые определяют эксплуатационную надежность сварных конструкций. Недостатком этих методов является то, что они позволяют проводить только выборочный контроль, при этом достоверные результаты проводимых испытаний зависят как от однородности контролируемых свойств металла, так и приближенности условий испытаний к условиям длительной эксплуатации металлоконструкции.

В отличие от разрушающих методов неразрушающие более трудоемкие и обладают меньшей производительностью [23]. Однако, они имеют и существенные преимущества:

- возможность проведения исследований в сварных соединениях (обладающих структурной и механической неоднородностью), сварных узлах, в замкнутых контурах и других труднодоступных местах, а также там, где использование разрушающего контроля может привести к ослаблению элементов сложных сварных металлических конструкций;
- получение экспресс-информации о техническом состоянии конструкции;
- значительное снижение материальных и временных затрат при неразрушающем контроле.

Одним из недостатков классических методов неразрушающего контроля является их строгая направленность на поиск и обнаружение имеющихся дефектов, тогда как в сварных соединениях могут возникать локальные зоны концентрации напряжений, по своей опасности близкие к предразрушению, вследствие чего отсутствие информации о наличии таких зон концентрации напряжений может привести к неправильной оценке НДС всей сварной металлической конструкции. Поэтому нахождение локальных зон КН, оценка степени их опасности, а также косвенное определение в наиболее опасных из них действующих напряжений с целью проведения последующих прочностных расчетов является весьма актуальной задачей.

В связи с этим сфера использования различных методов, методик и средств контроля расширяется, а требования к надежности, повышению чувствительности и эффективности разрушающих и неразрушающих методов контроля все время повышаются. Их выбор для решения задач тех-

нической диагностики зависит как от параметров контролируемого объекта, так и от условий его обследования. Следует отметить, что ни один из методов неразрушающего контроля, таких, как пассивный феррозондовый, ультразвуковой, рентгенографический, магнитный, капиллярный, феррозондовый, метод акустической эмиссии, не является универсальным и не может в полной мере отвечать требованиям практики. В этом случае целесообразен комплекс, состоящий из нескольких параллельно или последовательно используемых методов контроля.

Поэтому обеспечение долговечности, надежности и безопасности эксплуатируемых сварных металлических конструкций строительных машин может быть осуществлено только при правильном и своевременном проведении контроля технического состояния с использованием современных приборов, методов и методик разрушающего и неразрушающего контроля на стадиях изготовления, монтажа и эксплуатации.

#### **4.2. Особенности выявления локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях**

Весьма сложной задачей при контроле технического состояния сварных металлоконструкций является оценка напряженно-деформированного состояния металла в сварных соединениях и элементах конструкций и определение каким-либо способом действующих напряжений в опасных зонах концентрации напряжений. В то же время, для обеспечения высокой надежности и работоспособности сварных металлоконструкций СМ необходимо знать ее НДС в каждом элементе конструкции в течение нормативного срока эксплуатации, а также и за его пределом. Аналитические методы решения подобных задач довольно сложны в связи с большими трудностями учета многих эксплуатационных, конструктивных и других факторов, которые необходимо учитывать в процессе расчета. Поэтому такая постановка задач и требует обеспечения сплошного контроля всего объема металлоконструкции, участвующего в работе. Следует отметить, что применение традиционных методов для решения таких задач крайне затруднено на практике.

Так, многие магнитные методы требуют предварительного намагничивания элементов металлических конструкций с использованием специальных намагничивающих систем. При этом трудоемкость намагничивания значительно повышается, если увеличивается сложность и габариты металлоконструкции, число труднодоступных мест, локальных зон концентрации напряжений и коррозионных повреждений. Результаты магнитного контроля в значительной степени зависят от величины зазора между поверхностью контроля и преобразователем, что естественно уменьшает возможности магнитных методов при контроле сварных соединений, в частности, сварного шва и околошовной зоны, имеющих структурную и механическую неоднородность. В некоторых случаях бывает необходима зачистка поверхности сварного соединения или снятие выпуклости сварного шва, что не всегда допустимо и целесообразно. Но если учесть, что более 80 % разрушений сварных металлоконструкций наблюдаются в районе сварных соединений, то трудности такого контроля только усугубляются. В некоторых случаях, в связи с большими размерами датчиков контроля, например, при коэрцитиметрическом контроле, практически невозможен поиск и выявление локальных зон концентрации напряжений, и в частности – коррозионных повреждений в замкнутых контурах.

В ряде работ [73, 88, 89, 91, 102, 106, 118] показана перспективность магнитных методов контроля, использующих остаточную намагниченность, и, в частности, пассивный феррозондовый метод, позволяющий проводить сканирование поверхности контроля при ее точечном контакте с феррозондовым преобразователем. В этом случае возможен контроль различных зон сварных соединений без специальной подготовки поверхности, снятия защитного покрытия, если его толщина не превышает 2 мм (что показано нами в разделе 2.5), и обнаружение локальных опасных зон концентрации напряжений в различных зонах сварных соединений.

В работах [7, 68], а также во второй и третьей главах настоящей диссертации было показано, что применение пассивного феррозондового метода контроля при ступенчатом упругопластическом деформировании конструкционных сталей позволяет установить взаимосвязь между структурой, магнитными и механическими характеристиками, что дает

возможность повысить долговечность, надежность, эксплуатационную безопасность и срок службы сварных металлоконструкций благодаря проведению соответствующих ремонтно-восстановительных работ по результатам оценки их фактического НДС.

Для пассивного феррозондового контроля применяют прибор ИКНМ-2ФП с двухканальным феррозондовым преобразователем. При сканировании поверхности контроля феррозондовый преобразователь располагают строго перпендикулярно поверхности контроля. Изменение значений напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  высвечивается на экране прибора.

Перед нагружением (разгрузением) элементов конструкций строительных машин с целью предварительного выявления зон концентрации напряжений проводят сплошное или выборочное сканирование сварных соединений металлоконструкций с использованием пассивного феррозондового метода. На сварных соединениях, в первую очередь, контролируют зоны сплавления сварного шва с основным металлом и прилегающим участком перегрева, во вторую очередь – зону сварного шва. При контроле поверхности объекта контроля отмечают места значительного изменения напряженности магнитного поля рассеяния, которые соответствуют зонам КН. Зоны КН могут характеризоваться как максимальными, так и минимальными значениями  $H_p$  со знаком "+" или "-", а также величинами  $H_p$ , отличающимися от основной массы значений в сварных соединениях. При наличии локальных дефектов (механических, структурных, коррозионных повреждений, шлаковых включений, а также более высоких действующих напряжений), возможны значительные отклонения значений  $H_p$  в контролируемых зонах.

После выявления таких зон КН проводят предварительное нагружение–разгружение элементов конструкций для снятия магнитомеханической предыстории металла. При повторном ступенчатом нагружении–разгрузении измеряют значения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  во всех ранее обнаруженных зонах КН, и затем по максимальной величине приращения  $\Delta H_p$  (по модулю) выявляют наиболее опасные зоны КН, в которых проводят все последующие измерения, в том числе и кос-

венное определение действующих напряжений.

После проведения таких испытаний в сварных соединениях металлоконструкций строительных машин возможны следующие варианты дальнейших исследований:

- если обследуемая металлоконструкция ранее подвергалась магнитному контролю, то замеренные величины магнитного параметра  $H_p$  сравнивают с ранее полученными, на основе которых принимают решение о необходимости продолжения дальнейших исследований, или их прекращении при отсутствии изменений  $H_p$ ;

- при значительных отклонениях значений  $H_p$  в некоторых зонах КН в них могут проводить последующий контроль другими методами неразрушающего контроля (УЗК, рентгеновским и др.) с целью выявления недопустимых дефектов. Применение такого комбинированного контроля существенно сокращает трудоемкость контроля;

- фактическая оценка напряженно-деформированного состояния металла в зонах концентрации напряжений. Для этого проводят металлографический анализ и, по возможности, механические испытания образцов, вырезанные из элементов обследуемых металлоконструкций строительных машин (если это возможно), или из аналогичной стали, с целью корректировки зависимости изменения магнитного параметра  $H_p$  от действующих напряжений при нагружении с учетом фактической микроструктуры металла.

При обработке экспериментальных данных оценивают значения параметра  $H_p$  для выяснения знака действующих напряжений (растяжение, сжатие); величину изменений  $\Delta H_p$  после каждого изменения прилагаемой нагрузки как при нагружении, так и при разгрузке (с целью оценки степени опасности выявленных зон КН); пропорциональность изменения значений  $H_p$  прилагаемым ступенчатым нагрузкам (действующим напряжениям) для определения выполнения закона Гука. При его выполнении действующие напряжения всегда ниже напряжений предела пропорциональности. Нарушение пропорциональности приращения показывает, что действующие напряжения начинают превышать предел пропорциональности. Последующее уменьшение величины приращения от прилагае-

мой нагрузки свидетельствует о приближении действующих напряжений к напряжениям предела текучести.

Затем, с учетом полученных экспериментальных данных проводят оценку принадлежности выявленных зон КН к упругой или пластической областям деформирования. Для этого, в зависимости от вида нагружения конструкции проводят двух-, трех- или более кратное ступенчатое разгружение – нагружение или нагружение – разгружение конструкции в зависимости от вида конструкции, в результате которых фиксируют изменение параметра  $H_p$  в зависимости от изменения действующих напряжений (или от прилагаемой нагрузки  $P$ ).

Таким образом, по характеру изменения  $H_p(\sigma)$  в процессе ступенчатого циклического нагружения (разгружения) сварных соединений решают следующие задачи:

- определяют знак действующих напряжений в зонах КН сварных соединений (растяжение или сжатие) с последующим их сравнением с расчетными напряжениями;
- определяют область деформирования (упругая, пластическая) каждой зоны КН.

При оценке степени опасности зон КН учитывают величину приращения  $\Delta H_p$ , полученную при ступенчатом нагружении–разгружении конструкции (элементов конструкции): чем выше степень приращения, тем выше действующие напряжения, а, следовательно, выше и степень опасности выявленных зон КН. В упругой области деформирования наиболее опасными считают те зоны, в которых действующие напряжения превосходят допустимые. К наиболее опасным зонам относят также все зоны КН, работа которых осуществляется в пластической области деформирования. Высокую опасность представляют зоны КН в сварных соединениях, имеющих структурную и механическую неоднородность.

В наиболее опасных зонах КН по характеру изменения  $H_p(\sigma)$  определяют уровень действующих напряжений:

- действующие напряжения соответствуют пределу пропорциональности для данной марки стали, если не нарушается пропорциональность изменения значений  $H_p(\sigma)$  при нагружении (разгружении) элементов

металлоконструкций;

- действующие напряжения ниже предела пропорциональности, если нет нарушения пропорциональности изменения  $H_p(\sigma)$ ;
- действующие напряжения выше предела пропорциональности, если начинается отклонение величин  $H_p(\sigma)$  от пропорционального;
- действующие напряжения соответствуют пределу текучести (изменения  $H_p$  при изменении внешней нагрузки нагружение (разгружение) практически отсутствуют);
- действующие напряжения ниже предела текучести, если при ступенчатом разгрузении элементов МК  $H_p$  увеличивается;
- действующие напряжения выше предела текучести, если при ступенчатом разгрузении элементов конструкций значения  $H_p$  уменьшаются.

В последнем случае степень превышения предела текучести действующими напряжениями необходимо оценивать с привлечением комплекса приборов и методов контроля. Во-первых, пассивным феррозондовым методом по изменению замыкающей кривой петли магнитного гистерезиса: чем она значительней запаздывает, тем выше степень пластической деформации в данной зоне концентрации напряжений. Во-вторых, проведением металлографических исследований и твердометрии в зонах КН и прилегающих областях. Такой комплексный подход при контроле технического состояния металлоконструкций строительных машин позволяет подтвердить факт прохождения пластической деформации в зоне КН, оценить степень деформации и повысить достоверность оценки действующих напряжений. Комплексный контроль опасных зон КН, находящихся в упругой области деформирования, также способствует повышению точности экспериментальных данных, а, следовательно, надежности и безопасности эксплуатируемых металлоконструкций, так как в определенной степени может подтверждаться сравнением экспериментальных значений действующих напряжений  $\sigma$  с напряжениями, найденными расчетным путем. Однако расчетные напряжения могут значительно отличаться от реальных, так как они характеризуют средние (бездефектные) напряжения в элементе конструкции, а не в зоне концентрации наибольших фактических действующих напряжений.

### **4.3. Режимы термоциклической обработки сварных соединений металлоконструкций строительных машин**

Проведенные обследования сварных металлоконструкций строительных машин показывают, что одной из основных причин их повреждений являются усталостные трещины в местах сварных соединений, которые обладают структурной неоднородностью (в зоне сварного шва – литая структура, в зоне термического влияния – крупнозернистая и мелкозернистая). Структурная неоднородность приводит к механической неоднородности, то есть к различию механических свойств отдельных зон сварного соединения, что ведет к образованию локальных зон концентрации напряжений. Кроме того, в опасных зонах концентрации напряжений длительно эксплуатируемых МК может пройти пластическая деформация.

Следует отметить, что особенностью усиления сварных соединений металлоконструкций в локальных зонах концентрации напряжений является то, что они сравнительно малы по сравнению с размерами узлов и элементов сварных металлоконструкций. В связи с чем усиление таких зон традиционными методами (увеличение площади поперечного сечения, усиление сварных соединений и другие) не всегда является осуществимым и, кроме того, может не только повысить затраты и трудоемкость, но и увеличить степень опасности при эксплуатации сварной металлоконструкции, снизить ее надежность.

В разделе 3.1. диссертации было показано, что при низких температурах с уменьшением размера зерен металла увеличиваются пределы текучести, прочности, твердость, ударная вязкость и усталостная прочность. Поэтому названное явление может быть использовано при усилении сварных соединений в опасных зонах КН за счет измельчения структуры металла по разработанным в диссертационной работе режимам термоциклической обработки.

В связи с этим наиболее эффективным способом усиления металла в опасных локальных зонах концентрации напряжений является проведение в них термоциклической обработки, контролируемой пассивным феррозондовым методом, позволяющей при небольших трудовых затратах полу-

чить в этих зонах мелкозернистую структуру с заданной степенью дисперсности, обладающую более высокими прочностными свойствами, и за счет этого повысить прочность металла в зонах КН. Величина повышения предела текучести металла контролируется по изменению магнитного параметра  $H_p$ , а также по уравнению Холла-Петча, если проведен металлографический анализ с целью определения среднего диаметра зерен после восстановительной ТЦО.

Термическая обработка может проводиться с целью получения нужной структуры и механических свойств сварных соединений, уменьшения остаточных сварочных напряжений, а в отдельных случаях – для снижения накопленных при длительной эксплуатации усталостных напряжений в зонах их концентрации.

Термическая обработка, включая и термоциклирование, может выполняться различными способами нагрева [39]:

- газопламенным способом с помощью горелок прямого и косвенного действия;
- индукционными токами промышленной частоты (50 Гц) и средней (1000...2500 Гц);
- радиационным с помощью электронагревателей сопротивления;
- комбинированным способом, сочетающим индукционный нагрев с радиационным;
- контактным способом – нагрев током, проходящим через элементы восстанавливаемой металлоконструкции.

При этом нагрев изделия может быть общим или местным. При общем нагреве сварная МК прогревается полностью, тогда как при местном (зональном)- нагревается только локальная зона ограниченной ширины и длины.

При усилении металла в зонах КН массивных металлоконструкций с применением ТЦО проводится местный нагрев, в этом случае применяются компактные переносные нагревательные устройства: гибкие индукторы; гибкие и жесткие электронагреватели сопротивления и нагреватели комбинированного действия; переносные горелки различного типа – кольцевые, газосварочные одномунштукковые и другие. При ТЦО особое внима-

ние необходимо уделять обеспечению равномерности прогрева на заданном участке сварного соединения строго по регламентированному термическому циклу на этапах нагрев-охлаждение.

При ТЦО сварных соединений в локальных зонах КН наиболее рациональным способом является газопламенный нагрев, который характеризуется высокой маневренностью и экономичностью при наименьшей трудоёмкости. При газопламенном нагреве в зависимости от размеров зоны концентрации напряжений (общая, локальная) необходимо использовать горелки различных типов: кольцевые, прямые в виде ствола – «пушки», газосварочные с удельной потребляемой мощностью 252...336 кДж на 1 см<sup>2</sup> площади нагреваемой поверхности зоны сварного соединения.

При проведении местной термической обработки важной задачей является измерение температуры нагреваемого металла в зоне концентрации напряжений, которая очень мала. В этом случае температуру чаще всего регистрируют автоматическими бесконтактными приборами измерения от температурных датчиков или пирометрами.

Поэтому при газопламенном нагреве локальных зон КН наиболее рациональным и эффективным способом контроля является применение пирометров, принцип действия которых основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

Одним из преимуществ пирометров является то, что они позволяют проводить регистрацию температурных данных при быстрых и динамичных процессах и, кроме того, проводить измерения на опасных участках объектов и в труднодоступных местах. Их использование еще важно потому, что при ТЦО не требуется выдержка металла при постоянной температуре.

На результаты проводимой ТЦО могут влиять различные неблагоприятные факторы, поэтому при ее проведении в зонах КН необходимо соблюдать следующее:

- желательно восстановительную ТЦО металла в зонах КН проводить при положительной температуре окружающей среды, с обеспечением защиты зоны нагрева от попадания воды, жиров и грязи;

- обеспечить необходимую равномерность прогрева всей зоны КН;
- обеспечить электро - и пожаробезопасность проводимых работ;
- освободить нагреваемые части элементов конструкций от действия внешних изгибающих и растягивающих нагрузок статического, циклического и ударного характера;

- обеспечивать предварительную разгрузку элементов сварных металлоконструкций строительных машин перед их усилением.

Процесс формирования мелкозернистой структуры при ТЦО в локальных зонах КН необходимо проводить пассивным феррозондовым методом, так как его высокая структурная чувствительность позволяет рекомендовать этот метод для контроля формирования структур с заданной степенью дисперсности в процессе ТЦО не только в опасных зонах КН сварных МК, но и в промышленных условиях как наиболее эффективный метод контроля по сравнению с методом металлографического анализа.

Оптимальным режимом термоциклической обработки мест усиления локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях металлоконструкций является:

- в сварном шве, имеющем литую дендритную структуру с пониженными механическими свойствами, а также в зоне сплавления с участком перегрева, имеющем крупнозернистую структуру с пониженной ударной вязкостью и пластичностью, не менее 5...7 циклов и даже 10 нагрев проводить до температуры 770 °С в помещениях и до 780 °С вне помещений с последующим охлаждением на воздухе;

- в зоне основного металла с исходной заводской структурой проводить 3-5 кратный нагрев до 770 °С с последующим охлаждением после каждого цикла на воздухе;

Усиление локальных опасных зон КН в сварном соединении и элементах металлоконструкций строительных машин путем восстановительной термоциклической обработки за счет направленного изменения микроструктуры металла в заданном направлении, то есть получения мелкозернистой структуры с повышенными прочностными свойствами с поэтапным пассивным феррозондовым контролем ее формирования, позволяет повысить долговечность, надежность и безопасность эксплуатации сварных МК

как в процессе изготовления, транспортировки, монтажа, так и в процессе длительной эксплуатации.

#### **4.4. Разработка методики контроля и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации**

Проведенные экспериментальные исследования на широко применяемых малоуглеродистых сталях 08пс и Ст3 позволили установить взаимосвязь между структурными, механическими и магнитными параметрами в процессе ступенчатого упругопластического нагружения (разгрузки). Аналогичные зависимости на низколегированных сталях 09Г2С и 10ХСНД ранее были получены авторами [51]. При этом выявленные взаимосвязи сохраняются при наличии немагнитного защитного покрытия толщиной до 2 мм, что позволяет проводить магнитный контроль пассивным феррозондовым методом без предварительной подготовки поверхности сварных соединений и элементов обследуемых сварных МК. Это не только повышает производительность труда и снижает материальные затраты на неразрушающий контроль, но и позволяет проводить сканирование поверхности как сварных соединений, так и труднодоступных мест, а также вести поиск зон КН в трубчатых или прямоугольных замкнутых контурах, где возникли или возникают локальные или общие коррозионные повреждения.

Проведенные исследования по влиянию ТЦО на структуру сварного шва, зону сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева конструкционных сталей 08пс и Ст3 показали, что во всех исследуемых зонах сварного соединения (сварном шве и зоне термического влияния) формируется более мелкозернистая структура, степень дисперсности которой увеличивается с увеличением числа циклов ТЦО (см. гл. 3).

Механические испытания конструкционных сталей 08пс и Ст3 после проведения 1-10 циклов ТЦО нагрев-охлаждение показали повышение прочностных свойств на 12-15% (табл. 12 и 13, п. 3.4, гл. 3 дисс.), что очень важно для усиления металла в зонах КН, для сохранения высокой работоспособности сварных МК. При этом отмечено, что с увеличением числа циклов более 3-5 приращение прочностных свойств несколько за-

медляется, что хорошо согласуется с экспериментальными данными пассивного феррозондового метода контроля и металлографического анализа.

На основании разработанных методов, методик и приборов исследований, а также различных оптимальных режимов термической обработки на конструкционных сталях с различной исходной микроструктурой была разработана методика МУ РД СПбГАСУ 004-16-01 "Методика оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации", схема которой представлена на рис. 69.

Эта методика предусматривает в первую очередь анализ технической документации обследуемых строительных машин. Анализ документации проводят с целью установления перечня технических параметров, предельных состояний металла, выявления возможных отказов и повреждений, а также наличия сварных соединений, участков и элементов конструкций, рост поврежденности в которых и их дефективность могут привести к ресурсному отказу [83, 98].

Большое внимание следует уделять анализу критериев, причин, последствий и критичности различных отказов. Окончание работы завершается составлением перечня проанализированной документации, составлением эскизов и таблиц с указанием элементов и участков, которые представляются наиболее предрасположенными к появлению повреждений и отказов (скрытых, зависимых и внезапных). Окончательным итогом работы является выдача технического заключения или базы данных по техническим параметрам, программе оперативной диагностики.

Оперативная (функциональная) диагностика проводится для получения данных о техническом состоянии обследуемых сварных металлоконструкций, технологических параметров и условиях взаимодействия с окружающей средой [20].

Разработанная программа согласуется со службами и органами, ответственными за эксплуатацию объекта.

В программе должна быть предусмотрена по необходимости установка на объекте дополнительной диагностической аппаратуры, позволяющей наиболее полно выявить повреждения в сварных соединениях, в элементах и узлах МК и возможности возникновения отказов [57].

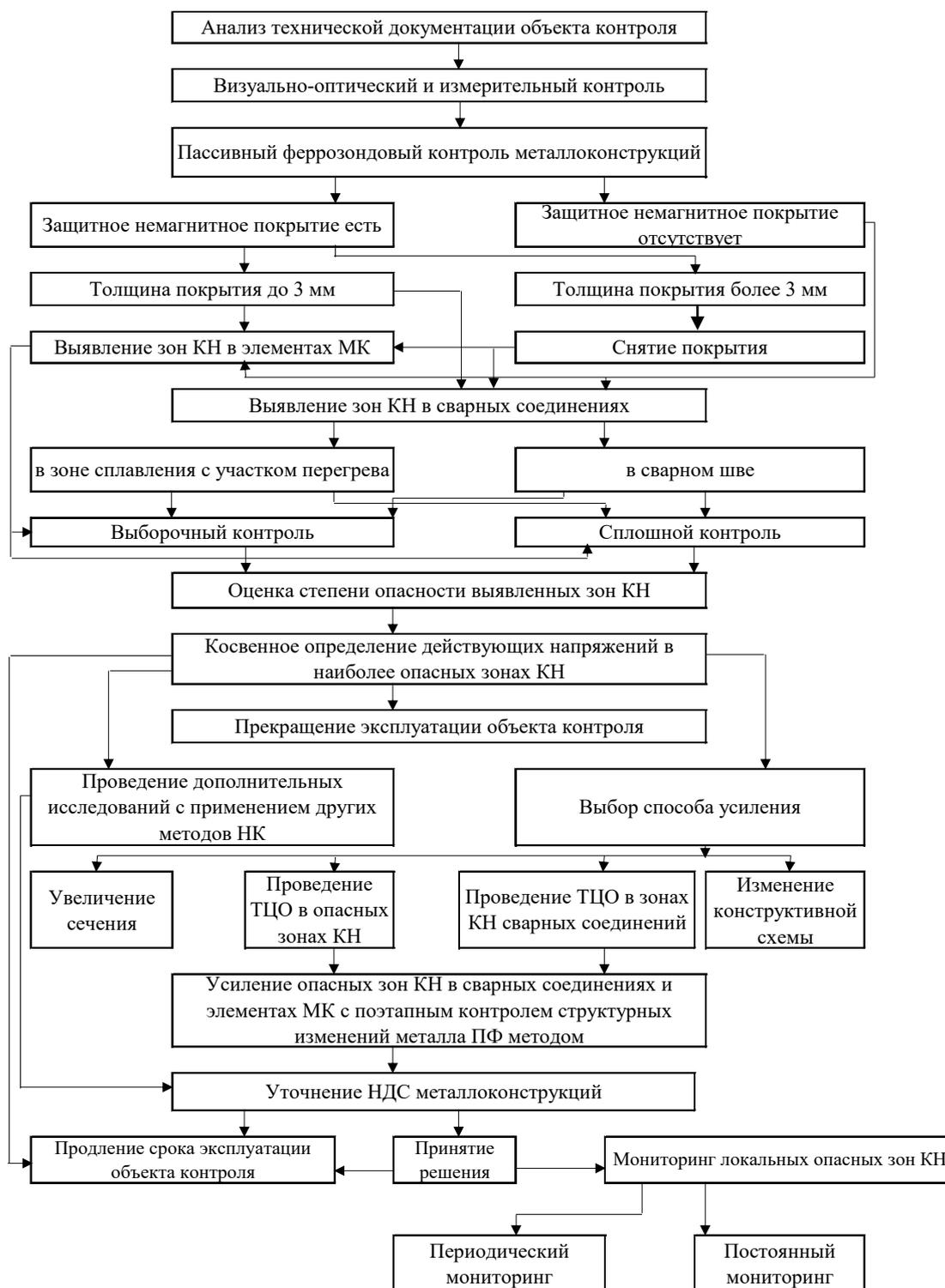


Рис. 69. Схема оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин

Далее методика предусматривает визуальный-оптический и измерительный контроль, который включает осмотр труднодоступных узлов и предполагаемых опасных зон сварных металлических конструкций [64], измерение геометрических параметров и толщины стенок элементов кон-

струкций, определение химического состава металла.

При проведении визуального контроля рекомендуется использовать схемы осмотра металлоконструкций, на которых показаны места появления наиболее опасных повреждений.

На рис. 70–72 показано несколько типичных схем осмотра строительных машин с указанием наиболее опасных мест появления дефектов, различных повреждений и зон концентрации напряжений, которые необходимо осмотреть в первую очередь. В табл. 15 приведены условные обозначения наружных дефектов, а на рис. 73 показаны типовые места образования трещин в сварных соединениях.

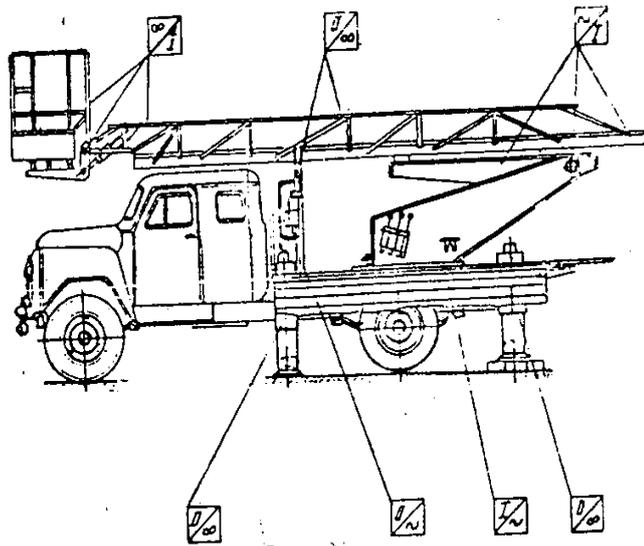


Рис. 70. Схема первоочередного осмотра сварных металлоконструкций автоподъемника КП-17

При внешнем осмотре в первую очередь определяют деформации сварных конструкций (балок, ферм), общее состояние элементов металлоконструкций и сварных соединений. При этом особое внимание обращают на наличие таких дефектов как:

- трещин в сварных швах и зоне термического влияния;
- трещин в основном металле элементов металлоконструкций;
- местных механических повреждений (изломов, разрывов);
- локальных и общих коррозионных повреждений.

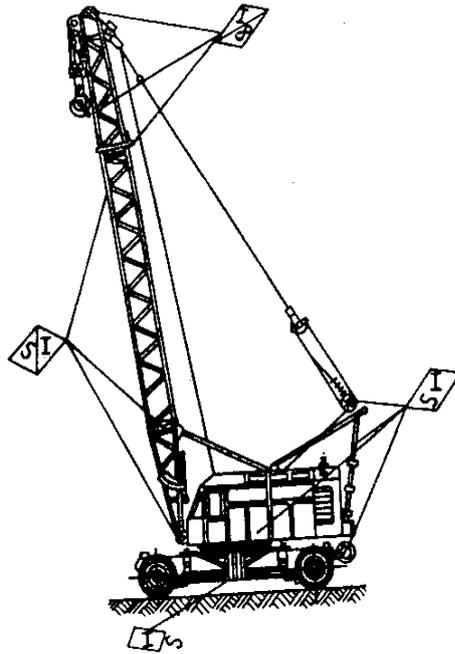


Рис. 71. Схема первоочередного осмотра сварных МК пневмокошесного крана

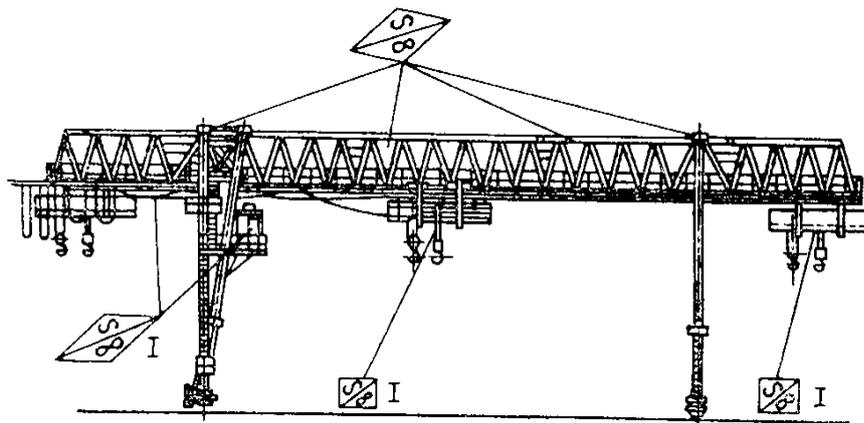


Рис. 72. Схема первоочередного осмотра сварных МК козлового крана

В случае образования трещин обращают пристальное внимание на направление их развития и распространения на такие элементы как:

- поперечные сварные швы;
- сварные швы, нагруженные подвижной нагрузкой;
- стыковые сварные и фланцевые соединения;
- стыки поясов, особенно в растянутых зонах;
- места крепления рельсов.

∞	Прогибы, вмятины и искривления
	Трещины в сварных соединениях
	Трещины в основном металле
I	Ослабленные крепления
	Коррозионные повреждения
S	Места износа металла
/	Вероятные места образования трещин

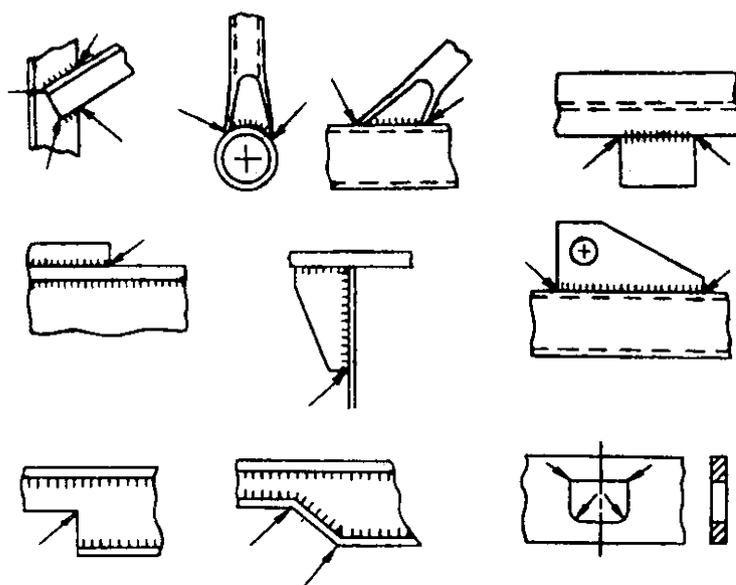


Рис. 73. Типовые места образования трещин в сварных соединениях металлоконструкций строительных машин

В машинах с коробчатыми балками, эксплуатирующихся вне помещений, могут появляться коррозионные повреждения (локальные, общие), которые можно определить по характерному звуку при простукивании металла балки молотком. При поражении элементов металлоконструкции более чем на 10 % площади поперечного сечения проводят замеры толщин

элементов ультразвуковым толщиномером или определяют опасные зоны КН пассивным феррозондовым методом контроля.

Затем разработанная методика предусматривает применение в комплексе с другими методами (неразрушающими и разрушающими) пассивного феррозондового метода контроля, обладающего высокой производительностью и позволяющего без предварительной подготовки поверхности контроля и снятия немагнитного защитного покрытия, если его толщина не превышает 2 мм, выявлять локальные зоны концентрации напряжений в сварных соединениях (сварном шве и зоне термического влияния), в элементах и узлах металлоконструкций, в труднодоступных местах.

На сварных соединениях, согласно ранее проведенным исследованиям, феррозондовым преобразователем, в первую очередь, проводят точечное сканирование зоны сплавления сварного шва с основным металлом и участком перегрева, во вторую очередь – зоны сварного шва. При этом, отмечают места значительного изменения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$ , отличающиеся от основной массы значений, имеющие как максимальные, так и минимальные значения любого знака, которые соответствуют зонам концентрации напряжений. Сканирование сварных соединений должны проводиться в первую очередь, так как их наличие дает до 80 % отказов всех сварных металлоконструкций.

После выявления зон КН проводят оценку соответствия этих зон упругой или пластической областям деформирования, то есть определяют степень их опасности. Для этого, в зависимости от вида нагружения элементов конструкции, проводят ступенчатое разгружение – нагружение или нагружение–разгружение элементов МК, в результате которых фиксируют изменение магнитного параметра  $H_p$  в зависимости от изменения действующих напряжений  $\sigma$  (или от изменения внешней нагрузки  $P$ ).

По характеру изменения  $H_p(\sigma)$  в процессе ступенчатого циклического нагружения (разгружения) элементов металлоконструкций определяют:

- знак действующих напряжений в зоне концентрации напряжений (растяжение или сжатие);
- область деформирования зоны КН (упругая, пластическая);

- в наиболее опасных зонах КН косвенно определяют величину действующих напряжений.

При оценке степени опасности локальных зон КН следует иметь в виду то, что:

- в области упругого деформирования наиболее опасными являются те зоны КН, в которых действующие напряжения превышают допустимые;

- к опасным зонам, которые требуют усиления, относят все зоны КН, находящиеся в пластической области деформирования.

Следует отметить, что выявление зон КН пассивным феррозондовым методом позволяет значительно сократить объем работ при оценке НДС сварных МК строительных машин и повысить результаты проводимых исследований, так как в этом случае становятся известными те локальные зоны КН, в которых требуется проведение дальнейшего поиска дефектов, мест с целью усиления металла, а также мест установки датчиков тензометрического, магнитного или иного мониторинга.

Разработанная методика предусматривает усиление опасных локальных зон КН в сварных соединениях и элементах МК за счет проведения в них ТЦО с поэтапным пассивным феррозондовым методом контроля с целью формирования мелкозернистой структуры с заданной степенью дисперсности, обладающей повышенными прочностными свойствами.

Одним из важных факторов, влияющих на выбор варианта усиления в условиях действующего производства, является проведение работ по усилению конструкций без остановки технологического процесса, или с минимальной остановкой. Для сварных конструкций это означает усиление элементов под нагрузкой или с предварительной разгрузкой. Наиболее экономичным и наименее трудоемким является усиление под нагрузкой, что учитывалось при разработке методики усиления.

Данные изменения прочностных свойств сталей 08пс и Ст3 в процессе ТЦО приведены в табл. 12 и 13 (п. 3.4, гл. 3 диссертации), из которой следует, что в процессе термоциклической обработки в исследуемых сталях происходит повышение пределов текучести и прочности на 12...15 %.

Таким образом, для восстановления прочностных свойств металла до нормативного уровня следует сформировать в опасной зоне КН из крупнозернистой более мелкозернистую структуру, необходимую степень дисперсности которой можно рассчитать по уравнению Холла-Петча. Одной из отличительных особенностей усиления элементов МК в зонах КН с помощью ТЦО при поэтапном ПФ контроле структурных изменений в металле является сравнительная простота, высокая эффективность и производительность процесса.

Разработанная методика контроля и повышения прочности сварных металлоконструкций строительных машин в процессе длительной 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 316 тыс. руб.

#### **4.5. Рекомендации по проведению периодического и постоянного магнитного мониторинга сварных соединений**

В работе оценивалась возможность использования пассивного феррозондового метода для проведения мониторинга сварных соединений металлических конструкций в наиболее опасных локальных зонах КН. В последнее время для опасных производственных объектов все чаще применяется непрерывный или периодический контроль (мониторинг). Проведение мониторинга является важной задачей, так как он позволяет значительно повысить надежность и работоспособность длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций.

Мониторинг включает в себя систему наблюдений за состоянием эксплуатируемого ответственного объекта для своевременного обнаружения изменений в его элементах, их оценки, предупреждения и устране-

ния последствий возникающих негативных процессов [76]. Мониторинг позволяет в любое время дать достоверную информацию о техническом состоянии в локальных опасных зонах КН сварных соединений, элементов и сварных металлоконструкций в целом. Он включает в себя систематическое наблюдение за состоянием сварных металлоконструкций, оценку и прогноз их прочности и надежности, а также ведение соответствующей документации.

Применение постоянного или периодического мониторинга необходимо в следующих случаях:

- если последствия разрушения объекта могут привести к значительным материальным и человеческим потерям, к экологической катастрофе;
- если затруднен или отсутствует свободный доступ к объекту обследования;
- когда в результате быстрого развития эксплуатационных дефектов резко сокращен срок службы объекта до выработки расчетного (нормативного) ресурса.

Система мониторинга должна включать в себя следующее [62, 76, 87, 101]:

- все виды внешних и внутренних эксплуатационных дефектов, их расположение, характер развития;
- виды внешних нагрузок и основные факторы, являющиеся причиной возникновения различных дефектов в сварных металлических конструкциях при их эксплуатации;
- методы и особенности неразрушающего контроля, их возможные комбинации для получения более надежной и доступной информации о дефектах;
- критерии оценки опасности обнаруженных дефектов и рекомендации по дальнейшей эксплуатации;
- различные способы по обнаружению и слежению за ростом дефектов и их регистрации.

В процессе мониторинга контролируются такие основные виды экс-

платационных повреждений, как:

- опасные локальные зоны концентрации напряжений в различных зонах сварных соединений и элементах сварных конструкций;
- трещины в сварных соединениях (в сварном шве и зоне термического влияния) и в основном металле;
- износ стенок изделия;
- изменение пространственного положения металлоконструкции в процессе длительной эксплуатации;
- коррозионные повреждения (локальные и общие), являющиеся потенциальными местами образования опасных зон КН.

Выбор метода неразрушающего контроля, обеспечивающий своевременное обнаружение изменений при диагностическом мониторинге, зависит от объекта, вида внешних нагрузок и эксплуатационных дефектов, свойственных данному объекту, а также от особенностей их расположения в исследуемой металлоконструкции [56, 70, 80, 93, 107]. В зависимости от вида объекта методы НК могут применяться по отдельности или в соответствующем комплексе:

- для сложных пространственных сварных металлических конструкций – акустико-эмиссионный, ультразвуковой, феррозондовый, пассивный феррозондовый, тензометрические методы, метод измерения твердости;
- для замкнутых контуров, полостей и внутренних поверхностей металлических конструкций – методы толщинометрии и эндоскопии (с применением твердых и гибких эндоскопов), пассивный феррозондовый метод.

Одной из важных задач обеспечения надежности является многоуровневый мониторинг на всех стадиях жизненного цикла особо ответственных металлоконструкций и сооружений: проектирование, изготовление, эксплуатация, реконструкция [100].

Одним из перспективных методов, применяемых при периодическом и постоянном мониторинге сварных соединений металлоконструкций опасных производственных объектов в процессе их эксплуатации, является

пассивный феррозондовый метод, позволяющий осуществлять сплошной экспресс-контроль металла без предварительной подготовки поверхности контроля и удаления немагнитных защитных покрытий толщиной менее 2 мм. Это особенно важно при мониторинге сварных соединений (сварного шва и зоны термического влияния), так как пассивный феррозондовый метод контроля является практически единственным, который без специальной подготовки поверхности сварных соединений позволяет не только выявлять опасные локальные зоны КН, но и проводить в них как постоянный, так и периодический мониторинг.

Полученные экспериментальные данные на лабораторных и сварных образцах из конструкционных сталей являются основополагающими для использования пассивного феррозондового метода при постоянном и периодическом магнитном мониторинге.

Использование магнитного мониторинга позволяет не только своевременно обнаружить развитие опасных дефектов, что важно для качественной оценки фактического технического состояния сварных МК, но и на этой основе повысить их долговечность, надежность и принимать обоснованные решения о продлении срока безопасной эксплуатации объекта [71].

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработана последовательность действий магнитного контроля для выявления локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях (сварной шов, зона термического влияния, основной металл), элементах и узлах металлоконструкций строительных машин и косвенного определения действующих напряжений в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений для применения в последующих прочностных расчетах.

2. Разработаны оптимальные режимы термоциклической обработки зон сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния) для повышения прочностных свойств и достижения их равнопрочности с основным металлом.

Даны рекомендации по формированию мелкозернистой структуры с повышенными прочностными свойствами в контролируемых локальных зонах концентрации напряжений металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин с учетом температуры окружающей среды и требуемого количества циклов ТЦО.

3. Разработана и апробирована методика контроля и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации МУ РД СПбГАСУ 004–16–01, позволяющая в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений значительно снизить структурную и механическую неоднородность и обеспечить равнопрочность зон сварных соединений, тем самым повысить надежность и безопасность эксплуатации металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин.

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

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе изложено решение научно-практической задачи контроля 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.

## **Основные выводы и результаты исследований.**

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 длительной 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

### КНИГИ

#### ОДНОТОМНЫЕ ИЗДАНИЯ

- 1. Бакши, О.А.** Механическая неоднородность сварных соединений: [Текст]: текст лекций по курсу "Специальные главы прочности сварных конструкций". – Ч. I / О.А. Бакши; - Челябинск [ЧПИ], 1983. – 56 с.
- 2. Белокур, И.П.** Дефектология и неразрушающий контроль. Учеб.пособ. – К.: Выщашк., 1990. – 207 с.
- 3. Бельчук, Г.А., Гатовский, К.М., Кох, Б.М.** Сварка судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1980. – 448 с.
- 4. Бокштейн, С.З.** Диффузия и структура металлов [Текст] / С.З. Бокштейн; – М.: [Металлургия], 1973. – 206 с.
- 5. Винокуров, В.А., Куркин С.А., Николаев, Г.А.** Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
- 6. Волков, С.А.** Строительные машины: Учебник для строит. ВУЗов / С.А. Волков, С.А. Евтюков // Под общ.ред. проф. С.А. Волкова. – СПб.: Изд-во ДНК, 2008. – 704 с.
- 7. Гордиенко, В.Е.** Магнитный контроль и оценка напряженно-деформированного состояния металла при упругопластическом деформировании. [Текст] / В.Е. Гордиенко; – СПб.: СПбГАСУ, 2008. – 114 с.
- 8. Гордиенко, В.Е.** Техническое диагностирование строительных конструкций. Методы контроля качества. [Текст] / В.Е. Гордиенко; СПбГАСУ – СПб., 2004. – 144 с.
- 9. Гордиенко, В.Е., Гордиенко, Е.Г.** Дефекты сварных швов и контроль качества сварных соединений: Учеб.пособие. – СПб.: СПбГАСУ, 2004 г. – 84 с.
- 10. Дж. Коллинз.** Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
- 11.** Диагностирование грузоподъемных машин. [Текст] / Под ред. В.И. Сероштанна, Ю.С. Огарь. – М.: Машиностроение, 1992. – 192 с.
- 12. Дмитриук, Г.Н.** Надежность механических систем [Текст] / Г.Н. Дмитриук, И.Б. Пястик. – М.: Машиностроение, 1966. – 182 с.
- 13. Дубов, А.А.** Диагностика котельных труб с использованием магнитной па-

мяти металла [Текст] / А.А. Дубов – М.: [Энергоатомиздат], 1995. – 111 с.

**14. Дубов, А.А.** Метод магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля. [Текст]: Учеб.пособ. / А.А. Дубов, Ал.А. Дубов, С.М. Колокольников. – М.: [Изд-во ЗАО "Тиссо"], 2003. – 320 с.

**15. Дьяченко, С.С.** Особенности влияния холодной деформации и ТЦО на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей. Термоцикл. обраб. метал. изделий. [Текст] / С.С. Дьяченко, Е.А. Кузьменко, А.И. Поляничка. – Л., 1982. – С. 18–19.

**16. Иванцов, И.Г.** Влияние  $\alpha \rightarrow \gamma$  - превращения на дислокационную структуру чистого железа. [Текст] / И.Г. Иванцов, А.М. Блинкин // Материалы совещания по вопросам получения и исследования свойств чистых металлов. – Харьков, 1977. – С. 84–85.

**17. Илларионов Э.И.** О влиянии ТЦО на прочностные свойства стали 30ХГСА. Термоцикл. обраб. метал. изделий [Текст] / Э.И. Илларионов – Л., 1982. – С. 71–73.

**18. Кикин, А.И.** Особенности проектирования и расчета стальных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды. [Текст] / А.И. Кикин // Металлические конструкции: сб. трудов. / МИСИ – М., 1962. – С. 8-16.

**19. Коллакот, Р.** Диагностика повреждений. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

**20. Коровин, С.К.** Диагностика подъемно-транспортных машин. [Электронный ресурс] : учебно-методический комплекс по дисциплине / С. К. Коровин; каф. ПТМ. – СПб. : ПГУПС. – 2003.

**21. Лившиц, Л.С.** Материаловедение для сварщиков. [Текст] / Л.С. Лившиц; - М.: [Машиностроение], 1979. – 253 с.

**22. Нейфельд, И.Е., Фалькевич, А.С., Лившиц, Л.С.** Контроль качества сварных соединений в строительстве. – М.: Стройиздат, 1968. – 176 с.

**23.** Неразрушающий контроль и диагностика. [Текст]: Справочник. / Под ред. В. В. Ключева, – М.: [Машиностроение], 2003. – 656 с.

**24.** Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник. Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

**25. Новиков, В.Ф.** О новом виде памяти к механическим напряжениям [Текст]/ В.Ф. Новиков, Е.В. Долгих, А.М. Конопелько // Проблемы освоения нефтегазовых ресурсов Западной Сибири. – 1979. – С. 38.

**26. Панасюк, В.В., Андрейкив, А.Е., Ковчик, С.Е.** Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1977. – 277 с.

**27. Петров, Г.Л.** Сварочные материалы. [Текст] / Г.Л. Петров; - Л.: [Машиностроение], 1972. – 280 с.

28. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. [Текст]: / Под ред. В.И. Труфякова. – Киев: [Наукова думка], 1990. – 256 с.
29. Сверхмелкое зерно в металлах. [Текст] /. Пер. с англ. В.В. Романеева и А.А. Григорьяна. Под ред Л.К. Гордиенко. М.: [Металлургия]. 1973. 384 с.
30. Суворов, А.Л. Дефекты в металлах. – М.: Наука, 1984. – 176 с.
31. Теория сварочных процессов; под ред. В.В. Фролова [Текст] / - М.: [Высшая школа], 1988. – 559 с.
32. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под редакцией акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 778 с.
33. Троицкий, В.А., Трущенко, А.А., Белокур, И.П. Контроль качества сварки. – К.: Наук, думка, 1983. –64 с.
34. Уралов, В.Л. Современные технологии восстановления элементов машин [Текст] : учеб. пособие / В. Л. Уралов, О. А. Бардышев, А. А. Мигров. – СПб. : ПГУПС , 2005. – 34 с.
35. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. [Текст] / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: [Машиностроение], 1989. – 255 с.
36. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов [Текст] / В.К. Федюкин; ЛГУ – Л.: 1977. – 143 с.
37. Фролов, П.Т. Эксплуатация и испытания строительных машин [Текст] / П.Т. Фролов, И.В. Петров, М.С. Балаховский, В.П. Сергеев, В.Д. Мартынов. – М.: Высш. шк., 1970. – 392 с.
38. Ханапетов, М.В. Контроль качества сварных соединений. – М.: Стройиздат, 1979. – 136 с.
39. Хромченко, Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах [Текст] / Ф.А. Хромченко – М.: [Мир]. 2004. – 408 с.
40. Шепеляковский, К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве [Текст] / К.З. Шепеляковский – М., [Машиностроение], 1972.

### *Стандарты*

41. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 27 с.
42. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. [Текст]. – Введ. 1976-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 31 с.
43. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. [Текст]. – Введ. 1967-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 45 с.

**44. ГОСТ 15467-79.** Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением №1). [Текст]. – Введ. 1979-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 22 с.

**45. ГОСТ 2601-84.** Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. [Текст]. – Введ. 1985-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 39 с.

**46. ГОСТ 27002-89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 1990-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 37 с.

**47. ГОСТ 27751-88.** Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету [Текст]. – Введ. 1988-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

**48. ГОСТ 30242-97.** Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения. [Текст]. – Введ. 2003-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.

#### МНОГОТОМНЫЕ ИЗДАНИЯ

**49.** Металлические конструкции [Текст]: в 3т / под общей ред. В.В. Кузнецова [ЦНИИ проект-стальконструкция им. М.П. Мельникова]. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т.1: Общая часть. [Справочник проектировщика] / под ред. В.В. Кузнецова. – 2004. – 576 с.

**50.** Сборник нормативных и справочных документов по безопасной эксплуатации грузоподъемных машин [Текст]: в 2т. – Т. 2 / В.С. Котельников, Н.А. Шишков, А.М. Горлин. – М.: НПО ОБТ, 1995. – 378 с.

#### НЕОПУБЛИКОВАННЫЕ ДОКУМЕНТЫ

##### *Диссертации*

**51. Кузьмин О.В.** Методика контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Кузьмин О.В.; – СПб., 2011. – 158 с.

##### *Афторефераты*

**52. Бахарев, М.С.** Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Бахарев М.С.; – Тюмень, 2004. – 45 с.

**53. Смирнов, А.И.** Влияние макро-, мезо- и микродефектов структуры на конструктивную прочность углеродистых сталей при циклическом нагружении [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Смирнов А.И.; –Новосибирск, 2003. – 18 с.

**54. Шахназаров, С.С.** Оценка технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса эксплуатируемых стальных стержневых конструкций [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Шахназаров С.С.; –Л., 1984. –24 с.

## СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ДОКУМЕНТОВ

### *Статьи из сериальных изданий*

**55. Акулов, Н.С.** Магнитный метод исследования внутренних упругих напряжений в ферромагнитных материалах [Текст] / Н.С. Акулов, Л.В. Киренский // Журнал технической физики. – 1939. – т. 9, вып. 13. – С. 1145-1150.

**56. Бадалян, В.Г.** Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем автоматизированного УЗК с когерентной обработкой данных [Текст] / В.Г. Бадалян // В мире неразрушающего контроля, 2004. – № 4(26). – С. 22–27.

**57. Бардышев, О.А.** Подготовка и аттестация специалистов и экспертов в области промышленной безопасности [Текст] / О.А. Бардышев, С.О. Кузнецова // Безопасность труда в промышленности: научно-технический журнал, 2005. – №6. – С. 18-20.

**58. Бардышев, О.А.** Проблемы организации эксплуатации строительной техники в Санкт-Петербурге [Текст] / О.А. Бардышев // Механизация строительства: Всероссийский научно-технический и производственный журнал, 1997. – № 6. – С. 2-3.

**59. Бардышев, О.А.** Роль диагностики в обеспечении безопасности работы кранов [Текст] / О.А. Бардышев // Подъемные сооружения, специальная техника, 2003. – №7. – С. 9-10.

**60. Белый, Г.И.** К вопросу повышения надежности контроля при техническом диагностировании строительных конструкций [Текст] / Г.И. Белый, В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 3. – С. 40-41.

**61. Большаков, В.Н.** Влияние механических напряжений на локальную остаточную намагниченность [Текст] / В.Н. Большаков, В.Г. Горбаш, Т.В. Оленович // Известия АН БССР. Серия физико-технических наук. –1980. – №1. – С. 109–112.

**62. Бондаренко, А.Ю.** Мониторинг состояния сварных соединений для прогнозирования остаточного ресурса магистральных нефтегазопроводов / А.Ю. Бондаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2003. – № 1. – С. 20–24.

**63. Вольберг, Ю.Д.** Учет воздействия агрессивной среды на несущую способность стальных конструкций [Текст] / Ю.Д. Вольберг, А.С. Коряков // Металлические конструкции в строительстве: сб. трудов. / МИСИ. – М., 1983. – № 183. – С. 28–35.

**64. Гордиенко, В.Е.** Визуально-оптический и измерительный контроль как средства технического диагностирования металлических конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.Е. Гордиенко, Н.В. Овчинников, А.О. Бакшеев, В.С. Курочкин // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – №4(5). – С. 20–24.

**65. Гордиенко В.Е.** 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.

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

**67. Гордиенко, В.Е.** Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния малоуглеродистых и низколегированных сталей от одноосных напряжений растяжения и сжатия [Текст] / В.Е. Гордиенко, Н.В. Овчинников, А.О. Бакшеев // Контроль. Диагностика. – 2007. – №2. – С. 60–64, 69.

**68. Гордиенко, В.Е.** К вопросу оценки НДС металла при упруго-пластическом деформировании [Текст] / В.Е. Гордиенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №1. – С. 54–55.

**69. Гордиенко, В.Е.** К вопросу повышения надежности строительных металлических конструкций [Текст] / В.Е. Гордиенко // Вестник гражданских инженеров. – 2006. – № 3 (8). – С. 37–42.

**70. Гордиенко, В.Е.** К выбору методов неразрушающего контроля при техническом диагностировании конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – №3. – С. 45-47.

**71. Гордиенко, В.Е.** Мониторинг. Пути повышения надежности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.Е. Гордиенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – №12. – С. 42–43.

**72. Гордиенко, В.Е.** О факторах, влияющих на выбор методов неразрушающего контроля и надежность строительных металлоконструкций [Текст] / В.Е. Гордиенко // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 1. – С. 52–56.

**73. Горкунов, Э.С.** Устойчивость остаточной намагниченности термически обработанных стальных изделий к действию упругих деформаций [Текст] / Э.С. Горкунов, В.Ф. Новиков, А.П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 1991. – №2. – С. 68–76.

**74. Горынин, И.В., Игнатов, В.А., Звездин, Ю.Г. и др.** Сопротивление разрушению сварных толстостенных корпусов высокого давления энергетического оборудования. Сообщ. 1. Статистический анализ дефектов и сопротивление разрушению корпусных материалов. Проблемы прочности, 1985.– № 11. – С. 3-14.

**75. Грачев, А.А.** Влияние неплоскостности элементов на работоспособность тонкостенных металлических конструкций грузоподъемных машин / А.А. Грачев, С.А. Соколов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование, 2012. – № 2-2 (147). – с 78-81.

**76. Гуменюк, В.А.** Современные возможности и тенденции развития акустико-эмиссионного метода [Текст] / В.А. Гуменюк, В.А. Сульженко, А.В. Яковлев // В мире НК. – 2000. – №3. – С. 8-12.

**77. Гурвич, А.К., Демидко, В.Г., Химченко, Н.В.** Классификация дефектов сварных стыковых соединений по данным ультразвукового контроля [Текст] / А.К. Курвич, В.Г. Демидко, Н.В. Химченко // Автомат.сварка.–1979. – № 4. – С. 38-39.

**78. Дубов, А.А.** Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти [Текст] / А.А. Дубов // Горный вестник. – 1998. – №4. – С. 135.

**79. Иванов, Е.А., Котельников, В.С., Хапонен, Н.А., Коновалов, Н.Н., Покровская, О.В., Шевченко, В.П.** Аттестация – критерий технологической дисциплины НК на опасных производственных объектах [Текст] / Е.А. Иванов, В.С. Котельников, Н.А. Хапонен, Н.Н. Коновалов, О.В. Покровская, В.П. Шевченко // В мире НК. –2002. – №3 (17). – С.8-10.

**80. Краковский, Ю.М.,** Симонов, С.В. Программный комплекс гибкого мониторинга роторных машин по виброданным / Ю.М. Краковский, С.В. Симонов // Контроль. Диагностика, 2002. – № 12. – С. 51–55.

**81. Лебедев, В.А.** Исследование перекосов металлических конструкций кранов мостового типа [Текст] / В.А. Лебедев, С.А. Соколов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №2 (171). – С. 171-176.

**82. Максимов, И.Л.** О возможности контроля механических напряжений в металле трубопровода методом магнитных шумов [Текст] / И.Л. Максимов // Нефтяная промышленность. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: реферативный научно-технический сборник. – М.: Недра, 1981. – № 5. – С. 2-4.

**83. Малов, Е.А.** Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России [Текст] /

Е.А. Малов, Н.Н. Карнаух, В.С. Котельников [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 1996. – №3. – С. 45–51.

**84. Матюк, В.Ф.** Использование аномальной зависимости градиента нормальной составляющей поля остаточной намагниченности для контроля механических свойств изделий с защитными неметаллическими покрытиями [Текст] / В.Ф. Матюк // Дефектоскопия. – 1996. – №3. – С. 30–36.

**85. Махненко, В.И., Великоиваненко, Е.А., Розынка, Г.Ф.** Распределение напряжений и деформаций вдоль фланговых швов [Текст] / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка // Автоматическая сварка. – 1985. – № 5. – С. 3-10.

**86. Машнев, М.М.** Определение требуемого уровня надежности строительных и дорожных машин: сборник научных трудов / М.М. Машнев, О.А. Бардышев, Д.И. Попов // Расчет и конструирование транспортных механизмов: Сборник трудов / Под ред. М.М.Машнева. – СПб.: ЛИИЖТ, 1977. – С. 63-69.

**87. Митенков, Ф.М.** К вопросу о создании эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, Ю.Г. Коротких // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2003. – № 4. – С. 105–117.

**88. Мужичкий, В.Ф.** Теория и практика магнитной диагностики стальных металлоконструкций. [Текст] / В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько // Контроль. Диагностика. – 2002. – №3. – С. 15–19.

**89. Новиков, В.Ф.** К природе пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного состояния магнетика [Текст] / В.Ф. Новиков, Т.А. Яценко, М.С. Бахарев // Известия вузов. Нефть и газ. – 1998. – №4. – С.96–102.

**90. Новиков, В.Ф.** Магнитоупругие свойства композиционных материалов, содержащих кабалыт [Текст] / В.Ф. Новиков, А.Е. Прожерин // Физика металлов и металловедение. – 1991. – №1. – С. 202–205.

**91. Новиков, В.Ф.** О магнитоупругом гистерезисе в сплавах железа с тербием [Текст] / В.Ф. Новиков, Е.В. Долгих // Физика металлов и металловедение. – 1980. – т.49.Вып.2. – С. 292–295.

**92. Новиков, В.Ф.** Устойчивость остаточно-намагниченного состояния инструментальных сталей [Текст] / В.Ф. Новиков, Б.В. Федоров, В.А. Изосимов // Дефектоскопия. – 1995. – №2. – С. 68–71.

**93. Перминов А.Н.** От мониторинга технического состояния ракетно-космической техники к мониторингу ее жизненного цикла / А.Н. Перминов, В.Е. Прохорович, А.И. Птушкин // В мире неразрушающего контроля, 2004. – № 4(26). – С. 8–11.

- 94. Плотников, Д.Г.** Методика оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин / Д.Г. Плотников, С.А. Соколов, А.И. Боровков, А.А. Михайлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – №1 (214). – с. 186-193.
- 95. Плотников, Д.Г.** Методика прогнозирования разрушения сварных металлических конструкций подъемно-транспортных машин /Д.Г. Плотников, С.А. Соколов // Ремонт, восстановление, модернизация . – 2015. – №12.
- 96.** Повышение ударной вязкости конструкционных сталей термоциклической обработкой [Текст]. Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – №4. – С. 15-17.
- 97. Почтман, Ю.М.** Некоторые модели задач оптимизации конструкций, взаимодействующими с агрессивными средами [Текст] / Ю.М. Почтман, Д.Г. Зеленцов // Доклады АН УССР. Серия А. 1987. № 12. – С. 39-43.
- 98. Соколов, С.А.** Методика оценки риска, возникающего при эксплуатации технологических систем / С. А. Соколов // Вестник машиностроения, 2015. – № 10. – с. 25-30.
- 99.** Сопротивление сварных тонкостенных корпусов высокого давления энергетического оборудования. Сообщение 1. Статистический анализ дефектов и сопротивление разрушению корпусных материалов / И.В. Горынин, В.А. Игнатов, Ю.Г. Звездин и др. // Проблемы прочности, 1985. - №11. – С. 3-14.
- 100. Стеклов, О.И.** Мониторинг и оценка прогнозируемого ресурса нефтегазовых сооружений [Текст] / О.И. Стеклов // Защита от коррозии и охрана окружающей среды. – 1997. – №1-2. – С. 2-8.
- 101. Стеклов, О.И.** Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии / О.И. Стеклов // Сварочное производство, 1997. – № 11. – С. 16–21.
- 102. Тимошенко, Н.Н.** Неразрушающий контроль механических свойств горячекатаной полосы магнитным методом [Текст] / Н.Н. Тимошенко, Н.Г. Бочков, А.А. Алымов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1976. – №8. – С. 979–981.
- 103.Троицкий, В.А., Козлов, В.С., Демидко, В.Г.** Классификация сварных швов по дефектности на основании результатов магнитографического контроля [Текст] / В.А. Троицкий, В.С. Козлов, В.Г. Демидко // Автомат.сварка. –1980. – № 7. – С. 55-58.
- 104.Трущенко, А.А.** Сквозные дефекты сварных соединений [Текст] / А.А. Трущенко // Дефектоскопия. –1978. – № 6. – С. 52-57.
- 105. Уралов, В.Л.** Методика определения остаточного ресурса металлоконструкции башенных кранов БК-1000 [Текст] / В.Л. Уралов, Я.С. Ватулин, С.К. Коровин // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2004. –№ 2. –

С. 162-167.

**106. Филинов, В.В.** Опыт применения метода эффекта Баркгаузена для контроля напряженного состояния деталей из высокопрочной стали [Текст] / В.В. Филинов, Ю.А. Резников, А.В. Вагин, Н.С. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1992. – №5. – С. 17–20.

**107. Шемякин В.В.** О применении метода акустической эмиссии в мониторинге опасных промышленных объектов / В.В. Шемякин, С.А. Стрижков // В мире неразрушающего контроля, 2004. – № 4(26). – С. 16–19.

**108. Embury J. D.**, Acts Met. [Text] / J.D. Embury, R.M. Fisher –1966, p.147, P. 14.

**109. Gordienko V.** Some Aspects of Maintaining Inclined Tunnel Escalators in St. Petersburg (article) / V. Gordienko, O. Bardyshev // Applied Mechanics and Materials (Problems of Architecture and Construction), 2014. – P. 274-275.

**110. Gordienko V.** Applied Aspects of Low-carbon and Low-alloy Steel Recrystallization (article) / V. Gordienko, E. Smirnova, E. Gordienko // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2015. – № 11 (10) – P. 1075-1083.

**111. Gordienko V.** Investigation of Influence by the Cold Plastic Deformation of Metals on Magnetic Intensity of Scattering / V. Gordienko, O. Bardyshev // World Appl. Sci. J., 23 (Problems of Architecture and Construction), 2013. – P.74-79.

**112. Hauser F.E.** a. o., Trans. Met. Soc. AIME [Text] / F.E. Hauser. – 1956, p. 589, p. 206.

**113. Hayden H.W.**, ASM Quart [Text] / H.W. Hayden, S. Floreen. – 1968, p. 474, p. 61.

**114. Jindal P.C.**, Trans. Met. Soc. AIME [Text] / P.C. Jindal, R.W. Armstrong.– 1969, p. 623, p. 245.

**115. Petch N. J.**, [Text] / N.J. Petch // J., JISI. –1953. – p. 174. – p. 25.

**116. Sinclair G.M.**, [Text] / G.M. Sinclair, W.J. Craig // Trans. ASM. –1952. – p.929. – P. 44.

#### *Тезисы из разовых изданий*

**117. Гордиенко, В.Е.** Дефекты и их влияние на работоспособность строительных металлических конструкций. Актуальные проблемы современного строительства. 57-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Сборник докладов. Ч. II. СПб: СПбГАСУ, 2004. – С. 136-138.

**118. Дубов, А.А.** Физические эффекты, лежащие в основе метода магнитной памяти металла. [Текст] / А.А. Дубов, В.Т. Власов // Неразрушающий контроль и диагностика: матер.науч.-техн. конф. – СПб., 2002.

# **ПРИЛОЖЕНИЕ**

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ)**

2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005. Тел: (812) 400-06-67, Факс: (812) 316-58-72, E-mail: rector@spbgasu.ru  
ИНН 7809011623 / КПП 783901001, ОКПО 02068580, ОКВЭД 80.30.1

№

На №

от



**ТВЕРЖДАЮ**

Ректор, д-р экон. наук, профессор

Е.И. Рыбнов

2017 г.

**АКТ**  
об использовании результатов диссертационной работы  
**АБРОСИМОВОЙ АНЖЕЛИКИ АНАТОЛЬЕВНЫ**  
в учебном процессе ФГБОУ ВО СПбГАСУ

Результаты диссертационной работы Абросимовой А. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук (спец. 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины), посвященной оценке и повышению прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин, нашли практическое применение в учебном процессе при проведении лабораторных и практических работ по дисциплинам «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение», «Конструктивно-защитные и отделочные материалы», «Металлические конструкции, включая сварку», «Метрология, стандартизация и сертификация» при подготовке студентов дневной, заочной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки 08.03.01 – Строительство, 23.03.02 – Наземные транспортно-технологические комплексы, 15.03.03 – Прикладная механика, 23.03.01 – Технология транспортных процессов, 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, по специальности 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства.

Материалы научных исследований, затрагивающие вопросы разрушающего и неразрушающего контроля основного металла и структурно неоднородных сварных соединений, оценки технического состояния металлоконструкций и восстановления прочностных свойств металла элементов конструкций с целью повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин, нашли отражение в опубликованных учебных пособиях и монографии общим объемом 34,4 п.л. (личное участие 11,6 п.л.).

Публикации:

1. Березина, А.А. Контроль отклонений формы и расположения поверхностей изделий в строительстве. Лабораторный практикум. Ч. IV: учеб. Пособие / А.П. Орлов, В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, В.А. Норин, А.А. Березина // СПбГАСУ. – СПб., 2015. – 68 с. (4,3/0,9 п.л.).
2. Абросимова, А.А. Метрология, стандартизация и сертификация. Лабораторный практикум: Учеб. пособие / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, В.А. Норин, А.А. Абросимова, В.И. Новиков, Е.В. Трунова // СПбГАСУ. – СПб., 2016. – 128 с. (8,0 /1,6 п.л.).
3. Абросимова, А.А. Материаловедение: учебное пособие: лабораторный практикум / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, А.А. Абросимова, В.И. Новиков, Е.В. Трунова // СПбГАСУ. – СПб., 2016. – 108 с. (6,8/1,4 п.л.).
4. 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. (15,3/7,7 п.л.).

Декан Автомобильно-дорожного  
факультета, д-р техн. наук, профессор

Евтюков С.А.

Декан Строительного  
факультета, канд. техн. наук, доцент

Панин А.Н.

	<p>Инженерно-экспертное предприятие - Акционерное общество «РАТТЕ» (АО «РАТТЕ») 195196, Санкт-Петербург, Заневский пр., дом 13, лит. А, тел/факс (812)552-60-88, e-mail: pttm@mail.ru ИИН 7825662223 КПП 780601001 ОГРН 1037816026170 web: www.ratte.ru, www.patte.ru</p>
<p>Испытательный центр подъемно-транспортного оборудования Орган по сертификации подъемно-транспортного оборудования</p>	<p>Лицензия Ростехнадзора на право проведения экспертизы промышленной безопасности технических устройств Технический комитет по стандартизации ТК 289 «Краны грузоподъемные»</p>

Исх. № 11-06/17\_ от 09.06.2017



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор АО «РАТТЕ»

/Бортяков Д.Е./

« 09 » июня 2017 г.

АКТ

об использовании результатов научных исследований  
**Абросимовой Анжелики Анатольевны**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований Абросимовой А.А., соискателя ученой степени кандидата технических наук (спец. 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины) на кафедре «Наземные транспортно-технологические машины» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), нашли применение в практике оценки технического состояния подъемно-транспортных машин и оборудования.

В работе были использованы разработанные автором:

- методика оценки и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации (МУ РД СПбГАСУ 004-16-01);
- способ определения остаточных напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов (заявки рег. №№ 2016119463, 2016119465).

В ходе работы выполнено:

- сканирование сварных соединений и элементов конструкций подъемно-транспортных машин и оборудования с целью определения и оценки степени опасности локальных зон концентрации напряжений;
- даны рекомендации по проведению постоянного и периодического мониторинга.

Использование результатов исследований автора Абросимовой А.А. направлено на повышение степени достоверности результатов обследования технического состояния, обеспечение работоспособности и повышение прочностных свойств сварных соединений в процессе оценки возможности дальнейшей длительной, надежной и безопасной эксплуатации дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин и оборудования.

Технический директор,  
Председатель технического комитета  
по стандартизации  
ТК 289 «Краны грузоподъемные»



Плотников Г.В.

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**"Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет"  
(СПбГАСУ)**

2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005. Тел: (812) 400-06-67, Факс: (812) 316-58-72. E-mail: rector@spbgasu.ru  
ИНН 7809011023 / КПП 783901001, ОКПО 02068580, ОКВЭД 80.30.1

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

**Руководитель ЭО СПбГАСУ,  
проректор по НИИД,  
д-р экон. наук, профессор**



СМИРНОВ Е. Б.

11  
\_\_\_\_\_ 2016 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**Оценка и повышение прочности сварных соединений  
металлоконструкций строительных машин  
в процессе эксплуатации**

**МУ РД СПбГАСУ 004-16-01**

СОГЛАСОВАНО:

**Научный руководитель,  
начальник лаборатории  
НИИД СПбГАСУ,  
д-р техн. наук, проф.**

ГОРДИЕНКО В.Е.

Санкт-Петербург – 2016

Методические указания РД СПбГАСУ 004-16-01 разработаны в части контроля и повышения прочности металла сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации, и опираются на разработанные ранее МУ РД СПбГАСУ 001-09-01, 002-10-01, 003-11-01.

РАЗРАБОТАНЫ: СПбГАСУ.

ИСПОЛНИТЕЛИ:

Ассистент СПбГАСУ,  
соискатель

АБРОСИМОВА А.А.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение .....	4
2	Назначение и область применения .....	5
3	Основные понятия, термины и определения .....	6
4	Физические основы пассивного феррозондового метода .....	7
5	Общие положения .....	9
6	Диагностическая аппаратура. Общие требования .....	10
7	Конструкция и принцип работы прибора .....	11
8	Подготовка к проведению обследования .....	14
9	Проведение обследования .....	15
10	Оформление результатов обследования .....	16
11	Схема обследования .....	18
12	Повышение прочности металла сварных соединений в ослабленных локальных зонах КН .....	19
13	Требования безопасности .....	22
 <i>Приложение 1. Заключение по результатам обследования сварных соединений металлоконструкций строительной машины .....</i>		 23
 <i>Приложение 2. Список использованных источников по магнитной диагностике сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с положительной константой магнитострикции .....</i>		 24

## 1. ВВЕДЕНИЕ

К одной из важнейших современных задач повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации строительных машин за пределами нормативных сроков службы относится задача обеспечения надлежащего технического состояния их сварных металлоконструкций (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 приносит и наличие сварных соединений с зонами (сварной шов, зона сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации, основной металл), 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).

Учитывая, что выявление таких локальных зон концентрации напряжений в основном металле и зонах сварных соединений представляет собой отдельную достаточно трудоемкую практическую задачу (незначительность их размеров, особенности доступа к исследуемым зонам контроля, необходимость подготовки поверхности контроля, несовершенство применяемых методов и методик), отсутствие информации о величинах фактических напряжений в этих зонах весьма снижает значимость последующих поверочных расчетов и достоверность оценки технического состояния сварных МК в целом.

Необходимо отметить, что контроль и восстановление характеристик металла в ослабленных зонах концентрации напряжений известными методами на практике не представляется возможным (существенные затраты и трудоемкость, риск снижения работоспособности конструкции в целом), а необходимость существенного снижения структурной и механической неоднородности различных зон сварных соединений и выравнивание свойств сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) со свойствами основного металла, является весьма важным

## **2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

Настоящие методические указания (МУ) РД СПбГАСУ 004-16-01 предназначены для использования при проведении работ по диагностике технического состояния, определению напряженно-деформированного состояния металлоконструкций строительных машин в рамках экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов, эксплуатируемых за пределами нормативного срока службы.

Методические указания устанавливают правила и требования к проведению пассивного феррозондового контроля металла зон сварных соединений (сварной шов, зона термического влияния, основной металл) сварных конструкций, а также выполнению работ по снижению структурной и механической неоднородности и обеспечению равнопрочности зон сварных соединений, приближению прочности металла зон сварного соединения к прочности основного металла, повышению прочности металла в выявленных ослабленных локальных зонах концентрации напряжений металлоконструкций строительных машин применением восстановительной термоциклической обработки.

Методические указания регламентируют ряд необходимых работ и мероприятий, направленных на повышение долговечности, надежности и безопасности эксплуатации строительных машин.

### 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Пассивный феррозондовый контроль* – неразрушающий контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих в зонах дефектов, зонах структурной неоднородности материала и зонах концентрации напряжений в условиях естественного намагничивания в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея).

*Магнитное поле рассеяния* – локальное магнитное поле, возникающее в зонах дефектов, зонах структурной неоднородности материала и зонах концентрации напряжений вследствие магнитной поляризации их границ и перестройки доменной структуры в магнитном поле Земли.

*Остаточное магнитное поле рассеяния* – магнитное поле, создаваемое на поверхности объекта контроля после воздействия на него приложенного магнитного поля или внешних нагрузок.

*Способ остаточной намагниченности* – способ регистрации значений магнитного параметра на поверхности объекта контроля после снятия приложенного поля или в условиях естественного намагничивания в слабом магнитном поле Земли.

*Феррозондовый преобразователь* – магнитоизмерительный ферромодуляционный преобразователь с пермаллоевыми сердечниками, предназначенный для измерения (регистрации) магнитного поля рассеяния при пассивном феррозондовом контроле.

*Контролируемый параметр* –  $H_p$  (А/м) – напряженность магнитного поля рассеяния – магнитный параметр ферромагнитного материала, определяется величиной остаточного магнитного поля рассеяния, формируемого доменной структурой материала на поверхности сварных металлических конструкций в слабом магнитном поле Земли (область Рэлея) в процессе изготовления, транспортировки, монтажа, эксплуатации и ремонта.

*Зона контроля феррозондового преобразователя* – сварные соединения и элементы сварных металлических конструкций строительных машин.

*Прибор пассивного феррозондового контроля* – прибор для измерения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$ , отражающей взаимосвязь напряженно-деформированного, структурного и магнитного состояния металла.

#### 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАССИВНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО МЕТОДА

Пассивный феррозондовый метод контроля реализует магнитомеханическое явление в ферромагнитных материалах (магнитоупругий эффект и магнитомеханический гистерезис) и применяется для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов (нарушения сплошности) металла (волосовин, трещин, раковин, закатов и пр.), дефектов сварных соединений, контроля структурных изменений в процессе деформационного и термического воздействий, выявления в узлах и элементах МК строительных машин локальных зон КН и оценки степени их опасности, а также косвенного определения в элементах конструкций и сварных соединениях действующих напряжений.

Пассивный феррозондовый контроль структурных изменений и действующих напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов основан на взаимосвязи между магнитными, структурными и механическими свойствами конструкционных сталей, когда они одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, структурного состояния, режима термической и химико-термической обработки, холодной пластической деформации, микро- и макронапряжений и пр.

В случае малоуглеродистых и низколегированных сталей эти факторы в значительной степени влияют на механические и магнитные свойства металла. Поэтому пассивный феррозондовый метод может применяться для контроля напряженно-деформированного состояния металла, степени пластической деформации, выявления опасных зон усталостных повреждений и структурных изменений (микро- и макродефекты структуры) наиболее нагруженных узлов и элементов металлоконструкций, сварных соединений, обладающих структурной и механической неоднородностью, работающих в условиях длительной эксплуатации при воздействии статических, циклических и динамических нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб).

В качестве основного контролируемого параметра выбрана величина напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  (А/м). На рис. 1 приведены типичные зависимости напряженности магнитного поля рассеяния от действующих напряжений для малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3.

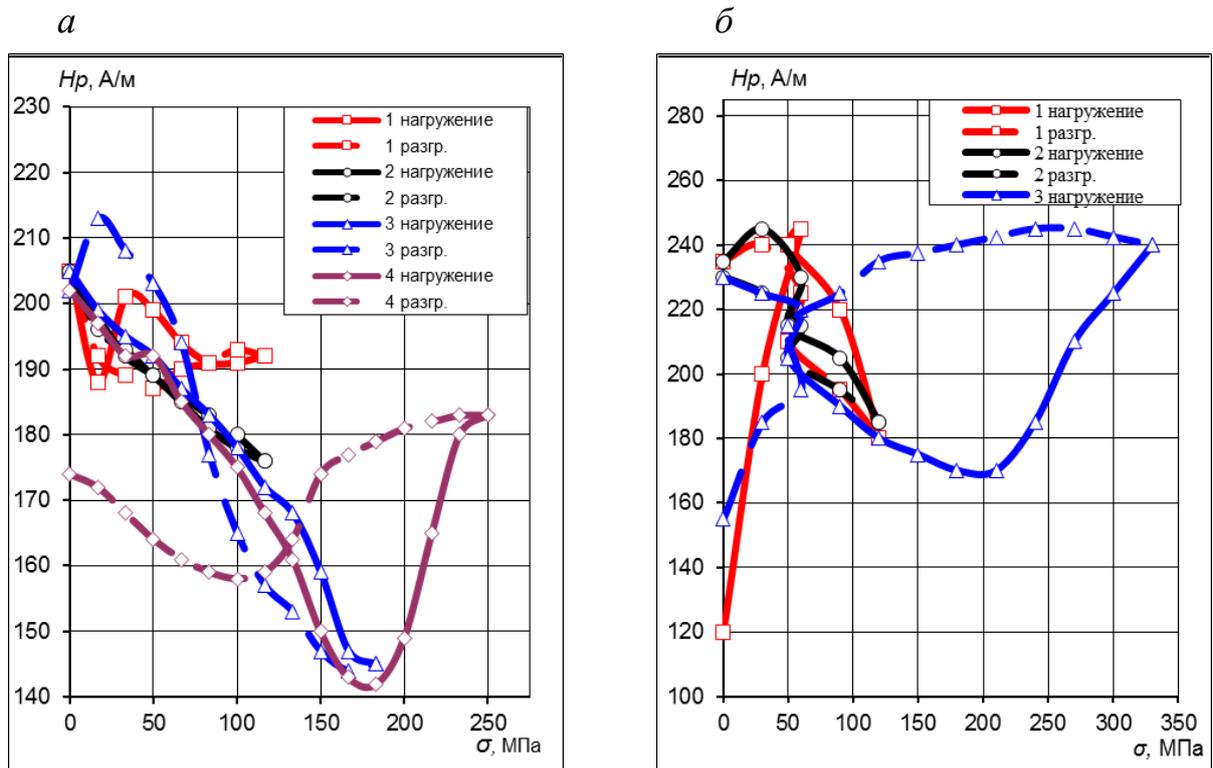


Рис. 1. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от одноосных напряжений растяжения для образцов из малоуглеродистых сталей в состоянии заводской поставки: *а* - 08пс; *б* - Ст3

## 5. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1. Пассивный феррозондовый метод диагностирования может быть использован для:

- выявления зон концентрации напряжений;
- определения уровня максимальных нагрузок, испытываемых элементами сварных несущих металлоконструкций в процессе эксплуатации;
- определения уровня действующих напряжений и упругопластических деформаций в сварных соединениях и элементах сварных несущих элементов металлоконструкций строительных машин;
- контроля механических свойств и структуры ферромагнитных сталей, применяемых при изготовлении и ремонте металлоконструкций строительных машин;

5.2. Магнитный метод применим для контроля деталей, узлов, элементов и сварных соединений металлоконструкций из ферромагнитных сталей со значениями напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от -1999 до +1999 А/м.

5.3. На точность измерения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  могут оказывать существенное влияние такие факторы, как толщина слоя краски или специального немагнитного защитного покрытия, а также магнитная и механическая предыстория металла.

5.4. Магнитный метод может быть использован для контроля металла при температуре от -20°C до +60 °C.

5.5. При работе с окрашенными поверхностями рекомендуется использовать прибор ИКНМ-2ФП при толщине слоя краски или специального немагнитного защитного покрытия до 2 мм.

## **6. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ**

6.1. Для использования пассивного феррозондового метода при контроле металлоконструкций строительных машин необходима аппаратура, позволяющая производить измерения величины остаточной намагниченности в диапазоне  $\pm 1999$  А/м (область Рэлея) с основной относительной погрешностью измерения не более 5%.

6.2. Прибор пассивного феррозондового контроля должен быть укомплектован как минимум двухканальным оттарированным феррозондовым преобразователем, позволяющим проводить измерения напряженности магнитного поля рассеяния в рабочем диапазоне температур.

6.3. Прибор должен иметь возможность его использования как в стационарных условиях производства, так и на строительных площадках, в полевых условиях, где необходимо автономное питание. При этом в соответствии с действующими Правилами Ростехнадзора при обследовании и неразрушающем контроле строительных машин разрешается использовать аппаратуру только с питанием безопасным напряжением (12В).

6.4. Кабель, соединяющий электронный блок и преобразователь, должен иметь достаточную для проведения контроля длину, быть защищен от случайного повреждения и иметь надежное крепление в разъемах.

6.5. Изображения цифр на табло должны быть видны как в темном помещении, так и в ярко освещенном месте.

6.6. Для удобства работы оператора в приборе может быть предусмотрена не только цифровая, но и звуковая индикации измеряемых данных, а также возможность их регистрации в блоке памяти (запись до 1000 измерений).

6.7. На каждый прибор пассивного феррозондового контроля должны быть оформлены:

- паспорт производителя;
- сертификат соответствия;
- техническое описание;
- инструкция по эксплуатации;
- свидетельство о поверке.

## 7. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Рекомендуемым прибором для проведения пассивного феррозондового контроля может быть прибор типа ИКНМ-2ФП, выпускаемый ООО "Энергодиагностика", Москва. Прибор малогабаритен, прост в работе и настройке, имеет автономное питание от двух аккумуляторных батарей типа АА, что позволяет проводить измерения в стационарных условиях производства, на строительных площадках, в полевых условиях, при работе на высотных сооружениях – везде, где по условиям или нет сетевого питания, или пользоваться им запрещено.

Внешний вид прибора с преобразователем приведен на рис. 2.

### 7.1. Описание прибора.

7.1.1. Прибор ИКНМ-2ФП предназначен для контроля напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей (всех видов строительных машин) в соответствии с настоящими МУ РД СПбГАСУ 004-16-01.



Рис. 2. Внешний вид прибора ИКНМ-2ФП

7.1.2. Конструктивно прибор состоит из микропроцессорного измерительного блока с аккумуляторами, аналогового двухканального феррозондового преобразователя и соединительного кабеля. Все элементы управления и настройки прибора находятся на передней панели измерительного блока. Рабочее положение прибора - в сумке на груди оператора с обращенной вверх передней панелью. Измерения проводятся в автоматическом режиме при установке датчика на поверхность в зоне контроля.

## 7.2. Технические характеристики.

Технические характеристики прибора ИКНМ-2ФП представлены в табл. 1.

Таблица 1

№	Характеристика	Показатели
1	Диапазон измерения величины $H_p$ , А/м	$\pm 1999$
2	Погрешность измерения, не более %	5
3	Время одного измерения (не более), мкс	10
4	Рабочий температурный диапазон, °С	-20...+60
5	Диапазон относительной влажности, %	45...80
6	Габаритные размеры, мм	
	прибора	120×60×25
	датчиков	5×5×30
7	Вес с аккумуляторами, кг	0,25

## 7.3. Принцип работы прибора.

7.3.1. Принцип действия прибора основан на вычислении напряженности магнитного поля рассеяния в замкнутой магнитной цепи, составленной из контролируемого изделия и магнитопровода преобразователя. Преобразователь представляет собой магнитную систему, которая замыкается контролируемым изделием.

7.3.2. Преобразование напряженности магнитного поля рассеяния в электрический сигнал осуществляется с помощью феррозонда – магниточувствительного элемента, состоящего из магнитомягкого (обычно пермаллового) сердечника цилиндрической формы, длина которого намного больше его диаметра, и катушки с индикаторными обмотками, намотанными равномерно вдоль всей длины сердечника и соединенными между собой попарно определенным образом, в результате чего напряжение на выходе индикаторных обмоток пропорционально напряженности магнитного поля рассеяния на поверхности объекта контроля.

7.3.3. Измеряемым сигналом является напряженность магнитного поля рассеяния, помехой – остальные поля (поле Земли, внешние магнитные поля вблизи объекта контроля и пр.). В окрестности точки измерения поле рассеяния является практически однородным. Влияние однородного поля Земли, когда на

позиции контроля сохраняется одна и та же ориентация, приводит к систематической погрешности измерений, которая устраняется введением поправки, равной величине магнитного поля Земли и определяемой вторым каналом преобразователя прибора, в результате измерения. Влияние постоянных внешних магнитных полей учитывается методиками контроля.

7.3.4. Цикл измерений включает этапы:

- вычисление напряженности магнитного поля рассеяния;
- индикация результата измерения.

7.4. Порядок работы с прибором.

7.4.1. При подготовке к контролю необходимо:

- во-первых, подключить двухканальный феррозондовый преобразователь к измерительному блоку;
- затем включить прибор ИКНМ-2ФП, нажав на кнопку "ВКЛ". При этом должны загореться цифровые индикаторы измерения магнитного поля рассеяния, индикатор режима работы «П» или «Г» (полемер или градиентометр, соответственно), а также индикатор состояния заряженности батарей питания;
- осуществить выдержку прибора во включенном состоянии («прогрев») в течении 15 минут;
- провести последующую калибровку прибора.

Для калибровки прибора осуществить следующие операции:

- индикатор режима работы прибора установить в положение "П" – полемер;
- нажатием кнопки "КАЛИБР перевести прибор в режим калибровки;
- выставить калибровочное магнитное поле (40А/м), сопоставимое с магнитным полем Земли, в результате чего на экране индуцируется информация "Н1 ↑";
- выставить датчик прибора зондом 1 вверх (поле "+") и нажать кнопку "ВВОД", вследствие чего на экране индуцируется информация "Н1 ↓";
- выставить датчик зондом 1 вниз (поле "-") и нажать кнопку "ВВОД".

Калибровка прибора закончена;

- при необходимости выход из режима калибровки обеспечивается нажатием кнопки "ОТМЕНА".

## **8. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ОБСЛЕДОВАНИЯ**

8.1. Анализ технической документации объекта контроля.

8.2. Проведение визуально-оптического и измерительного контроля.

8.3. Подготовка прибора к работе.

8.3.1. Настройка и калибровка прибора в соответствии с инструкцией, указанной в паспорте прибора.

8.3.2. Выбор участков для проведения магнитного контроля на обследуемой сварной металлической конструкции с учетом данных, полученных при визуально-оптическом и измерительном контроле.

## 9. ПРОВЕДЕНИЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ

9.1. Перед проведением магнитного обследования необходимо:

- ознакомиться по паспорту строительной машины с конструкцией несущих сварных металлоконструкций и марками сталей, из которых они изготовлены, обратив особое внимание на места предыдущих ремонтов;
- проверить работоспособность магнитного прибора;
- оценить толщину немагнитного защитного покрытия на поверхности металла.

9.2. Поверхность, подлежащая контролю, должна быть очищена от грязи, масла, краски, ржавчины и других загрязнений толщиной более 2 мм.

9.3. Контроль осуществляется по способу остаточной намагниченности металла.

9.4. В процессе измерения преобразователь должен все время находиться в плотном контакте и перпендикулярно металлической поверхности контролируемого объекта, без смещения его положения на этой поверхности.

9.5. При смещении преобразователя во время проведения контроля значение  $H_p$  изменяется. Такие результаты считаются незачетными и не учитываются. Изменение величины  $H_p$  может быть вызвано также качеством очистки поверхности от краски и ржавчины, местными дефектами и др., но чаще всего – смещением преобразователя во время проведения измерения.

9.6. Результаты измерений напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  заносятся в таблицу, а затем строится график распределения  $H_p$  (А/м) по площади контролируемого участка металлоконструкции с указанием мест, где значения  $H_p$  носят аномальный характер (значительно отличаются от средних значений напряженности магнитного поля рассеяния объекта контроля). Далее выявленные предполагаемые зоны концентрации напряжений контролируются дополнительно с целью определения степени их опасности, и в наиболее опасных из них определяются фактические величины действующих напряжений, которые могут использоваться при последующих прочностных расчетах.

9.7. Результаты контроля оформляются в виде заключения, подписываемого руководителем работ и оператором, осуществлявшим контроль.

## 10. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ

10.1. Отчётная документация по результатам пассивного феррозондового контроля оформляется в виде "Заключения" в соответствии Правилами и иными нормативными документами Ростехнадзора (Прил. 1).

10.2. В "Заключении", являющемся составной частью Технической документации, должны быть указаны:

- тип и марка строительной машины;
- ее заводской и регистрационный номера, год выпуска;
- марки стали, из которых изготовлены несущие элементы сварных металлоконструкций;
- режим нагружения по паспорту и фактический;
- марки и зав. № прибора пассивного феррозондового контроля и преобразователя;
- перечень объектов, подлежащих контролю.

10.3. В разделе "Результаты контроля" должны быть приведены:

- экспериментальные значения напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  (А/м) по отдельным участкам или по всей длине элементов металлоконструкций в сравнении с начальными значениями  $H_p$  (А/м), взятыми из таблицы для данной марки стали или измеренными на менее нагруженном участке металлоконструкции;
- эскизы распределения  $H_p$  по длине несущих элементов сварных металлоконструкций с указанием мест с экстремальными значениями  $H_p$ .
- результаты оценки степени опасности выявленных зон концентрации напряжений;
- результаты определения величин действующих напряжений в наиболее опасных выявленных зонах контроля.

10.4. В разделе "Выводы и рекомендации" производится оценка степени опасности выявленных локальных зон концентрации напряжений при сравнении экстремальных значений  $H_p$  с критическими значениями  $H_p$  для каждой марки стали, полученными по результатам совместных магнитомеханических испытаний образцов. После чего следует рекомендация о возможности дальнейшей эксплуатации строительной машины в соответствии с ее паспортными характеристиками.

10.5. Заключение по результатам магнитного контроля подписывают аттестованный оператор и руководитель, ответственный за оформление документации.

10.6. Инженерно-техническому работнику, ответственному по надзору за безопасной эксплуатацией строительных машин рекомендуется заносить результаты обследования магнитных свойств в паспорт строительной машины и в паспорт магнитного контроля сварной металлоконструкции строительной машины. Это позволит в дальнейшем следить за динамикой накопления повреждений и деформаций в несущих элементах и сварных соединениях металлоконструкций строительных машин, отработавших свой нормативный срок.

## 11. СХЕМА ОБСЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 представлена схема обследования сварных металлоконструкций длительно эксплуатируемых строительных машин, предусматривающая проведение контроля, выявления и оценки степени опасности зон КН, усиления (при необходимости) и мониторинга в ослабленных локальных зонах КН.

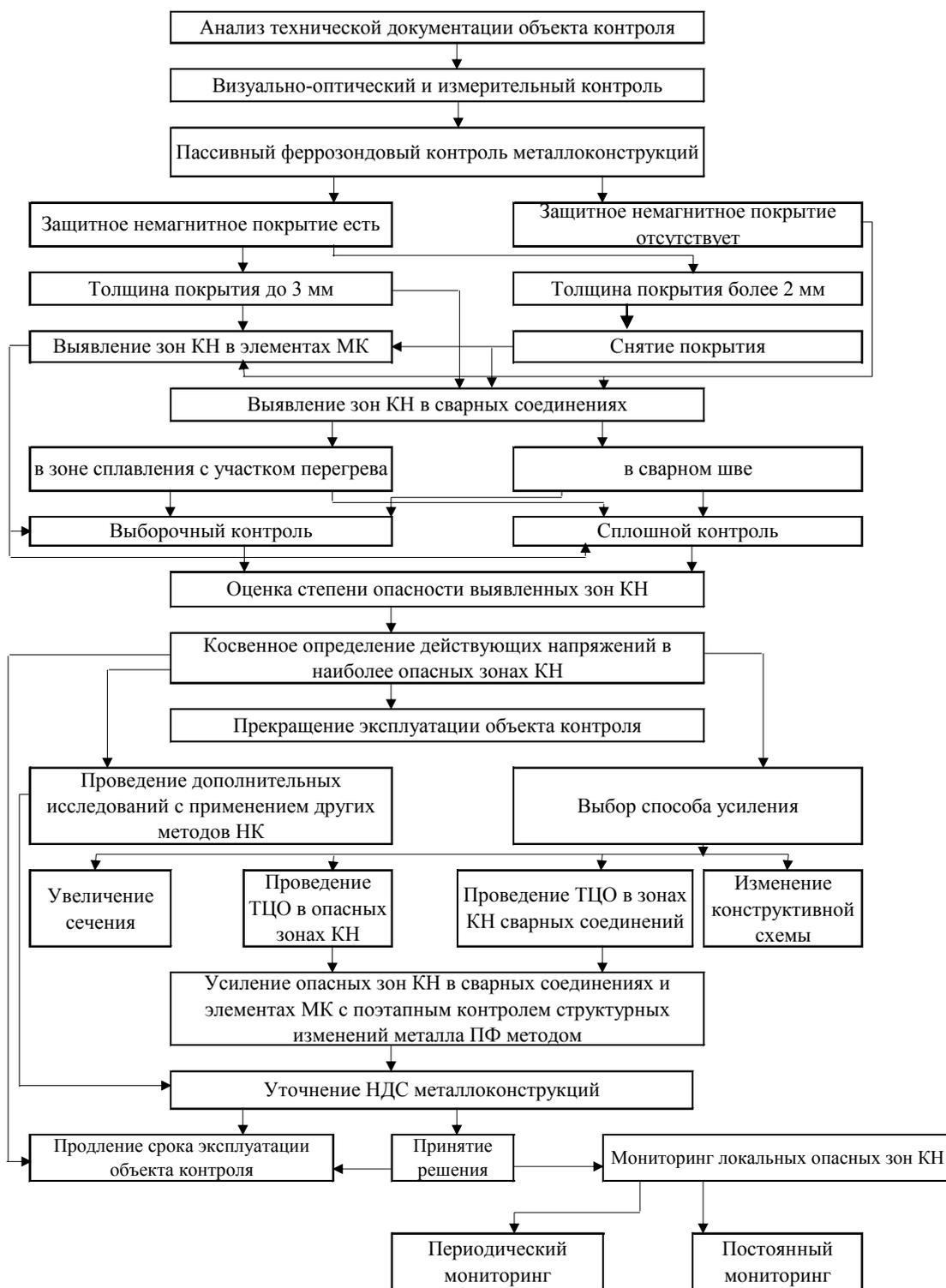


Рис. 3. Схема контроля и повышения прочности сварных МК строительных машин

## **12. ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ОСЛАБЛЕННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ КН**

12.1. Повышение прочностных свойств металла сварных металлоконструкций следует проводить по результатам магнитного контроля напряженно-деформированного состояния сварных соединений и элементов МК строительной машины в местах, отмеченных в заключении (Прил. 1).

12.2. Термоциклическую обработку опасных зон КН в сварных соединениях металлоконструкций, изготовленных из конструкционных сталей, следует осуществлять по режиму, разработанному для сталей 08пс и Ст3: 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 10-кратный нагрев сталей до температуры 770 °С с последующим охлаждением металла на воздухе после каждого цикла.

Разработанные режимы действительны для конструкционных сталей, близких к исследуемым по химическому составу и свойствам.

12.3. Термоциклическую обработку металла в опасных локальных зонах концентрации напряжений сварных соединений для повышения прочности следует проводить местным (зональным) газопламенным нагревом. В качестве горючего газа использовать ацетилен, пропан-бутан, природный газ в смеси с кислородом.

12.4. При газопламенном нагреве допускается использовать горелки различных типов: кольцевые и прямые с удельной потребляемой мощностью 252...336 кДж на 1 см<sup>2</sup> нагреваемой поверхности элемента.

12.5. Контроль температуры нагрева следует проводить бесконтактным инфракрасным пирометром AR-872-D, позволяющим измерять температуру в диапазоне -50...1050 °С, или аналогичным со схожими характеристиками.

12.6. На результаты проводимой восстановительной ТЦО могут влиять различные неблагоприятные факторы, поэтому при ее проведении в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений необходимо:

- проводить термоциклическую восстановительную обработку при положительной температуре окружающей среды, в отсутствие сквозняка и ветра, с обеспечением защиты зоны нагрева от попадания воды, жиров, грязи и пр. с обеспечением необходимой равномерности прогрева локальной зоны концентрации напряжений;

- предварительно освобождать нагреваемые части элементов конструкций от действия внешних изгибающих и растягивающих нагрузок статического, циклического и ударного характера с обеспечением свободного перемещения от температурных расширений в нужном направлении;
- проводить (при необходимости) предварительную разгрузку элементов сварных металлоконструкций строительных машин перед их усилением;
- обеспечить электро- и пожаробезопасность проводимых работ.

12.7. Оптимальным режимом термоциклической обработки мест усиления ослабленных локальных зон концентрации напряжений металла является трехкратный нагрев металла до температуры 770 °С с последующим охлаждением на воздухе.

12.8. По окончании восстановительной ТЦО требуется провести оценку действующих напряжений в усиленной зоне концентрации напряжений согласно п.п. 9.4–9.7.

12.9. В случае недостаточности трехкратного нагрева (по данным пассивного феррозондового контроля) для достижения необходимых результатов число циклов требуется увеличить.

Прочностные свойства конструкционных сталей 08пс и Ст3 в состоянии заводской поставки и последующей 1–10-кратной ТЦО представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Марка стали	Механические свойства	Число циклов ТЦО							
		0	1	2	3	4	5	7	10
08пс	$\sigma_T$ , Мпа	168	175	182	189	191	193	194	195
	$\sigma_B$ , Мпа	284	296	303	310	316	320	323	324
	$\delta$ , %	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

Из табл. 2 и 3 видно, что увеличение числа циклов способствует одновременному повышению как предела текучести сталей, так и предела прочности. Так, предел текучести после проведения ТЦО повышается на 12...15 %, а предел прочности – на 13...14 % соответственно, что необходимо учитывать

при термоциклическом усилении металла сварных конструкций в ослабленных локальных зонах КН сварных соединений и элементов МК строительных машин.

Таблица 3

Марка стали	Зоны сварного соединения	Механические свойства, МПа	Число циклов ТЦО				
			0	3	5	7	10
Ст3	Основной металл	$\sigma_T$	251	275	282	283	284
		$\sigma_B$	436	487	494	496	503
	Участок перегрева	$\sigma_T$	242	253	265	272	282
		$\sigma_B$	422	445	462	478	490
	Сварной шов	$\sigma_T$	235	250	262	270	277
		$\sigma_B$	405	428	448	464	473

### **13. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ**

13.1. В соответствии с требованиями Ростехнадзора специалисты, осуществляющие обследование и техническое диагностирование металлоконструкций строительных машин, а также, в случае необходимости, усиление элементов металлоконструкций в ослабленных локальных зонах концентрации напряжений, должны пройти инструктаж и проверку знаний соответствующих правил безопасности при проведении работ.

13.2. К проведению магнитного контроля допускаются специалисты, прошедшие обучение в качестве дефектоскопистов по неразрушающему магнитному контролю по программе НАК и аттестованные на 1–3 уровень в соответствии с ПБ 03-440-02 "Правила аттестации специалистов неразрушающего контроля".

13.3. При проведении магнитного контроля приборами с преобразователями, питающимися от сети 220 В промышленной частоты, необходимо соблюдать правила эксплуатации электроустановок и требования техники безопасности, утвержденные Росэнергонадзором.

13.4. В случае выполнения работ на высоте или во вредных условиях специалисты должны пройти, наряду с общим, дополнительный инструктаж по ТБ согласно положению, действующему на предприятии.

13.5. В производственных помещениях с повышенной концентрацией пыли, паров бензина и т.д. рекомендуется использовать приборы пассивного феррозондового контроля с автономным питанием до 12 В.

13.6. Запрещается работа операторов на неустойчивых конструкциях и в местах, где возможно повреждение проводки электропитания приборов.

**Заключение по результатам обследования сварных соединений  
металлоконструкций строительной машины**

Тип машины \_\_\_\_\_ Марка машины \_\_\_\_\_  
 Зав. № \_\_\_\_\_ рег. № \_\_\_\_\_ Год выпуска \_\_\_\_\_ г.  
 Материал металлоконструкции \_\_\_\_\_  
 марка стали \_\_\_\_\_  
 Режим нагружения  
 по ИСО 4301 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ паспортный \_\_\_\_\_ фактический

Обследование проводилось в соответствии с МУ РД СПбГАСУ 004-16-01 «Контроль и повышение прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации».

Прибор пассивного феррозондового контроля \_\_\_\_\_  
 марка, зав. № \_\_\_\_\_

Преобразователь \_\_\_\_\_  
 тип, зав. № \_\_\_\_\_

Магнитный контроль металла сварных соединений проводился с целью выявления и оценки степени опасности локальных зон концентрации напряжений, возникших в процессе эксплуатации, определения в них действующих напряжений, а также необходимости усиления ослабленных зон и их постоянного (периодического) мониторинга при установлении возможности дальнейшей эксплуатации строительной машины в соответствии с ее паспортными характеристиками.

Контролю подлежали объекты: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Результаты контроля:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Выводы и рекомендации \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

(Сравнить результаты с данными известных марок сталей с учетом химсостава и структурного состояния)

(Дать рекомендации о необходимости усиления и проведения мониторинга при установлении возможности дальнейшей эксплуатации строительной машины в соответствии с ее паспортными характеристиками)

Оператор-дефектоскопист \_\_\_\_\_  
 подпись \_\_\_\_\_ Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Удостоверение № \_\_\_\_\_, выдано \_\_\_\_\_.

Ответственный за оформление документации: \_\_\_\_\_  
 подпись \_\_\_\_\_ Ф.И.О. \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_ (число, месяц, год)

**Список использованных источников по магнитной диагностике сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с положительной константой магнитострикции**

1. 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.
2. 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.
3. Гордиенко, В.Е. Пассивный феррозондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК [Текст] / В.Е. Гордиенко – СПб.: [СПбГАСУ], 2010. – 83 с.
4. Гордиенко, В.Е. Техническое диагностирование сварных металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин: монография / В. Е. Гордиенко, А. А. Березина; СПбГАСУ, 2015. – 244 с.
5. Гордиенко В.Е. 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.
6. Горкунов, Э.С. Влияние структуры сталей на процессы перемагничивания в слабых и сильных магнитных полях и решение задач магнитной структуроскопии изделий из этих сталей [Текст] / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, С.С. Родионова // Дефектоскопия. – 1998. – №6. – С. 42–59.
7. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения [Текст] / С. Тикадзуми. – М.: [Мир], 1987. – 420 с.
8. Михеев, М.И. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля [Текст] / М.И. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: [Наука], 1993. – 656 с.

# РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ МУ РД СПбГАСУ 004-16-01

Оценка экономической эффективности применения разработанной методики контроля и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин МУ РД СПбГАСУ 004-16-01 [1] проведена при расчете затрат на диагностирование и ремонт стрелы башенного крана КБ-408 (рис. 1).



Рис. 1. Башенный кран КБ-408

## 1. Сущность работы

Учитывая широкое применение башенных кранов типа КБ-408 при строительстве зданий и сооружений, на погрузочно-разгрузочных площадках, складах, базах и других промышленных объектах, а также статистику возникновения отказов и аварий их узлов и механизмов (наибольшее число отказов происходит при работе механизмов подъема груза и стрелы, передвижения и поворота, так как эти механизмы подвергаются вибрационным,

ударным и иным нагрузкам), была проведена оценка основных экономических потерь предприятия при повреждении стрелы крана, как одной из наиболее дорогостоящей составляющей его стоимости.

Сравнительный анализ экономической эффективности проведен при сравнении экономических затрат на проведение технологических операциях замены и ремонта стрелы, при этом в качестве альтернативы полной замены стрелы рассмотрено проведение ремонта с использованием элементов разработанной методики МУ РД СПбГАСУ 004-16-01, в целом включающей этапы выявления и оценки степени опасности локальных зон концентрации напряжений, возникших в процессе эксплуатации, определения в них действующих напряжений, а также усиления металла в ослабленных зонах с последующим постоянным (периодическим) мониторингом (при установлении возможности дальнейшей эксплуатации строительной машины в соответствии с ее паспортными характеристиками).

Применение разработанной методики позволяет регламентировать ряд необходимых работ и мероприятий, направленных на повышение долговечности, надежности и безопасности эксплуатации сварных конструкций строительных машин за пределами их нормативных сроков службы.

## **2. База для сравнения**

В качестве базы для сравнения рассмотренных вариантов (полная замена, частичный ремонт) по восстановлению работоспособности стрелы крана предусмотрен ряд основных операций, влияющих на экономическую целесообразность и эффективность проводимых мероприятий (табл. 1).

При этом в случае частичного ремонта при контроле качества сварных соединений с применением пассивного феррозондового метода не требуется удаления немагнитного защитного покрытия толщиной до 2 мм и специальной предварительной подготовки основного металла и зон сварного соединения (сварной шов, зона термического влияния), что значительно повышает эффективность контроля; контроль проводится путем перемещения феррозондового преобразователя вдоль зоны сплавления основного металла со сварным швом и по поверхности сварного шва.

Далее выявленные и отмеченные предполагаемые зоны концентрации напряжений контролируются повторно в условиях циклического нагружения (разгружения) конструкции (элемента конструкции), а степень опасности выявленных зон оценивается по характеру и величине прираще- ния (по модулю) напряженности магнитного поля рассеяния. С учетом разработанных рекомендаций в выявленных ослабленных зонах определя- ются величины действующих напряжений, используемые в прочностных расчетах.

Таблица 1

<p style="text-align: center;"><b>ЗАМЕНА</b> стрелы башенного крана КБ-408</p>	<p style="text-align: center;"><b>РЕМОНТ</b> стрелы башенного крана КБ-408 (на месте)</p>
<p><u>Демонтаж:</u></p> <p>Вывоз: (длинномер; сопровождение ГАИ)</p> <p>Утилизация (металлолом) стрелы</p> <p>Доставка:</p>	<p><u>Демонтаж:</u></p> <p>Ремонт:</p> <p>- подготовительные работы: зачистка обследуемой поверхности; закрепление стрелы (в случае необходи- мости); правка конструкции стрелы;</p> <p>- ремонтные работы: ТЦО (газовая горелка, пирометр)</p> <p>- восстановительные работы: зачистка поверхности; грунтование; покраска</p>
<p><u>Монтаж:</u></p>	<p><u>Монтаж:</u></p>
<p><u>Простой:</u></p>	<p><u>Простой:</u></p>

После выявления ослабленных зон сварных соединений, в случае

необходимости, выполняются работы по снижению структурной и механической неоднородности и обеспечению равнопрочности зон сварных соединений, приближении прочности металла зон сварного соединения к прочности основного металла, повышении прочности металла в ослабленных зонах путем применения восстановительной термоциклической обработки по разработанным оптимальным режимам.

### 3. Сводные данные для расчета

3.1. При выявлении в процессе обследования стрелы крана повреждений, способствующих предстоящей потере несущей способности, принято решение о производстве замены стрелы.

Стоимость стрелы башенного крана КБ-408 без подвешного оборудования составляет, в ценах 2016 года, примерно 2 000 000,00 руб. Кроме этого, в процессе замены стрелы башенного крана необходимо выполнение следующих операций: демонтаж стрелы крана, вывоз в сопровождении ГИБДД, утилизация (сдача стрелы на металлолом), доставка и монтаж новой стрелы.

Согласно различным источникам, стоимость перебазировки, монтажа и демонтажа башенного крана КБ-408 с учетом НДС 18 % составляет около 500 000,0 руб. Сдача (продажа) стрелы на металлолом приносит прибыль в размере 32 000,0 (масса стрелы около 4 т = 4000 кг, стоимость 1 кг металла 8 руб.) руб.

Трудоемкость операций по замене стрелы крана (без учета простоя техники) составляет около 20 нормо-часов. Простой техники с учетом времени на заказ и доставку новой стрелы составляет как минимум около 30 дней, что обходится еще в 300 000,0 руб. (средняя стоимость аренды башенного крана КБ-408 в месяц).

Стоимость ремонтных работ ( $C_{рем}$ ) рассчитывается по формуле:

$$C_{рем} = C_{раб} + C_{м} + C_{зч}, \quad (1)$$

где  $C_{рем}$  – величина затрат на ремонт, руб.;  $C_{раб}$  – стоимость трудовых затрат и накладных расходов, руб.;  $C_{м}$  – стоимость материалов, руб.;  $C_{зч}$  – стоимость запасных частей, руб.

3.2. В противовес необходимости замены стрелы расчет стоимости ее ремонта производится с учетом мероприятий, изложенных в разработанной методике МУ РД СПбГАСУ 004-16-01, изложен ниже. Поскольку практическое использование методики в данной области в настоящий момент является новым и не регламентируется нормативно-техническими актами и иными документами, расчет стоимости ремонта производится с учетом фактических временных затрат на диагностирование, усиление (ремонт) и восстановление покрытия.

Стоимость трудовых затрат и накладных расходов ремонтных работ по устранению повреждений и дефектов (Сраб) определяется по формуле (2) на основании:

- установленных предприятием-изготовителем строительной машины нормативов трудоемкостей (если на какие-либо виды работ нормативы не установлены, то допускается использование норм времени, определенных экспертным путем);

- рыночной стоимости нормо-часа работ в данном регионе на дату оценки с учетом типа, модели и возраста строительной машины. Для Северо-Западного региона на настоящий момент (2016 г.) она составляет, в среднем, 2 500,00 руб.

$$\text{Сраб} = \text{Траб} \times \text{Снч}, \quad (2)$$

где Траб – трудоемкость работ, нормо-часов; Снч – рыночная стоимость нормо-часа, руб.

На первом этапе, так же, как и при замене стрелы крана, требуется провести ее демонтаж. Трудоемкость составляет около 20 нормо-часов. Стоимость работ по демонтажу в целом составляет 200 000,0 руб. (20 н/ч \* 2500 руб. \* 4 чел.).

На втором этапе, согласно разработанному алгоритму, осуществляется анализ технической документации – на данную операцию определена трудоемкость в 12 нормо-часов. Далее на стреле башенного крана КБ-408 проводится сплошной пассивный феррозондовый экспресс-контроль с целью выявления локальных зон концентрации напряжений. Трудоемкость экспресс-сканирования стрелы с последующим анализом полученных ре-

зультатов составляет около 12 нормо-часов (при общей протяженности всех элементов стрелы около 450 пог. м).

Расчет затрат на работы по усилению металлоконструкции ведется, исходя из необходимости детального обследования 5-ти секций стрелы крана (поврежденная секция и по 2 слева и справа), каждая из которых состоит из 12 элементов (рис. 2). В нашем случае тщательному обследованию подлежат 60 элементов стрелы крана. Трудоемкость детального обследования одного элемента с помощью магнитного метода с последующей обработкой результатов составляет около 1,5 нормо-часов, таким образом, общая трудоемкость обследования будет равняться 90,0 нормо-часам.

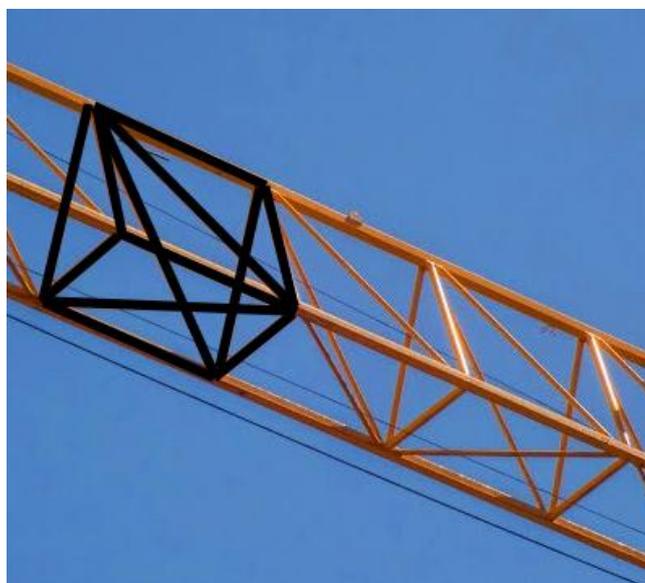


Рис. 2. Элементы секций стрелы башенного крана

Учитывая, что для осуществления правки изогнутых элементов стрелы и последующего усиления в ослабленных зонах проведением термодинамической обработки по разработанным и оптимальным для данной марки стали режимам элементов 3-ех центральных секций, необходимо предварительное проведение очистки указанных элементов (сварной шов, околошовная зона, основной металл) от ржавчины, грязи, краски и пр. Трудоемкость работ по подготовке поверхности контроля к проведению правки с последующей ТЦО составляет около 16 нормо-часов.

При восстановлении работоспособности каждый цикл усиления

представляет собой совокупность последовательно проводимых нагрева и охлаждения и характеризуется трудоемкостью в 1,5 нормо-часа. В среднем, количество циклов для повышения прочности металла до нормативного уровня равно пяти, значит, общая трудоемкость усиления одного узла составит 7,5 нормо-часа, что в пересчете на количество узлов составит 270 нормо-часов.

Третий, заключительный, этап усиления представляет собой восстановление поверхностного слоя и включает повторную зачистку поверхности усиленных зон от окалины, грунтовку, покрытие немагнитным защитным лакокрасочным покрытием, при этом трудоемкость завершающих работ составляет около 16 нормо-часов.

Следующим этапом является непосредственно монтаж стрелы трудоемкостью в 20 нормо-часов. Как и при замене стрелы крана, его стоимость составляет 200 000, 0 руб.

Общая трудоемкость работ по усилению определяется по формуле:

$$T_{\text{раб усил}} = T_{\text{обсл}} + T_{\text{усил}}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{обсл}}$  – трудоемкость работ по обследованию дефектного узла, нормо-час;  $T_{\text{усил}}$  – трудоемкость работ по усилению узла стрелы, нормо-час.

Стоимость нормо-часа для обследования и усиления принимается на уровне аналогичных затрат как, например, для ультразвукового метода контроля, то есть 4 000,0 руб.

При проведении всех мероприятий по ремонту стрелы предусматривается, что часть оборудования для проведения усиления берется в аренду, в частности, газопламенное оборудование (баллон с горючей смесью и газовая горелка). Аренда указанных приборов составляет порядка 600,0 руб. в сутки. Период, на который данное оборудование берется в аренду, рассчитывается из сопоставления трудоемкости на усиление с распорядком рабочего дня (посменная работа – двенадцати часовой рабочий день). Прибор для бесконтактного измерения температуры объекта – пирометр – выкупается в собственность в связи с малозначительностью затрат (средняя рыночная стоимость прибора составляет 8 000,0 руб.).

Таким образом, в качестве интегрального показателя, участвующего в расчете, отражающего в долях все совокупные затраты и отчисления, вы-

ступает общая стоимость производства всех видов работ, как по замене стрелы, так и по ее ремонту (усилению).

#### 4. Расчет экономической эффективности

4.1. Стоимость замены стрелы башенного крана КБ-408 составляет:

$$\underline{\text{Срем зам}} = 500\,000,0 + 300\,000,0 - 32\,000,0 + 2\,000\,000,0 = \\ \underline{\underline{2\,768\,000,0}} \text{ руб.}$$

4.2. Трудоемкость работ по усилению составляет:

$$\text{Траб усил} = 20 + 12 + 12 + 90 + 16 + 270 + 16 + 20 = 456 \text{ нормо-часа}$$

Для проведения работ по усилению металла стрелы крана в наиболее сжатые сроки (с целью уменьшить время простоя крана) необходимо 4 специалиста по термической обработке. Следовательно, для усиления элементов крана потребуется 67,5 нормо-часов, или около 6 дней.

Стоимость работ по усилению составляет:

$$\text{Сраб усил} = 456 \times 4\,000,0 = 1\,824\,000,0 \text{ руб.}$$

Стоимость материалов для производства работ по усилению:

$$\text{См усил} = (600,0 \times 6 \text{ дней}) * 4 \text{ чел.} + 8\,000,0 = 22\,400,0 \text{ руб.}$$

На все ремонтно-восстановительные работы планируется 20 дней, (простой техники составляет 20 дней), что обходится еще в 200 000,0 руб. (10 000,0 руб /день).

Общая стоимость ремонтно-технологических операций по усилению стрелы башенного крана составляет:

$$\underline{\text{Срем усил}} = 200\,000,0 + 200\,000,0 + 1\,824\,000,0 + 22\,400,0 + 200\,000,0 = \\ \underline{\underline{2\,446\,400,0}} \text{ руб.}$$

4.3. Таким образом, экономический эффект в случае ремонта (усиления) стрелы башенного крана КБ-408 как альтернативы ее замены составляет представляет собой разность совокупных затрат на замену и ремонт стрелы:

$$\text{ЭЭф} = 2\,768\,000,0 - 2\,446\,400,0 = \underline{\underline{321\,600,0}} \text{ руб.}$$

#### Литература:

1. МУ РД СПбГАСУ 004-16-01 «Контроль и повышение прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин в процессе длительной эксплуатации». – СПб.: СПбГАСУ, 2016. – 20 с.