

*На правах рукописи*

**КУЗЬМИН ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ И ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ  
СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет” (СПбГАСУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**ГОРДИЕНКО Валерий Евгеньевич**,  
ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет” (СПбГАСУ)

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**ВОЛКОВ Сергей Александрович**,  
ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет” (СПбГАСУ);

кандидат технических наук, доцент  
**БОРТЯКОВ Данил Евгеньевич**,  
ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский  
государственный политехнический  
университет” (СПбГПУ)

**Ведущая организация:** ФГОУ ВПО “Петербургский государ-  
ственный университет путей сообщения”  
(ПГУПС)

Защита состоится 05 апреля 2011 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет” (СПбГАСУ) по адресу: 190103, Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, ауд. 340-К.

Тел.: (812) 316–58–73. Факс: (812) 316–58–72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет” (СПбГАСУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет” (СПбГАСУ).

Автореферат разослан 04 марта 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.223.02  
доктор технических наук, доцент



С. В. Репин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и направленность исследований.** Проблема повышения надежности и безопасности эксплуатации строительных машин (СМ) с каждым годом становится все более актуальной, так как их старение в значительной степени опережает темпы технического перевооружения. При этом одной из наиболее важных задач, способствующих решению указанной проблемы, является задача по поддержанию несущей способности металлоконструкций (МК) строительных машин, то есть их способности выдерживать заданную нагрузку, обеспечивая нормальную эксплуатацию без потери функциональных качеств. Решение этой задачи при эксплуатации техники по техническому состоянию возможно путем оценки фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих МК при проведении их технического диагностирования, предписываемого нормативно-технической документацией Ростехнадзора (РД 10-112-97) и Госстроя России (СП 12-105-2003).

Оценка фактического НДС МК строительных машин представляет значительные трудности, так как требует учета большого количества факторов, меняющихся в процессе эксплуатации: интенсивности эксплуатации, тепловых и механических нагрузок; конструктивных и технологических концентраторов напряжений; остаточных напряжений; накопленных дефектов (вследствие прохождения процессов усталости, коррозии, пластической деформации); структурных изменений металла (вследствие старения, еформационно-термических воздействий, применения сварочных технологий). Так, например, наличие сварных соединений дает до 80 % отказов сварных МК, хотя объем зоны сварных соединений в МК не превышает 1,0...1,5 % от общего объема.

Следует подчеркнуть, что к основным источникам разрушений МК следует отнести локальные зоны концентрации напряжений (КН), в которых процессы усталости, коррозии и накопления микрповреждений развиваются наиболее интенсивно. Выявление таких зон с применением известных методов и методик практически не представляется возможным вследствие их существенных ограничений: невозможность исследований труднодоступных мест, замкнутых контуров и сварных узлов, необходимость тщательной подготовки поверхности, намагничивания–размагничивания и пр. При этом именно в этих зонах необходимо знать фактические величины действующих напряжений, так как они определяют несущую способность МК строительных машин в целом. Незнание величин действующих напряжений в опасных зонах КН значительно снижает ценность проводимых прочностных расчетов, что фактически приводит к недооценке несущей способности МК.

Кроме того, не менее ответственной задачей является повышение (восстановление до нормативного уровня) несущей способности сварных МК за счет усиления их элементов в выявленных опасных локальных зонах КН, в которых действующие напряжения превышают допустимые, или зоны концентрации напряжений, в которых прошла или проходит пластическая деформация на ту или иную степень. Характерной особенностью таких зон является

то, что они малы по сравнению с размерами элементов конструкций, поэтому усиление металла в локальных зонах КН по известным методикам, например, увеличением площади сечения (увеличением катета и длины сварного шва, приваркой дополнительных накладок и пр.); установкой элементов, перекрывающих местные дефекты; установкой дополнительных связей, подкосов, ребер жесткости и пр.; приклейкой элементов внешнего армирования и пр., может не только повысить затраты и трудоемкость, но и снизить надежность и эксплуатационную безопасность конструкции в целом.

К востребованным путям решения перечисленных задач сегодня относится разработка таких методик контроля и повышения несущей способности сварных МК эксплуатируемых строительных машин, которые бы учитывали структурное состояние и химический состав металла конструкций, позволяли выявлять и оценивать степень опасности зон КН, определять в них фактические величины действующих напряжений и проводить усиление элементов МК в опасных локальных зонах концентрации напряжений.

В связи с вышеизложенным, задача повышения надежности и безопасности эксплуатации строительных машин путем разработки рациональных методик контроля и повышения несущей способности их сварных металлоконструкций представляет собой весьма актуальную научно-практическую задачу.

**Целью диссертационной работы** является разработка методики контроля и повышения несущей способности сварных металлоконструкций строительных машин в процессе их эксплуатации на основе совершенствования и разработки методов и методик оценки структурного и напряженно-деформированного состояния металла.

**Объект исследования** – методики контроля структурного и напряженно-деформированного состояния несущих МК строительных машин.

**Предмет исследования** – элементы несущих сварных конструкций строительных машин.

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

1. Определить возможность оценки структурного и напряженно-деформированного состояния сварных несущих металлоконструкций строительных машин на основе теоретических и экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи структурных, механических и магнитных параметров конструкционных сталей.

2. Разработать методику получения в малоуглеродистых и низколегированных сталях структур металла с разной степенью дисперсности, характерных для элементов металлоконструкций и сварных соединений, обладающих структурной неоднородностью, и мелкозернистых структур металла, обладающих повышенными прочностными свойствами без ухудшения пластичности, а также методику поэтапного неразрушающего магнитного контроля структурных изменений металла.

3. Разработать методику оценки влияния степени пластической деформации на структуру и свойства металла элементов сварных металлоконструкций

эксплуатируемых строительных машин в локальных зонах концентрации напряжений.

4. Разработать методику оценки напряженно-деформированного состояния металла в выявленных опасных зонах концентрации напряжений элементов металлоконструкций в условиях циклического упруго-пластического деформирования, характерного для режимов эксплуатации металлоконструкций строительных машин.

5. Разработать методику контроля и повышения несущей способности МК строительных машин в процессе эксплуатации, включающую оценку напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций и усиление металла в опасных зонах концентрации напряжений за счет формирования мелкозернистой структуры, обладающей повышенными прочностными свойствами без ухудшения пластичности, в процессе контролируемой восстановительной термоциклической обработки металла.

**Методы исследования.** Задачи диссертационных исследований решены на основе применения апробированных и корректных разрушающих и неразрушающих методов: механических испытаний, металлографического анализа, термической обработки, пассивного феррозондового контроля сталей, а также численных методов расчета, прикладной статистики и интерпретации статистических данных. При оценке работы металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин использовались экспериментальные данные, полученные на лабораторных образцах из конструкционных сталей: малоуглеродистых 08пс, Ст3 и низколегированной 10ХСНД.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в том, что:

1. Разработана методика получения в конструкционных сталях структур с заданной степенью дисперсности, в том числе мелкозернистых (обладающих повышенными прочностными свойствами), за счет проведения направленной термоциклической обработки с поэтапным неразрушающим контролем структурных изменений. Разработанная методика предназначена для повышения несущей способности элементов МК строительных машин в выявленных опасных локальных зонах КН.

2. Разработана методика оценки влияния степени пластической деформации конструкционных сталей на напряженность магнитного поля рассеяния и структурные изменения металла, что позволяет повысить достоверность результатов диагностирования элементов сварных несущих металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин, особенно в зонах, претерпевших пластическую деформацию на ту или иную степень.

3. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния металла конструкционных сталей с различным химическим составом и структурным состоянием в процессе циклического ступенчатого упруго-пластического деформирования, что позволяет на основании установленной взаимосвязи между действующими напряжениями, структурой и магнитным параметром  $H_p$  косвенно определять величину напряжений в элементах МК строительных машин и использовать эти данные при прочностных расчетах.

4. Разработаны аналитические квадратичные зависимости  $\sigma(H_p)$  и частные и обобщенные графические регрессионные зависимости безразмерных параметров  $H_p/H_{p0}$  и  $\sigma/\sigma_m$ , позволяющие интенсифицировать процесс и повысить достоверность практического определения действующих напряжений в элементах сварных несущих МК эксплуатируемых строительных машин.

5. Разработана методика контроля и повышения несущей способности МК строительных машин в процессе эксплуатации, предусматривающая выявление опасных локальных зон КН и формирование в них оптимальной мелкозернистой структуры металла путем направленной термоциклической обработки, с поэтапным неразрушающим магнитным контролем структурных изменений металла и действующих напряжений.

**Степень обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается: корректностью поставленных задач; выбором наиболее распространенных промышленных марок сталей различных классов прочности; применением оборудования, приборов и инструментов, прошедших метрологическую поверку и калибровку; использованием апробированных методик исследований; достоверностью, представительностью и сравнительным анализом исходных, расчетных и экспериментальных данных, учетом основных положений расчета напряженно-деформированного состояния металлоконструкций.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная методика получения структур с заданным размером зерен, в том числе мелкозернистых (обладающих повышенными прочностными свойствами), включающая проведение термоциклической обработки, и разработанная методика поэтапного контроля структурных изменений в металле по остаточной намагниченности в области Рэлея, позволяющие провести усиление и контроль элементов МК строительных машин в опасных локальных зонах КН.

2. Разработанная методика оценки влияния степени холодной пластической деформации на магнитные свойства конструкционных сталей, позволяющая повысить достоверность результатов оценки НДС металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин, особенно в зонах КН, претерпевших пластическую деформацию на разную степень.

3. Разработанная методика косвенного определения действующих напряжений в элементах МК, используемая при оценке НДС металла, основанная на взаимосвязи действующих напряжений, структурного состояния и напряженности магнитного поля рассеяния, установленной при экспериментальном исследовании сталей 08пс, Ст3 и 10ХСНД в процессе циклического ступенчатого упруго-пластического деформирования с учетом структурного состояния и химического состава сталей.

4. Разработанные аналитические квадратичные зависимости  $\sigma(H_p)$  и частные (для конкретных структурных состояний металла) и обобщенные (отражающие совокупность структурных состояний металла) графические регрессионные зависимости безразмерных параметров  $H_p/H_{p0}$  и  $\sigma/\sigma_m$ .

5. Разработанная методика контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации, основан-

ная на комплексном применении различных методов и методик разрушающего и неразрушающего контроля, позволяющая повысить надежность и эксплуатационную безопасность сварных несущих МК строительных машин.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке и апробации:

1. Методики получения в малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталях мелкозернистой структуры, повышающей прочностные свойства металла на 13...17 %, за счет проведения термоциклической обработки (ТЦО) и методика поэтапного контроля структурных изменений в металле пассивным феррозондовым методом, обладающим высокой структурной чувствительностью и производительностью контроля, что позволяет рекомендовать их применение при усилении элементов сварных конструкций в опасных локальных зонах КН с целью повышения их несущей способности, а также при контроле формирования структуры металла в процессе термической обработки сталей в промышленных условиях.

2. Методики определения используемых в прочностных расчетах напряжений, действующих в опасных локальных зонах КН элементов сварных несущих МК строительных машин и сварных соединениях, обладающих структурной неоднородностью, по характеру изменения и величине приращения магнитного параметра при техническом диагностировании металлоконструкций в процессе их нагружения-разгружения.

3. Аналитических квадратичных зависимостей  $\sigma(H_p)$ , а также частных и обобщенных графических регрессионных зависимостей безразмерных параметров  $H_p/H_{p0}$  и  $\sigma/\sigma_m$ , позволяющих интенсифицировать процесс практического определения действующих напряжений в элементах МК строительных машин. При этом использование частных (при условии известных структурных и механических параметров металла) и обобщенных (при проведении экспресс-диагностирования) регрессионных зависимостей позволяет определять напряжения с погрешностью 10...12 и 15...25 % соответственно.

4. Методики контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации, включающей в себя определение действующих напряжений в опасных зонах КН, используемых в прочностных расчетах, и повышении несущей способности элементов МК до нормативного уровня за счет формирования в опасных локальных зонах КН мелкозернистой структуры с более высокими прочностными свойствами, что позволяет повысить надежность и безопасность эксплуатации сварных несущих МК строительных машин, а также эффективность и производительность диагностирования технического состояния на 15...20 %.

5. Научных положений, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, в промышленных условиях при оценке технического состояния металлоконструкций автоподъемника АП-18-04 на базе шасси ГАЗ-3307 автопарка ЗАО "ТРЕСТ СЕВЗАПСПЕЦСТРОЙМОНТАЖ" (СПб.), несущих рам бортовых тягачей на базе полноприводного шасси КамАЗ-43118-013-10 на станции диагностики ЗАО "ЕвроТрансКонтроль" (СПб.) и в учебном процессе ГОУ ВПО СПбГАСУ.

**Апробация работы.** Основные научные положения, выводы и рекомендации по материалам диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах: на семинаре “Сварочные технологии”, посвященному 160-летию Котлонадзора России (СПб., 2003); на IV Всероссийском с международным участием научно-практическом семинаре “В мире неразрушающего контроля и диагностики материалов, промышленных изделий и окружающей среды” (СПб., 2003); на 56-й, 62-й и 63-й международных научно-технических конференциях молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов “Актуальные проблемы современного строительства” (СПб., 2003, 2009, 2010); на постоянно действующем межвузовском научно-практическом семинаре “Современные направления технологии, организации и экономики строительства” ГОУ ВПО СПбВИТУ (СПб., 2010); на 61-й, 67-й и 68-й научных конференциях профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов ГОУ ВПО СПбГАСУ (СПб., 2004, 2010, 2011).

**Публикации.** Основные положения диссертационного исследования отражены в 12 научных публикациях, в состав которых входят 2 работы в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, монография, 7 статей и тезисы 4 докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов и списка литературы, включающего 137 наименований. Диссертация изложена на 158 страницах основного текста, содержит 57 рисунков, 8 таблиц и 6 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** дан краткий обзор состояния вопроса, обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния вопроса оценки НДС сварных металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин, рассмотрены причины, особенности и способы усиления их несущих элементов.

Выявление в элементах сварных несущих металлоконструкций строительных машин наиболее вероятных мест возникновения опасных зон КН, помимо известных типичных мест возникновения дефектов (трещин и пр.), является достаточно трудной задачей при оценке их НДС. Существующие методики неразрушающего контроля (НК) не позволяют обнаружить дефекты на ранней стадии их развития, выявить и оценить степень опасности зон КН, определить в наиболее опасных из них действующие напряжения, а также повысить несущую способность элементов конструкций в опасных локальных зонах КН. Эти трудности усугубляются при обследовании строительных машин, имеющих несущие сварные рамные элементы и сложные пространственные ферменные конструкции, представляющие собой подвижные и неподвижные металлические системы (рис. 1) с наличием большого числа сварных узлов (рис. 2).

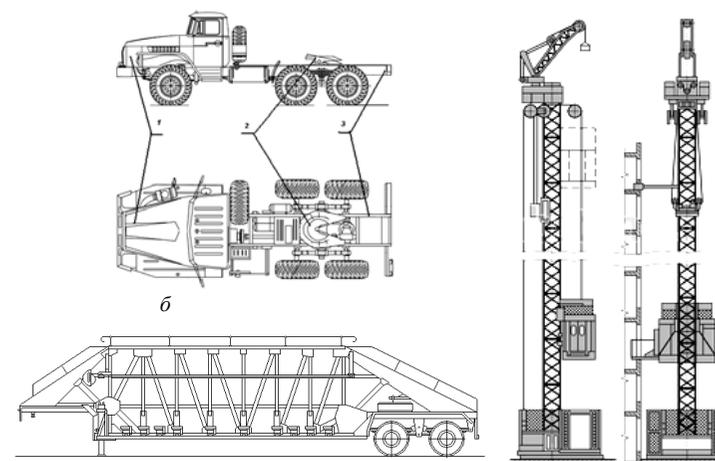


Рис. 1. Строительные машины, имеющие в своей конструкции несущие рамные элементы и элементы пространственных ферм: а – автомобильный тягач седельного типа (1 – двигатель, 2 – седельно-сцепное устройство, 3 – несущая рама), б – прицепной каркас, в – мачтовый строительный грузопассажирский подъемник

Значительное внимание вопросам обеспечения надежности и безопасности эксплуатации металлоконструкций строительных машин уделялось такими известными учеными, как Акулов Н.С., Вершинский А.В., Волков С.А., Вонсовский С.В., Горицкий В.М., Горкунов Э.С., Горлин А.М., Гофман Ю.М., Гохберг М.М., Евтюков С.А., Живейнов Н.Н., Карасев Г.Н., Качурин В.К., Куркин С.А., Ланг А.Г., Левин Е.А., Лившиц В.Л., Липатов А.С., Майзель В.С., Мужичкий В.Ф., Невзоров Л.А., Николаев Г.А., Панкратов С.А., Попов Б.Е., Ряхин В.А., Семенов В.П., Смородинский И.М., Соколов С.А., Цвей И.Ю., Шишков Н.А., Шур Я.С., Becker R., Bucar O., Haibach E. и др.

В то же время, проведенный анализ показал, что систематические исследования по разработке методик неразрушающего контроля структурных изменений в металле и косвенного определения действующих напряжений (используемых в прочностных расчетах) в зонах КН элементов МК строительных машин практически отсутствуют. Кроме того, нет систематических исследований с целью разработки методик по оценке влияния структурно чувствительных параметров и химического состава металла на механические и магнитные параметры конструкционных сталей в процессе их циклического упруго-пластического деформирования. Практически отсутствуют методики восстановления структуры металла и повышения несущей способности элементов сварных МК в опасных локальных зонах КН. В связи с чем усиление таких зон КН с применением традиционных методик (увеличением площади поперечного сечения, изменением конструктивной схемы и пр.) не всегда осуществимо.

Использование пассивного феррозондового метода в комплексе с другими разрушающими и неразрушающими методами способствует разработке

и совершенствованию методик оценки НДС металла сварных МК с целью повышения их надежной и безопасной эксплуатации после проведения ремонта и иных мероприятий по продлению срока службы. В то же время эти возможности в полной мере не реализованы для разработки методик выявления и оценки степени опасности локальных зон КН, измерения в наиболее опасных из них действу-

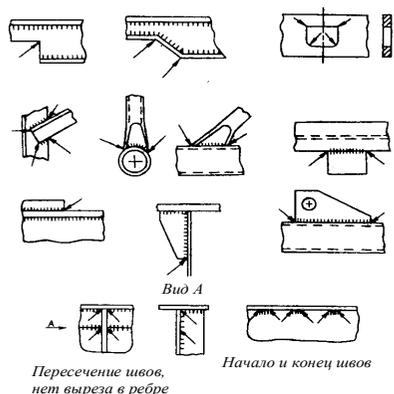


Рис. 2. Типичные места возникновения трещин в сварных МК строительных машин

ности металлоконструкций в опасных зонах КН при ремонте.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны широко применяемые при изготовлении несущих конструкций строительных машин малоуглеродистая сталь Ст3 и низколегированная сталь 10ХСНД. В качестве модельного материала использовалась сталь 08пс. Из выбранных сталей по ГОСТ 1497–84 изготавливались плоские образцы на растяжение и круглые образцы из стали Ст3 на сжатие.

Выбор исследуемых сталей обусловлен тем, что они нашли широкое применение при изготовлении несущих МК в машиностроении, строительстве и других отраслях промышленности, относятся к разным категориям прочности и имеют разную склонность к циклическому упрочнению и разупрочнению, что особенно важно при интерпретации результатов исследований со сталями подобных классов. Кроме того, такой выбор сталей дает возможность распространить полученные результаты и выявленные закономерности (с выдачей обоснованных рекомендаций) на все стали, близкие к исследуемым по химическому составу и свойствам.

Экспериментальные исследования проводились на образцах с различной исходной структурой (крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная), характерной для поставляемого заводского проката, элементов металлоконструкций и сварных соединений, обладающих структурной неоднородностью. При этом учитывался тот факт, что структура металла определяет его механические свойства.

ющих напряжений, используемых в прочностных расчетах, а также методики измельчения структуры металла, способствующей повышению прочностных свойств и позволяющей восстановить несущую способность несущих элементов сварных конструкций в опасных локальных зонах КН.

Во второй главе приведены обоснование и выбор материала исследования, приборов и методов контроля металла и диагностики технического состояния элементов сварных МК. Приведены разработанные методики для оценки напряженно-деформированного состояния сварных МК СМ в процессе эксплуатации и повышения несущей способ-

При испытаниях использовались образцы после различных видов обработки:

- в состоянии заводской поставки;
- с крупнозернистой структурой после проведения высокотемпературного отжига при 900 и 1050 °С;
- с мелкозернистой структурой;
- после холодной пластической деформации (поставка + прокатка на степень деформации  $\epsilon = 8, 15, 30, 40$  и 50 %).

Для получения мелкозернистой структуры, обладающей более высокими прочностными свойствами, была разработана методика, включающая в себя термоциклическую обработку по разработанным режимам:

- **первый режим:** 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 10-кратный нагрев до температуры 770 °С с последующим охлаждением в печи до 690 °С, и в конце последнего цикла – на воздухе;
- **второй режим:** 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 10-кратный нагрев сталей до температуры 770 °С с последующим охлаждением на воздухе после каждого цикла.

Поэтапный контроль структурных изменений в сталях после каждого цикла проводился с применением методик металлографического анализа, пассивного феррозондового контроля и твердометрии.

Для реализации разработанной методики металлографического анализа применялся комплекс приборов, включающий в себя инвертированный металлографический микроскоп МЕТАМ РВ-22, специальную фотонасадку и высокоразрешающую цифровую фотокамеру с персональным компьютером. Данные металлографических исследований обрабатывались математически.

Методика механических испытаний включала в себя проведение пластической деформации растяжением образцов в различном структурном состоянии на поверенной разрывной машине FPZ 100/1 в упруго-пластической области деформирования при циклическом ступенчатом нагружении–разгрузке с записью диаграммы растяжения на компьютере. Испытания образцов на сжатие осуществлялись в упругой области деформирования. Скорость деформирования составляла 2 мм/мин. При испытаниях оценивалась пластичность по относительному удлинению, пределы прочности и текучести (условный предел текучести).

Методика термической обработки образцов включала в себя проведение высокотемпературного отжига конструкционных сталей и термоциклической обработки по разработанным режимам. Термическая обработка проводилась в программируемых муфельных печах СНОЛ 8.2/1100 и СНОЛ 30/1100 с микропроцессорным управлением.

Для оценки НДС сварных несущих металлоконструкций строительных машин, изготовленных из ферромагнитных материалов, в работе разработана методика пассивного феррозондового контроля путем измерения величины напряженности магнитного поля рассеяния прибором ИКНМ-2ФП с двухканальным феррозондовым преобразователем (табл. 1).

Таблица 1

№	Основные технические характеристики прибора ИКНМ-2ФП	
1	Диапазон измерения величины $H_p$ , А/м	$\pm 1999$
2	Основная относительная погрешность измерения, %	5
3	Дополнительная абсолютная погрешность измерения, А/м	5
4	Количество каналов измерения величины $H_p$	2
5	Время одного измерения, мкс	10
6	Рабочий температурный диапазон, °С	-20...+60

При контроле фиксировались места аномальных изменений  $H_p$  и проводилась оценка степени опасности предполагаемых зон КН. Разработанная методика позволяет провести сплошное и выборочное сканирование поверхности основного металла и сварных соединений, в том числе в труднодоступных местах и без предварительной подготовки поверхности и снятия защитного покрытия толщиной менее 3 мм.

В третьей главе представлена разработанная методика оценки влияния внешних воздействий (деформация, температура) на изменение механических, структурных и магнитных параметров металла сварных несущих металлоконструкций строительных машин.

Для элементов сварных МК строительных машин, изготовленных из конструкционных сталей, обладающих высокой пластичностью, характерным в процессе эксплуатации является прохождение пластической деформации в опасных зонах концентрации напряжений. Учитывая опасность появления зон КН, в которых прошла или проходит пластическая деформация, было важно оценить влияние степени холодной пластической деформации конструкционных сталей на изменение магнитного параметра  $H_p$ , что потребовало разработки соответствующей методики.

В процессе разработки методики установлена связь между структурными изменениями, происходящими в конструкционных сталях при холодной пластической деформации, и напряженностью магнитного поля рассеяния  $H_p$ . Показано, что наиболее значительное изменение величины  $H_p$  происходит при небольших степенях деформации, с их увеличением изменение значений магнитного параметра  $H_p$  уменьшается (рис. 3, а). При этом, независимо от исходной величины и знака магнитного параметра  $H_p$ , с увеличением степени пластической деформации значения  $H_p$  принимают отрицательные значения, а их величина стремится к значениям магнитного поля Земли, что имеет практическое значение при оценке НДС сварных несущих МК строительных машин, особенно в тех местах (зонах), где в процессе эксплуатации прошла пластическая деформация на ту или иную степень. Данные магнитного контроля хорошо согласуются с результатами металлографического анализа (рис. 4).

С увеличением степени пластической деформации  $\varepsilon$  повышается кристаллографическая ориентированность зерен вдоль направления прокатки, при

$\varepsilon = 30\%$  практически отсутствуют зерна, не претерпевшие холодную пластическую деформацию, что необходимо учитывать в практике технического диагностирования элементов МК.

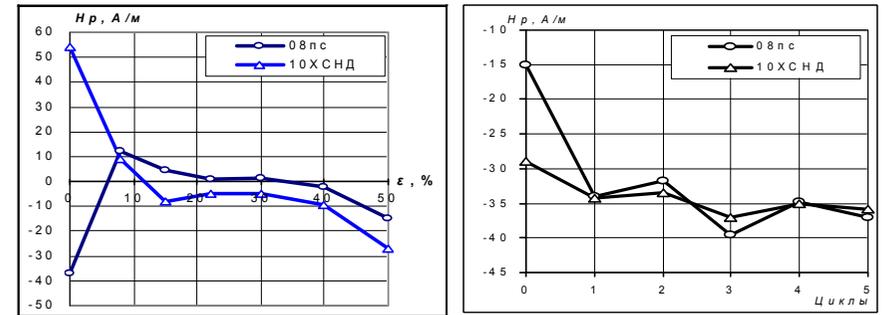


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  от степени деформации  $\varepsilon$  (а) и от числа циклов при термоциклировании после отжига при 900 °С и холодной пластической деформации на  $\varepsilon = 50\%$  (б) для сталей 08пс и 10ХСНД

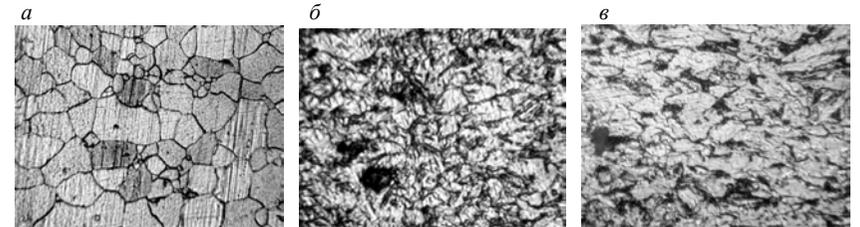


Рис. 4. Структура стали 10ХСНД, х650:  
а – состояние поставки, б, в – после прокатки на степень деформации 30 и 50 % соответственно

Для проведения экспериментальных исследований на образцах с различной исходной структурой была разработана методика получения структур с различной степенью дисперсности по ранее разработанным режимам.

Следует отметить, что мелкозернистая структура сталей, по сравнению с крупнозернистой, характерной для заводского проката, обладает повышенными прочностными свойствами. Согласно уравнения Холла-Петча, связь предела текучести металла с размером зерен описывается следующим уравнением:

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

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

Поэтому разработка методики получения структуры с заданным размером зерен, в том числе мелкозернистой, в промышленных и полевых условиях представляет значительный научный и практический интерес, что открывает дополнительные возможности для повышения несущей способности элементов несущих металлоконструкций строительных машин, в том числе в опасных

локальных зонах концентрации напряжений, в которых действующие напряжения превышают допустимые.

В процессе разработки методики при проведении термоциклической обработки установлена взаимосвязь между структурными изменениями и напряженностью магнитного поля рассеяния  $H_p$  в исследуемых сталях. Показано, что величина значений  $H_p$  зависит как от химического состава сталей и исходной структуры, так и от числа циклов ТЦО. Так, наибольшее изменение значений  $H_p$  происходит в процессе первых трех циклов нагрев–охлаждение. Последующее увеличение числа циклов уменьшает магнитную амплитуду (рис. 3, б), что связано с менее значительными структурными изменениями (измельчением структуры), что подтверждается данными металлографического анализа (рис. 5).

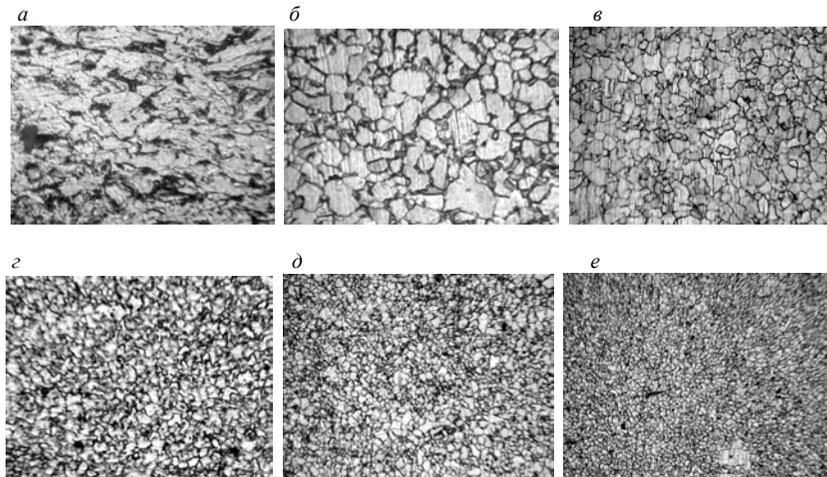


Рис. 5. Изменение структуры стали 10XCHD при термоциклической обработке,  $\times 650$ : а – состояние (поставки + прокатка на  $\varepsilon = 50\%$ ); б–е – после 1–5 цикла соответственно

Наиболее интенсивное измельчение исходной структуры сталей наблюдается в процессе первых трех циклов, дальнейшее увеличение числа циклов до 5 и более незначительно уменьшает размер зерен, однако снижает разнородность.

В работе была проведена оценка влияния структуры металла с разной степенью дисперсности, полученной при термоциклической обработке после различного количества циклов обработки, на механические свойства сталей 08пс, Ст3 и 10XCHD (табл. 2, рис. 6).

Видно, что с увеличением числа циклов ТЦО и уменьшением среднего размера зерен происходит повышение механических свойств конструкционных сталей на 13...17%, что позволяет рекомендовать термоциклическую обработку для усиления металла в опасных локальных зонах КН как в сварных соединениях, так и в элементах эксплуатируемых МК, а также при получении мелкозернистой структуры в промышленных условиях.

Марка материала	Механические свойства	Число циклов ТЦО							
		0	1	2	3	4	5	7	10
08пс	$\sigma_{0,2}$ , МПа	166,0	172,0	181,5	188,0	190,5	193,0	193,5	195,0
	$\sigma_B$ , МПа	281,5	295,5	301,0	309,5	315,0	317,5	320,0	323,5
	$\delta$ , %	24,0	23,5	23,0	23,0	23,5	23,0	23,0	23,0
Ст3	$\sigma_{0,2}$ , МПа	233,0	242,5	250,0	255,5	259,0	262,5	263,0	263,5
	$\sigma_B$ , МПа	418,0	441,5	451,0	468,5	471,5	476,0	477,5	484,5
	$\delta$ , %	23,0	22,5	22,0	22,0	22,5	22,0	22,0	21,5
10XCHD	$\sigma_{0,2}$ , МПа	385,0	400,5	416,0	423,5	428,5	435,0	434,0	435,0
	$\sigma_B$ , МПа	503,0	538,0	538,0	563,5	568,5	573,5	568,5	583,5
	$\delta$ , %	19,0	18,0	19,0	18,5	19,0	18,5	18,5	18,0

В процессе исследований разработана методика оценки влияния действующих напряжений при циклическом упруго-пластическом деформировании сталей 08пс, Ст3 и 10XCHD с крупнозернистой, мелкозернистой и деформированной структурами на изменение напряженности магнитного поля рассеяния. При разработке методики установлена взаимосвязь между действующими напряжениями и магнитным параметром  $H_p$  при циклическом упругом деформировании растяжением образцов из конструкционных сталей.

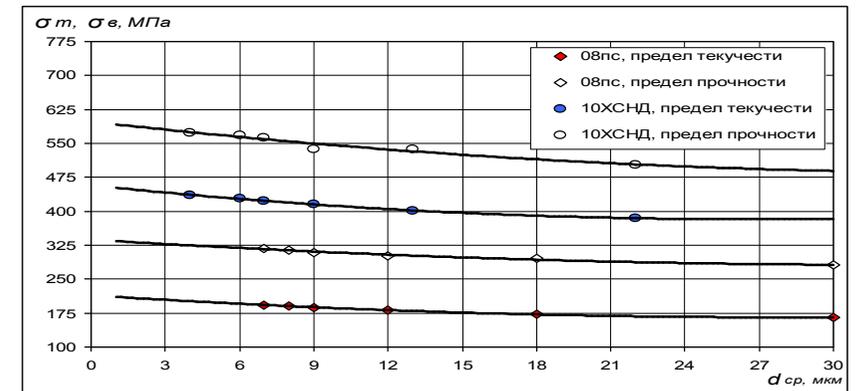


Рис. 6. Зависимость прочностных свойств сталей 08пс и 10XCHD от среднего размера зерен

Показано, что с увеличением действующих напряжений  $\sigma$  величина напряженности магнитного поля рассеяния снижается, при уменьшении  $\sigma$  – значения  $H_p$  возрастают для всех структурных состояний исследуемых сталей (рис. 7, а). При сжатии образцов характер зависимости  $H_p(\sigma)$  изменяется на противоположный: с увеличением напряжений  $\sigma$  магнитный параметр  $H_p$  возрастает, при снижении  $\sigma$  –  $H_p$  уменьшается (рис. 7, б). Снятие внешних нагрузок способствует образованию петли магнитоупругого гистерезиса, которая после 1-го цикла нагружение–разгружение является незамкнутой. После 2-го и после-

дующих циклов ветви петли магнитного гистерезиса сближаются, при этом различие между начальными и конечными значениями становится незначительным. Таким образом, после 1-го цикла нагружение–разгрузка стирается исходная механическая и магнитная предыстория металла, что способствует повышению достоверности последующих измерений и имеет важное значение при диагностировании несущих МК строительных машин.

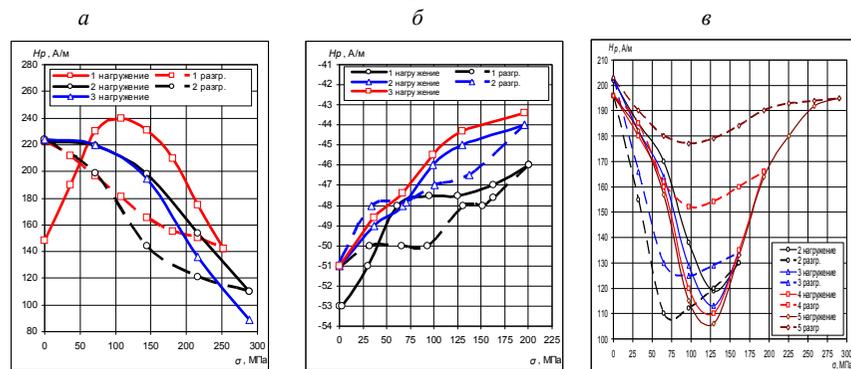


Рис. 7. Зависимость при деформации образцов из конструкционных сталей в состоянии поставки:

*a* – для стали 10XCHD при упругом деформировании растяжением, *б* – для стали Ст3 при упругом деформировании сжатием, *в* – для стали 08пс при циклическом нагружении–разгрузке в области пластического деформирования

При растяжении сталей (нагружение) в пластической области деформирования с увеличением напряжений величина  $H_p$  возрастает, при снижении нагрузки (разгрузка) – величина  $H_p$  уменьшается. При разгрузке наблюдается магнитомеханический гистерезис (конечные значения  $H_p$  не совпадают с исходными) (рис. 7, *в*), форма которого в значительной степени зависит от исходной микроструктуры.

При многократном нагружении–разгрузке ход кривых  $H_p$  для больших и менее значительных степеней деформации несколько отличается: для больших степеней деформации значения  $H_p$  остаются практически неизменными вплоть до полного разгрузки, тогда как для зон с небольшими степенями деформации наблюдаются существенные изменения  $H_p$  для напряжений, соответствующих упругой области деформирования. Такой характер изменения магнитного параметра  $H_p$  при разгрузке объектов исследования позволяет в первом приближении оценить степень пластической деформации металла элементов МК в зонах концентрации напряжений, характеризующей степень опасности выявленных зон.

Для развития практической оценки фактического НДС несущих МК по результатам экспериментальных исследований проведен регрессионный ана-

лиз данных и получены типичные частные (для конкретного структурного состояния) и обобщенные (учитывающие совокупность структурных состояний) графические зависимости безразмерных параметров  $H_p/H_{p0}$  и  $\sigma/\sigma_m$  (рис. 8), где  $H_p, \sigma$  – текущие значения напряженности магнитного поля рассеяния и действующих напряжений,  $H_{p0}, \sigma_m$  – напряженность магнитного поля рассеяния в зоне контроля разгруженного элемента конструкции и величина предела текучести (условного предела текучести) материала соответственно.

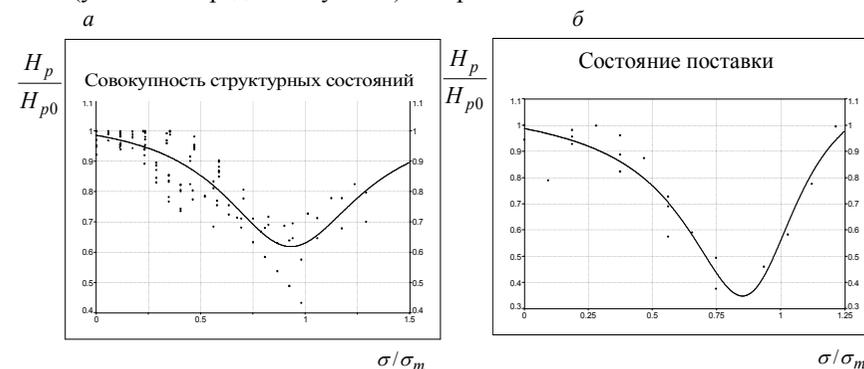


Рис. 8. Графическое представление регрессионных зависимостей для стали 10XCHD: *a* – обобщенная, *б* – частная

Применение представленных зависимостей позволяет по характеру и величине приращения безразмерных параметров определять действующие напряжения в зонах КН элементов МК в процессе их циклического нагружения–разгрузки.

Установлено, что при известном структурном состоянии металла следует использовать частную, при неизвестном – обобщенную (полученную на основе совокупности структурных состояний металла) зависимости. При этом погрешность определения напряжений в первом и втором случаях, по сравнению с методом тензометрирования, не превышает 10...12% и 15...25% соответственно.

С целью интенсификации процесса практического определения действующих напряжений в элементах МК, работающих в условиях упругого нагружения, были получены аналитические квадратичные зависимости в виде:

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

где  $\sigma$  и  $H_p$  представляют собой текущие величины действующих напряжений и напряженности магнитного поля рассеяния соответственно;  $a, b, c$  – экспериментальные коэффициенты уравнений, зависящие от структурного состояния металла.

Так, приведенные в табл. 3 экспериментальные коэффициенты применимы при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструк-

ций строительных машин, изготовленных из сталей, близких к исследуемым по химическому составу, структурному состоянию и свойствам.

Таблица 3

Марка стали	Вид обработки	Коэффициенты уравнений			Коэффициент корреляции $R^2$
		$a$	$b$	$c$	
08пс	Поставка	0,0479	-22,2211	2543,4956	0,99
	Поставка + отжиг 900 °С	-0,0486	12,3890	-593,0803	0,86
Ст3	Поставка	0,0512	-10,9232	572,9132	0,91
	Поставка + отжиг 900 °С	-0,0014	-0,0581	210,9200	0,97
10ХСНД	Поставка	-0,0126	2,0722	200,3972	0,95
	Поставка + отжиг 900 °С	-0,0091	13,3543	132,9761	0,93

Таким образом, разработанная методика оценки влияния действующих напряжений на магнитный параметр  $H_p$ , в основу которой положены экспериментально установленные взаимосвязи между напряжениями и магнитным параметром в конструкционных сталях с различными исходными структурами при циклическом упруго-пластическом деформировании, позволяет выявлять зоны КН на поверхности объекта контроля, сравнивать их между собой по степени опасности, определять область упругого или пластического деформирования, а по уровню магнитного параметра – косвенно определять уровень действующих в металле напряжений, значения которых рекомендуется использовать в прочностных расчетах.

**Четвертая глава** посвящена разработке и апробации комплексной методики контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации, схема которой приведена на рис. 9.

Разработанная методика предусматривает применение комплекса разрушающих и неразрушающих методов, в том числе пассивного феррозондового метода контроля, который, обладая высокой производительностью, позволяет проводить как выборочный, так и сплошной предварительный контроль труднодоступных мест, сварных соединений, элементов и узлов МК с целью выявления зон КН с последующей оценкой степени их опасности и косвенного определения в наиболее опасных из них действующих напряжений, используемых в прочностных расчетах.

При этом основными этапами реализации методики являются : выявление зон КН в элементах металлоконструкций; оценка степени их опасности: в области упругого деформирования наиболее опасными являются те, в которых действующие напряжения превышают допустимые; к опасным, требующим усиления, относят все зоны КН, находящиеся в пластической области деформирования; проверка необходимости разгрузки конструкции; усиление зон КН проведением ТЦО с поэтапным контролем структурного состояния металла ПФ методом; уточнение НДС элементов несущих металлоконструкций.

Операция выявления зон концентрации напряжений пассивным феррозондовым методом позволяет резко сократить объем работ при оценке НДС

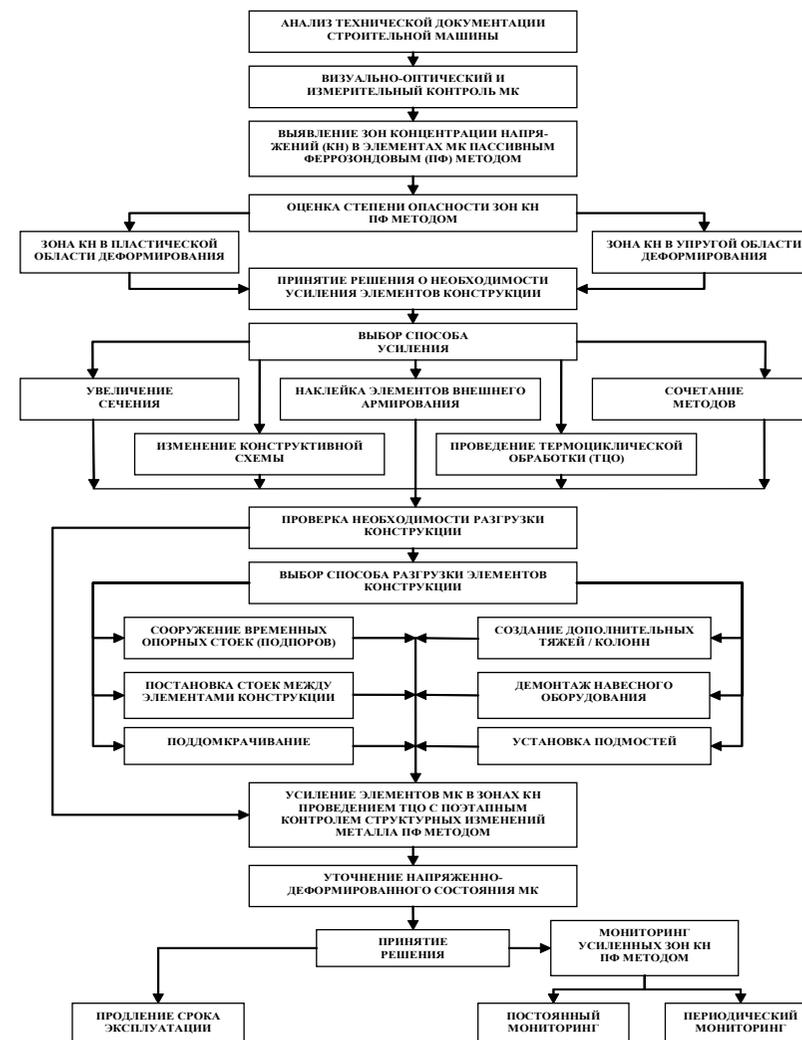


Рис. 9. Схема контрольно-диагностических и технологических операций при оценке и повышении несущей способности элементов металлоконструкций строительных машин эксплуатируемых МК и повысить достоверность результатов исследования, так как в этом случае становятся известными те зоны, где следует проводить дальнейший поиск дефектов, места установки датчиков тензометрического, магнитного или иного мониторинга.

Одним из наиболее эффективных, по нашему мнению, способов усиления опасных локальных зон КН является проведение в них контролируемой ПФ методом восстановительной ТЦО металла по разработанным в работе режимам.

Термоциклическая обработка позволяет при небольших затратах сформировать оптимальную мелкозернистую структуру, обладающую более высокими прочностными свойствами. Следовательно, для создания равнопрочности в металле элемента конструкции необходимо в опасной зоне КН сформировать из крупнозернистой более мелкозернистую структуру, необходимую степень дисперсности которой можно рассчитать по уравнению Холла-Петча (1). Отличительной особенностью усиления элементов МК в зонах КН с помощью ТЦО с поэтапным ПФ контролем структурных изменений в металле, является сравнительная простота, более высокая производительность и эффективность процесса.

Разработанная методика контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации апробирована при техническом диагностировании автоподъемника АП-18-04 на базе шасси ГАЗ-3307 автопарка ЗАО «ТРЕСТ СЕВЗАПСПЕЦСТРОЙМОНТАЖ» (СПб.), и при обследовании технического состояния несущих рам бортовых тягачей на базе полноприводного шасси КамАЗ-43118-013-10 (колесная формула 6×6) на станции диагностики ЗАО «ЕвроТрансКонтроль» (СПб.), что позволило разработать рекомендации по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации и определить рациональные сроки ремонтно-восстановительных мероприятий. Расчет экономической эффективности применения разработанной методики для диагностирования и ремонта рамы и телескопической стрелы автоподъемника АП-18-04 на базе шасси ГАЗ-3307 показал экономический эффект в размере 26 815 и 96 840 руб. соответственно.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Определена возможность оценки структурного и напряженно-деформированного состояния сварных несущих металлоконструкций строительных машин на основе теоретических и экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи структурных, механических и магнитных параметров конструкционных сталей.

2. Разработана методика получения структуры металла с заданной степенью дисперсности в элементах металлоконструкций строительных машин путем проведения контролируемой термической обработки по разработанным режимам, позволяющая повысить несущую способность сварных конструкций за счет формирования в опасных локальных зонах концентрации напряжений элементов конструкций мелкозернистой структуры, повышающей прочностные свойства металла на 13...17%.

3. Разработана методика оценки влияния степени холодной пластической деформации на структуру и свойства металла элементов сварных металлоконструкций эксплуатируемых строительных машин в локальных зонах концентрации напряжений, позволяющая повысить достоверность оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, особенно в зонах концентрации напряжений, где прошла или проходит пластическая деформация на ту или иную степень.

4. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния сварных несущих металлоконструкций строительных машин, изготовленных из конструкционных сталей в различном структурном состоянии, в процессе их циклического нагружения-разгружения, позволяющая выявлять в элементах металлоконструкций опасные локальные зоны концентрации напряжений и определять в них фактические величины напряжений, используемых в прочностных расчетах. Показано, что применение разработанных аналитических квадратичных зависимостей  $\sigma(H_p)$  способствует интенсификации процесса практического определения действующих напряжений, при этом применение разработанных частных и обобщенных (при известных и неизвестных структурных и механических параметрах металла) графических регрессионных зависимостей безразмерных параметров  $H_p/H_{p0}$  и  $\sigma/\sigma_m$  позволяет определять напряжения с погрешностью не выше 10...12 и 15...25% соответственно.

5. Разработана и апробирована методика контроля и повышения до нормативных значений несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации МУ РД СПбГАСУ 003-11-01, включающая в себя оценку напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и усиление элементов сварных конструкций в опасных локальных зонах концентрации напряжений, что способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации строительных машин, а также эффективности и производительности технического диагностирования на 15...20%.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ:

### Статьи в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий

1. Кузьмин, О.В. Пассивный феррозондовый контроль технического состояния металлических конструкций и оборудования [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин, В.С. Курочкин // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 4 (21). – С. 88–90.

2. Кузьмин, О.В. Способ определения зон и степени пластической деформации металла пассивным феррозондовым методом [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин, Е.С. Ибрагимова, И.А. Сазонов // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – № 1 (22). – С. 37–42.

### Монографии

3. Кузьмин, О.В. Контроль и восстановление несущей способности элементов металлоконструкций строительных машин [Текст] / В.Е. Гордиенко, О.В. Кузьмин. – СПб.: [СПбГАСУ], 2011. – 127 с.

### Публикации в других изданиях

4. Кузьмин, О.В. К вопросу проведения неразрушающего контроля металлических конструкций и оборудования [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин // В мире неразрушающего контроля и диагностики материалов, промышленных изделий

и окружающей среды: IV Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинар: сб. статей / Сев.-Зап. техн. ун-т. – СПб., 2003. – С. 150.

5. **Кузьмин, О.В.** Метод магнитной памяти металла – перспективный метод экспресс-диагностики металлических конструкций [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин // 160 лет Котлонадзору России: семинар “Свароч. технологии”: сб. статей / С.-Петербург. гос. политехн. ун-т (Ин-т Петра Великого). – СПб., 2003. – С. 37–38.

6. **Кузьмин, О.В.** Некоторые аспекты прогнозирования остаточного ресурса оборудования, машин и металлических конструкций, отработавших нормативный срок службы [Текст] / В.Е. Гордиенко, О.В. Кузьмин // Актуальные проблемы современного строительства: 56-я Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых: сб. докл. / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2003. – Ч. 2. – С. 138–139.

7. **Кузьмин, О.В.** К оценке возможностей метода магнитной памяти металла при техническом диагностировании металлических конструкций [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин, Н.Н. Столяров // Докл. 61-й науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2004. – Ч. 1. – С. 121–123.

8. **Кузьмин, О.В.** Механизм изменения напряженности магнитного поля рассеяния от внутренних напряжений при пластическом деформировании конструкционных сталей [Текст] / В.Е. Гордиенко, Н.В. Овчинников, О.В. Кузьмин, В.С. Курочкин // Актуальные проблемы современного строительства: 62-я Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов: сб. докл. / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – Ч. IV. – С. 84–85.

9. **Кузьмин, О.В.** К вопросу применения пассивного феррозондового метода при оценке напряженно-деформированного состояния сварных металлических конструкций [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, Н.В. Овчинников, О.В. Кузьмин, В.С. Курочкин, А.О. Бакшеев // Актуальные проблемы современного строительства: 62-я Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов: сб. докл. / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – Ч. IV. – С. 86–87.

10. **Кузьмин, О.В.** Неразрушающий контроль элементов сварных МК с применением пассивного феррозондового метода [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин // 67-я науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та: сб. статей / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2010. Ч. IV. – С. 76–78.

11. **Кузьмин, О.В.** К вопросу усиления элементов сварных МК восстановительной ТЦО с пассивным феррозондовым контролем структурных изменений металла [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, О.В. Кузьмин // Актуальные проблемы современного строительства: 63-я Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых: сб. докл. / С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – Ч. IV. – С. 86–88.

12. **Кузьмин, О.В.** К вопросу выявления и усиления зон концентрации напряжений в элементах сварных МК [Текст] / В.Е. Гордиенко, Е.Г. Гордиенко, Н.В. Овчинников, О.В. Кузьмин, В.С. Курочкин, И.А. Сазонов // Современные направления технологии, организации и экономики строительства: постоянно действующий межвузовский научно-практический семинар: сб. статей / С.-Петербург. гос. воен. инженер.-технич. ун-т. – СПб., 2010. – С. 76–78.

Компьютерная верстка И.А. Яблоковой

Подписано к печати 03.03.11. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 7.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 5.

