

Москвин Павел Викторович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ
ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА
(НА ПРИМЕРЕ МОСТОВЫХ КРАНОВ)**

**Специальность 05.03.06 - «Технологии и машины сварочного
производства»**

**05.02.11 - «Методы контроля и диагностика в
машиностроении»**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Троценко Д.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Сморodinский Я.Г.

кандидат технических наук, доцент
Тиньгаев А.К.


Ведущее предприятие: ОАО «Курганмашзавод»

Защита состоится 18 декабря 2007 г. в 14 часов в ауд. 107 на заседании
диссертационного совета Д 212.298.06 при Государственном образовательном
учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский
государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им.
В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.
Факс (3522) 46-48-53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского
государственного университета.

Автореферат разослан «В» ноября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Щуров.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема обеспечения безопасности производства на промышленных предприятиях всегда была и остается чрезвычайно актуальной.

В последние годы вопрос обеспечения безопасной эксплуатации сварных конструкций резко обострился из-за сильной изношенности производственного оборудования и участившихся случаев техногенных аварий и катастроф. В полной мере это относится и к грузоподъемным (кранам) машинам разного назначения, в том числе и к сварным металлоконструкциям мостовых кранов, у которых истек нормативный срок службы.

До настоящего времени решение данной проблемы сдерживается отсутствием надежных экспериментальных методов оценки эксплуатационного остаточного ресурса сварных металлоконструкций в результате их усталости.

Опыт эксплуатации подъемно-транспортного оборудования показывает, что к моменту окончания нормативного срока службы у 80 % кранов остаточный ресурс металлоконструкций не исчерпан. Данное обстоятельство может быть объяснено не только значительным разбросом их долговечности от условий эксплуатации и свойств материала конструкций, но и заниженными расчетами нормативного срока службы, если воспринимать последнее как меру ресурса. Следовательно, нормативный срок службы не является предельным значением работоспособности грузоподъемных кранов. Поэтому, для обеспечения максимально возможной и безаварийной работы кранов с истекшим нормативным сроком службы, требуется решение задачи - оценки остаточного ресурса металлоконструкций.

Однако, из-за сложности процессов, происходящих при усталости металлоконструкций, ее высокой локальности и трудности выявления в сварных соединениях, данная задача до сих пор не решена.

Цель работы – повышение уровня безопасности эксплуатации сварных металлоконструкций мостовых кранов с истекшим нормативным сроком службы путем выявления накопления усталостных повреждений металла с последующим определением остаточного ресурса по сварным соединениям.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие основные задачи:

1. Определить методики и средства выявления наиболее опасных участков сварных металлоконструкций, в которых происходит наибольшее накопление усталостных повреждений на примере мостовых кранов.
2. Выбрать метод количественной оценки накопления усталостного повреждения в сварных соединениях металлоконструкций мостовых кранов.
3. Разработать методику определения эквивалентной нагруженности и остаточного ресурса сварных металлоконструкций.
4. Апробировать разработанную методику на сварных металлоконструкциях мостовых кранов в условиях их эксплуатации.

Методы исследований. В работе применен новый метод оценки накопления усталостных повреждений в сварных соединениях металлоконструкций мостовых кранов с помощью алюминиевых пленочных датчиков, а также современные методы исследований и обработки их результатов:

металлографический, микроструктурный анализ, гистограммный и математического моделирования.

Идея работы – установление взаимосвязи накопленного усталостного повреждения в реальных металлоконструкциях мостовых кранов в условиях их эксплуатации и образцах при известных параметрах циклического нагружения.

Научная новизна диссертационной работы, состоит в том, что:

- установлены критерии оценки длительности циклического воздействия для надежного выявления алюминиевыми датчиками накопленного усталостного повреждения в основном металле и сварных соединениях металлоконструкций в результате их эксплуатации;
- для стали Ст.Зсп (материал металлоконструкций) установлена трех параметрическая взаимосвязь между накопленным усталостным повреждением, уровнем действующих напряжений и числом циклов нагружения;
- разработана математическая модель для определения эквивалентных напряжений и чисел циклов нагружения в сварных металлоконструкциях от условий их эксплуатации;
- разработана методика определения эксплуатационного остаточного ресурса сварных металлоконструкций;
- разработаны рекомендации о дальнейшей (после обследования данным методом) безопасной эксплуатации сварных металлоконструкций на примере мостовых кранов.

Практическая ценность работы:

Для металлоконструкций мостовых кранов с истекшим нормативным сроком службы разработанная методика позволяет выявлять слабые по сопротивлению усталости места, включая границу сплавления сварных соединений, а также получать для этих мест значения остаточного ресурса в годах, днях или часах при условии сохранения режима эксплуатации крана. Значения остаточного ресурса позволяют устанавливать календарные сроки безопасной эксплуатации металлоконструкций, их ремонта и замены. Методика может применяться на сварных металлоконструкциях различного назначения. Ее результаты могут использоваться для совершенствования расчетов на усталость.

Реализация выводов и рекомендаций работы:

Разработанная методика использована для определения остаточного ресурса сварных металлоконструкций девяти мостовых кранов с истекшим нормативным сроком службы на предприятиях ОАО «Курганмашзавод», ОАО «Корвет» и ООО «Втормет» г. Кургана. Внедрение результатов работы позволило выявить на ОАО «Курганмашзавод» два крана не пригодных к дальнейшей безопасной эксплуатации и получить экономический эффект 23 908 838 рублей. Полученные результаты исследования применяются также в учебном процессе студентов Курганского государственного университета при чтении лекций по курсу «Диагностика и прогнозирование работоспособности сварных конструкций».

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены:

- на 12-й и 13-й ежегодной международной научно-практической конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (г. Ялта, 2004 г. и 2005 г.);
- на Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения Н.Г. Славянова «Сварка и контроль - 2004» (г. Пермь);
- на 23-й Уральской конференции «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами» (г. Курган, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 127 страницах машинописного текста. содержит 63 рисунков, 17 таблиц, список используемой литературы из 147 наименований, приложений на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, основная идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы.

В первой главе представлен анализ усталостных разрушений металлоконструкций грузоподъемных кранов. Анализ усталостных разрушений проводился по мостовым кранам, так как наибольшее количество кранов, отработавших нормативный срок службы, составляют именно мостовые краны.

В разделе 1.2 первой главы рассмотрены подходы к оценке остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов.

В настоящее время не существует инструментальных средств, позволяющих достаточно точно определять накопленное (текущее) усталостное повреждение.

Внешние признаки деградации, например трещины в сварных металлоконструкциях, не всегда связаны с усталостью. В металлических конструкциях при тщательных обследованиях почти всегда можно обнаружить множество трещинообразных дефектов различных размеров и происхождения, но только развивающиеся в процессе эксплуатации могут быть идентифицированы как усталостные. Эти трещины и представляют наибольшую опасность. Главная задача, которую необходимо решить – это спрогнозировать, когда будут образовываться усталостные трещины.

Существующие методы прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций не точны и требуют своего совершенствования.

В данной научной работе для прогнозирования ресурса сварных металлоконструкций предлагается метод металлических пленок, который основан на использовании алюминиевых пленочных датчиков и получили название «Датчики деформации интегрального типа» (ДДИТ).

Сущность метода заключается в регистрации с помощью металлической пленки, как датчика, результатов действия на поверхности металлов микросдвигов, приводящих к накоплению усталостных повреждений. Пленка и исследуемый металл находятся в плотном контакте и работают при циклических нагрузках одновременно. Металл воспринимает внешнюю нагрузку, а пленка - нагрузку от металла через микросдвиги, вызванные дислокационными

процессами и разрывом межатомных связей. Микросдвиги приводят к первоначальным обратимым и последующим необратимым микродеформациям как в металле, так и в пленке. Дальнейшее развитие в них необратимых микродеформаций и связанные с этим изменения в состоянии их структуры и поверхности характеризуют процесс накопления усталостных повреждений. Микросдвиги, а следовательно, и микродеформация ориентированы в направлении поверхности. Поэтому на ней повреждаемость обнаруживается в начале в виде отдельных линий скопления. В дальнейшем происходит непрерывный процесс возникновения и роста линий скопления. В связи с тем, что материал пленки более пластичен, чем металл, необратимые микродеформации, а следовательно, и процессы накопления усталостных повреждений и изменения в ней происходят значительно раньше. Таким образом, пленка фиксирует накопление усталостных повреждений в металлах даже при их работе в упругой области.

Основные достоинства метода:

1. Простота реализации. Датчик не требует ориентировки на поверхности детали, так как его свойства во всех направлениях практически одинаковы.

2. Удобство. Метод можно применять непосредственно на работающем оборудовании. Он не требует каких-либо специальных условий в нарушении эксплуатационного режима нагружения. Снятие информации с ДДИТ осуществляется бесконтактным методом.

3. Достоверность. Датчики реагируют на циклическую сдвиговую микродеформацию основного металла, величина которой находится в прямой зависимости от уровня действующих напряжений и степени усталости металла.

4. Надежность. Датчики обладают свойством «памяти», что обеспечивает возможность на любых этапах циклического нагружения регистрировать и количественно оценивать поврежденность основного металла независимо от того, есть ли на поверхности датчика реакция или нет. Приращение реакции датчика всегда идет от достигнутого ранее уровня, что подтверждает дальнейший прирост поврежденности металла. У снятого с исследуемого места датчика полученная от металла информация не исчезает. В дальнейшем она может храниться без изменения сколь угодно долго (годами). Ею можно пользоваться в любые периоды времени.

5. Эффективность. Метод практически безбазовый. Он позволяет снимать полезную информацию с датчика на базе 3-4 мкм. От изгиба датчика его свойства не меняются. Эти обстоятельства способствуют надежному выявлению усталостного повреждения в локальных зонах, даже в концентраторах напряжений на границе сплавления сварного соединения и на самом сварном шве. Датчики можно многократно устанавливать и снимать с объекта, что дает возможность определять повреждаемость конструкции на разных этапах ее нагружения.

Во второй главе рассмотрены экспериментальные основы разработки методики прогнозирования ресурса сварных металлоконструкций. Они включают в себя выбор материала ДДИТ и способ оценки накопленного усталостного

повреждения на стадии предшествующей возникновению трещин, а также результаты тарировки ДДИТ.

Широкое распространение на практике получили датчики, изготовленные из меди, алюминия, олова. Они характеризуются различными граничными условиями применимости по напряжениям, числу циклов нагружения, температурным условиям.

Применительно к условиям эксплуатации мостовых конструкций предпочтительными являются алюминиевые датчики. Они надежно выявляют процесс накопления усталостных повреждений в сварных соединениях с учетом изменений значений параметров их эксплуатационной нагруженности. Применение медных и оловянных датчиков не целесообразно по следующим причинам:

1. Медные датчики требуют примерно в десять раз большее количество времени на процесс проведения исследования, чем алюминиевые.

2. Оловянные датчики не могут быть использованы на сварных соединениях металлоконструкций кранов, так как при установке датчика на сварной шов, в местах изгиба происходит изменение его исходного состояния.

В данной главе представлены методики и результаты тарировок датчиков на образцах из стали Ст.3сп материала конструкции. Они связывают уровень действующих напряжений, число циклов нагружения и уровень повреждения металла образцов, который определяется по состоянию «темных пятен» на ДДИТ.

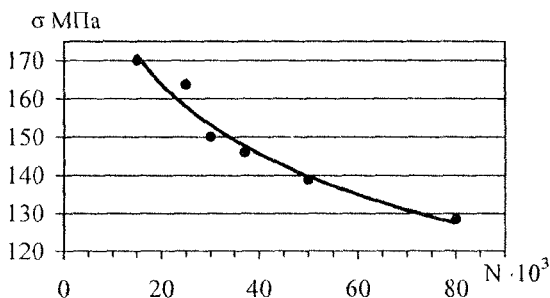


Рис. 1. Зависимость величины напряжения от числа циклов нагружений для одного и того же уровня повреждения металла образцов.

Представленная на рис.1 зависимость построена по критерию появления самых первых «темных пятен» на ДДИТ, которые фиксировали под микроскопом при 96 кратном увеличении в разных поперечных сечениях тарировочного образца. В одном и том же сечении образца с увеличением числа циклов нагружения на ДДИТ постоянной чувствительности происходит, как показано на рис.2 процесс возникновения «темных пятен», который соответствует накоплению усталостных повреждений в металле. Аналогичная закономерность имеет место на ДДИТ переменной чувствительности, которые были разработаны Сызранцевым В.Н. (патент № 2209412). Их особенностью является возможность

регистрации прироста «темных пятен» до базовой линии рис.3 и величины ее смещения после циклического нагружения. Базовая линия на ДДИТ соответствует границе появления «темных пятен».

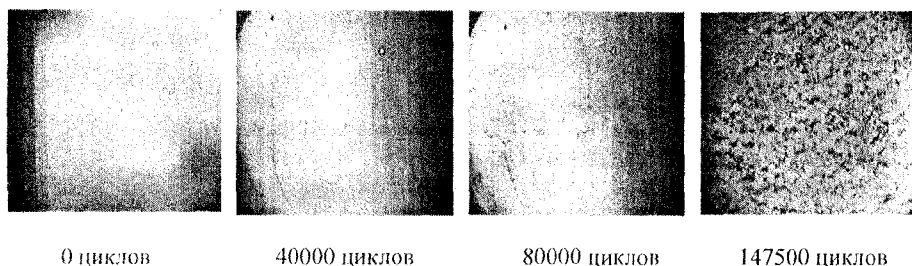


Рис. 2. Изменение состояния поверхности ДДИТ.

Количественно реакцию датчиков по фотографиям оценивали по приросту относительной площади «темных пятен», определенному с помощью обработки гистограмм, отражающих спектр плотности H изображения места оценки поврежденности с использованием программы, разработанной Гавриловым А.А. Пример такой обработки ДДИТ приведен на рис. 4.

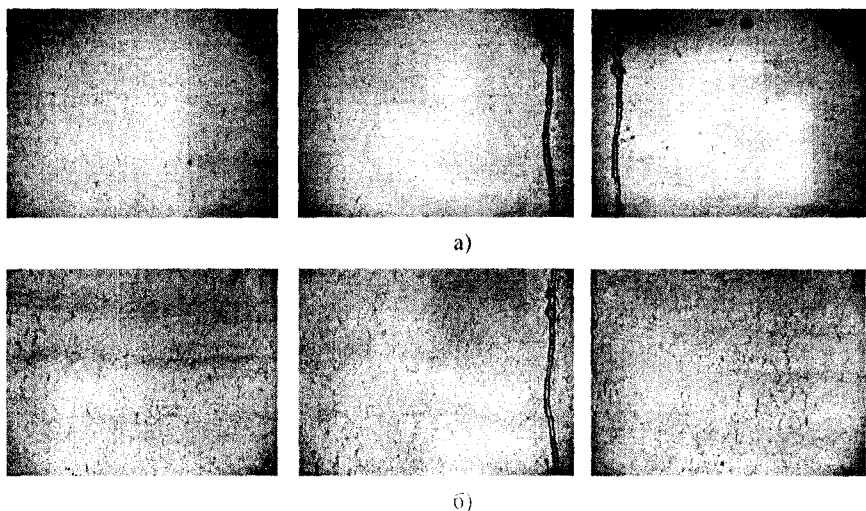


Рис. 3. Состояние «темных пятен» ДДИТ переменной чувствительности а) до испытания образца; б) после испытания образца.

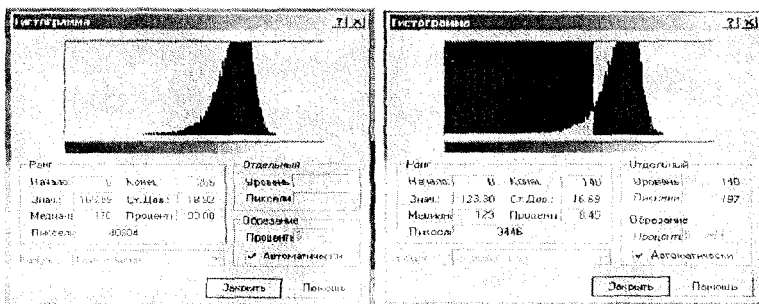


Рис. 4. Пример компьютерной обработки «темных пятен» ДДИТ.

Для оценки циклической нагруженности конструкций по состоянию «темных пятен» на ДДИТ построена трехпараметрическая зависимость, которая изображена на рис. 5.

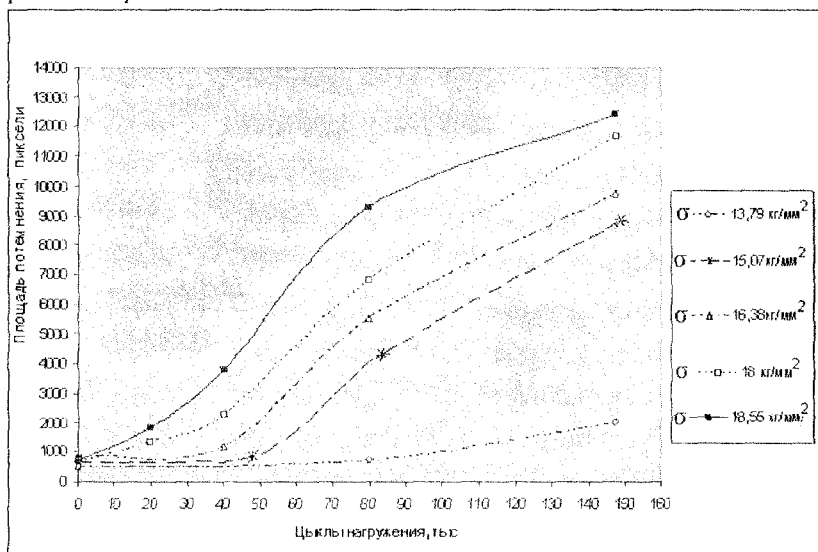


Рис. 5. Зависимость площади «темных пятен» от числа циклов нагружения и уровня напряжений.

Результаты таких исследований легли в основу разработки математической модели оценки эквивалентной нагруженности и остаточного ресурса сварных металлоконструкций.

В третьей главе представлена методика прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов. Основные этапы и мероприятия по обеспечению практической реализации метода представлены на рис. 6.

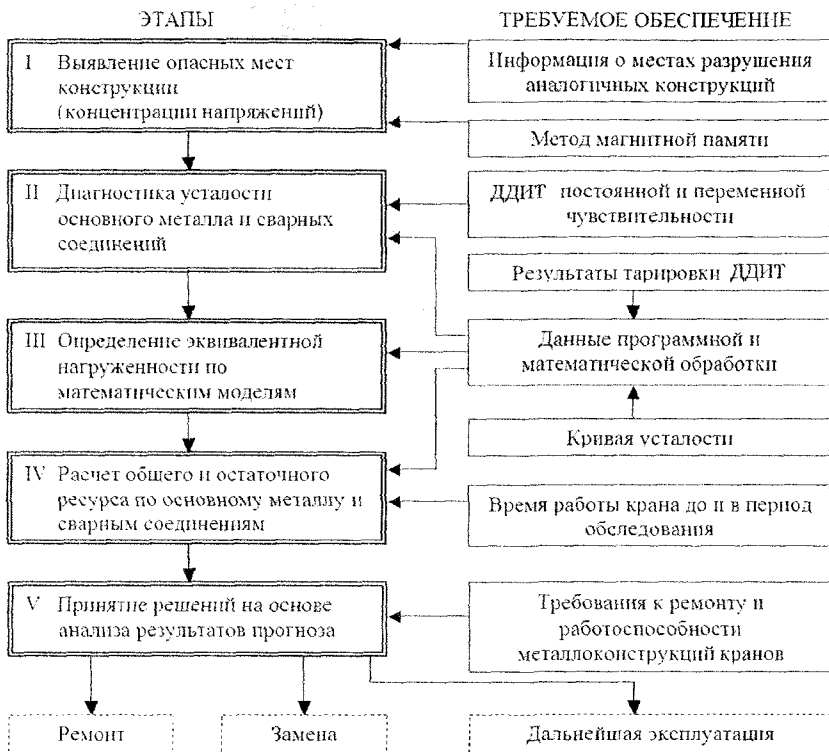


Рис.6. Схема прогнозирования остаточного ресурса.

В первую очередь определяются места установки ДДИТ на конструкции по выявленным зонам максимальной концентрации напряжений. Составляется схема установки ДДИТ, пример которой показан на рис. 7. Датчики постоянной чувствительности наклеиваются непосредственно на дефектное место, а ДДИТ переменной чувствительности – рядом на основной металл в направлении однородного напряженного состояния. Кран эксплуатируется до обнаружения смещения границы первых «темных пятен» на ДДИТ примерно на расстояние 10мм. Затем ДДИТ с конструкции снимаются, а их реакция фиксируется в цифровом изображении.

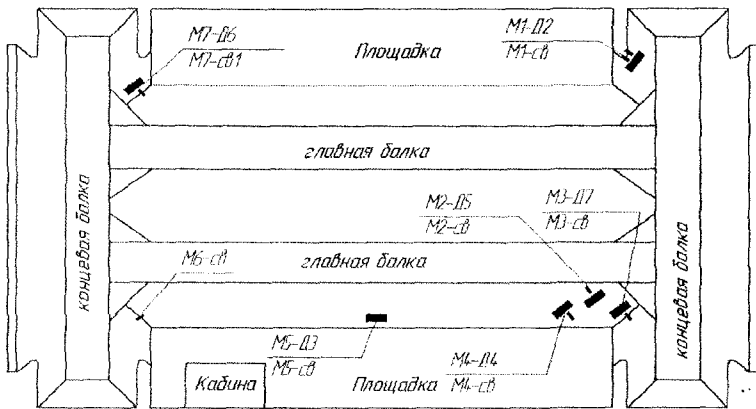


Рис. 7. Схема-развертка металлоконструкций крана и места установки ДДИТ
 ■ - ДДИТ переменной чувствительности, М – номер места установки ДДИТ, Д – номер ДДИТ, Св – ДДИТ на сварных соединениях, ● - ДДИТ постоянной чувствительности

В дальнейшем используется математическая модель, которая содержит следующие этапы расчета. Первый этап соответствует эксплуатации крана без датчиков. Для него известным является лишь число часов работы крана (T_n). На втором этапе исследуемый мостовой кран в течение T_g часов эксплуатируется вместе с датчиками, общее число которых (i) определяется количеством диагностируемых мест металлоконструкции крана. После чего на каждом i – м датчике фиксируются реакции в виде относительной площади «темных пятен» (δ_k) и смещение границы первых «темных пятен» по поверхности ДДИТ переменной чувствительности (x_k). На основе этих значений численным методом решается система двух трансцендентных уравнений:

$$\delta_k = \frac{b_g}{1 + \exp(\lg a_g - c_g \cdot b_g \cdot \lg N_e)}, \quad (1)$$

$$P_{xx}(x_k, \sigma_a, N_a, K, \sigma_{R0}, C_a, S_a) + \left[d_\sigma - (d_\sigma^2 - 4 \cdot \sigma_c^3 / \sigma_{R0})^{0.5} \right] \sigma_{R0} / (2 \cdot \sigma_{R0}) = P_x.$$

где b_g , a_g , c_g - параметры (константы) тарифовочной зависимости;

$P_{xx}(x_k, \sigma_a, N_a, K, \sigma_{R0}, C_a, S_a)$ - функция, определяющая изменение чувствительности ДДИТ; σ_{R0} - аналог предела прочности материала; P_x - величина поврежденности ДДИТ, соответствующая появлению на нем реакции в виде первых «темных пятен»; σ_{R0} - предел выносливости материала; K - коэффициент пропорциональности в кривой Гатса; σ_a - амплитуда цикла изменения напряжений; d_σ - параметр тарифовочной зависимости.

В результате решения системы (1) для основного металла определяются эквивалентное число циклов нагружения N_e и эквивалентное напряжение σ_e . Для сварных соединений значение N_e такое же как для основного металла, так как ДДИТ на них располагались рядом. Подстановкой своего значения δ_g и N_e в верхнее уравнение системы (1) находится величина σ_e сварного соединения. Поскольку кран в течение второго этапа эксплуатировался T_g часов, то полученное число циклов N_e позволяет рассчитать коэффициент эквивалентности (K_e):

$$K_e = N_e / T_g \text{ (цикл/час)}. \quad (2)$$

На третьем этапе расчета, принимая гипотезу, что процесс нагружения металлоконструкции крана является случайным и аддитивным, определим, зная T_n , эквивалентное число циклов нагружения крана (N_n) за время его эксплуатации без датчиков:

$$N_n = K_e \cdot T_n. \quad (3)$$

Таким образом, за первый и второй этап работы крана эквивалентное число циклов нагружения представлено суммой N_n и N_e .

Полученная величина эквивалентного напряжения σ_e после подстановки в уравнение кривой усталости (в форме Гатса) позволяет рассчитать прогнозируемое число циклов до разрушения при вероятности 50%:

$$N_p = K \left[\frac{1}{\sigma_e - \sigma_{R0}} - \frac{1}{\sigma_e (\sigma_e - \sigma_a)} \right]. \quad (4)$$

или минимальное и максимальное число циклов до разрушения при заданной вероятности (квантильные оценки предела выносливости σ_{R0}^{\min} , σ_{R0}^{\max}):

$$N_p^{\min} = K \left[\frac{1}{\sigma_e - \sigma_{R0}^{\min}} - \frac{\sigma_a}{\sigma_e (\sigma_e - \sigma_{R0}^{\min})} \right], \quad N_p^{\max} = K \left[\frac{1}{\sigma_e - \sigma_{R0}^{\max}} - \frac{\sigma_a}{\sigma_e (\sigma_e - \sigma_{R0}^{\max})} \right]. \quad (5)$$

На основе полученных значений величин N_p^{\min} и N_p^{\max} остаточный ресурс работы крана в эквивалентных числах циклов определяется по зависимостям:

$$N_o^{\min} = N_p^{\min} - N_e - N_n, \quad N_o^{\max} = N_p^{\max} - N_e - N_n \quad (6)$$

или в часах по выражениям:

$$T_o^{\min} = (N_p^{\min} - N_e - N_n) / K_e, \quad T_o^{\max} = (N_p^{\max} - N_e - N_n) / K_e. \quad (7)$$

Для оценки остаточного ресурса металлоконструкции в целом необходимо проанализировать все места установки датчиков и выбрать место, имеющее минимальный остаточный ресурс.

В четвертой главе представлена практическая реализация методики прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций на примере мостового крана (регистрационный номер К-003-П) грузоподъемностью 10 т., изготовленного Узловским механическим заводом в 1960 г. Результаты оценки остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостового крана приведены в таблице 2.

Из представленных данных в таблице 2 видно, что самым опасным местом в конструкции является место М5 св, соединяющее вертикальные стенки главной

балки с концевой. Остаточный ресурс составил 3 года. Наибольшее накопление усталостных повреждений происходит в сварных соединениях металлоконструкций по границам сплавления.

Таблица 2
Результаты оценки остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостового крана

№ места установки и № ДДИТ	Относительная площадь темных пятен $\delta_{\Sigma}, \%$	Смещение границы $X_{\Sigma}, \text{мм}$	Эквив. число цикл. нагружения N_e	Эквив. Напряжения $\sigma_e, \text{МПа}$	N ост. в цикл.	N ост. в годах
М2-Д5	28,44	23	8806	193,22	2240032	223,37
М5-3Д	33,46	11	9139	192,97	2257518	216,19
М-1 св1	52,75	-	8806	212,01	47032	4,69
М-2-св1	53,72	-	8806	213,2	42032	4,2
М-4-св	48,06	-	8806	210,09	69432	6,92
М-5-св	54,57	-	9139	213,9	30518	3
М-7-св	42,57	-	8806	207,8	112232	11,1

По результатам прогноза остаточного ресурса проведена оценка работоспособности девяти мостовых кранов отработавших нормативный срок службы.

Таблица 3
Результаты прогноза остаточного ресурса кранов

Завод	Регистрационный № крана	Смещение границы первых «темных пятен» - $X_{\Sigma}, \text{мм}$	Относительная площадь «темных пятен» - $\delta_{\Sigma}, \%$	Эквивалентное		Остаточный ресурс, $T_{\text{ост.}} \text{ лет}$
				напряжения, - $\sigma_e \text{ МПа}$	число циклов N_e	
ОАО «Курганмашзавод»	К-048-П	15	5,5	192,2	9234	6,10
	К-047-П	8	5,0	190,8	9394	30,01
	К-004-П	12	7,0	196,4	8537	3,05
	К-868-П	10	8,0	198,9	8132	53,22
	К-867-П	13	9,0	201,2	8019	63,87
ОАО «Корвет»	К-880-П	8	5,5	192,3	9141	2,34
	К-1861-П	26,5	31,14	202,4	7447	22,50
ОАО «Втормет»	К-1948-П	18,0	39,13	209,4	5270	19,24
	К-1937-П	18,7	24,92	196,6	9797	9,92

Из представленных в табл. 3 данных мы видим, что остаточный ресурс металлоконструкций кранов находится в пределах от 2 до 63 лет. В связи с этим нужно определиться в необходимости их ремонта, объеме ремонта. Ремонт можно рекомендовать тем металлоконструкциям кранов, у которых остаточный ресурс до момента возникновения трещин не менее 5-10 лет, а металлоконструкции ремонтноспособны. Выполнение этих двух обязательных условий будет способствовать планированию сроков проведения ремонта и продлению срока эксплуатации металлоконструкций кранов.

Если остаточный ресурс во многих местах металлоконструкций находится в пределах от 2 до 5 лет и в этом же пределе находится хотя бы один не ремонтно-способный узел, то в таких случаях ремонт металлоконструкций не рентабелен, поэтому целесообразнее кран списать и заменить.

При назначении очередного срока диагностики технического состояния крана нужно учитывать не только полученный остаточный ресурс металлоконструкции крана, но и требование Методических указаний по обследованию технического состояния мостовых кранов, отработавших нормативный срок службы, РД 10-112-5-97.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для оценки циклической работоспособности сварных металлоконструкций весьма эффективным средством является использование пленочных датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ). Они на конструкциях регистрируют фактическое накопление усталостных повреждений до возникновения трещин как в основном металле, так и в локальных зонах сварных соединений. Установлено, что применение алюминиевых ДДИТ на металлоконструкциях мостовых кранов с истекшим нормативным сроком службы способствует надежному выявлению в сварных соединениях накопленного усталостного повреждения после 2...12 месяцев эксплуатации крана. В течение указанного времени происходит вполне удовлетворительное осреднение эксплуатационной нагруженности металлоконструкций.

2. Выявленная возможность экспериментального определения с помощью ДДИТ эксплуатационного накопления усталостных повреждений на реальных конструкциях позволило разработать методологическую схему прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов. Она регламентирует последовательность выполняемых этапов работы и требуемое для них обеспечение, а также возможные дальнейшие действия с металлоконструкцией крана.

3. Металлографические исследования измененного состояния «темных пятен» (участков) на поверхности ДДИТ наработанных в условиях эксплуатации крана, позволяют выявить слабые места в металлоконструкции. Показана возможность прогнозирования по степени потемнения ДДИТ мест последовательного разрушения металлоконструкций. Установлено, что в сварных соединениях металлоконструкций самое слабое место – граница сплавления, так как именно там наблюдается наибольшее потемнение ДДИТ, а следовательно, и поврежденность.

4. Исследованиями измененного состояния поверхности ДДИТ в результате испытания образцов и ее количественной оценкой по относительной площади, занимаемой «темными пятнами» установлено, что между накопленным усталостным повреждением основного металла уровнем действующих напряжений и числом циклов нагружения существует тесная корреляционная взаимосвязь. Для материала металлоконструкций кранов – сталь Ст.3сп (ГОСТ 380-60), получены две тарировочные зависимости связывающие вышеуказанные параметры при разном состоянии поврежденности металла. Они построены

соответственно по критериям появления первых «темных пятен» на ДДИТ и состояния их изменения в результате циклического нагружения образцов.

5. Для выявления мест установки ДДИТ постоянной и переменной чувствительности, их расположения, ориентации и определения сроков снятия разработана методика проведения экспериментальных исследований на металлоконструкции крана. Установлено, что смещению границы самых первых «темных пятен» на ДДИТ переменной чувствительности в результате эксплуатации крана соответствует возможность регистрации им поврежденности основного металла, а на ДДИТ постоянной чувствительности - поврежденности сварного соединения. Смещение указанной границы на расстояние 5...20 мм служит критерием снятия с металлоконструкции кранов ДДИТ обоих типов.

6. Предложенная математическая модель позволяет совместным решением двух трансцендентных уравнений при установленных ДДИТ переменной чувствительности значений поврежденности металла и смещения границы «темных пятен» определять эквивалентную нагруженность металлоконструкций по основному металлу. Она так же позволяет рассчитать эквивалентный уровень напряжений для сварных соединений с учетом их поврежденности. Впервые получены значения эквивалентных напряжений и чисел циклов нагружения на сварных соединениях металлоконструкций мостовых кранов в зависимости от условий их эксплуатации.

7. К условиям сохранения режима эксплуатации мостовых кранов разработана методика расчета остаточного ресурса сварных металлоконструкций. Она включает в себя расчет коэффициента эквивалентности, который позволяет осуществить перевод времени работы крана в эквивалентный цикл. В дальнейшем с использованием кривой усталости производится расчет остаточного ресурса сварных металлоконструкций крана.

Разработанная расчетно-экспериментальная методика прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций внедрена на 9 мостовых кранах. Выданы рекомендации по условиям их дальнейшей и безопасной эксплуатации

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Троценко, Д.А. Прогнозирование остаточного ресурса металлоконструкций мостового крана [Текст] / А.К. Давыдов, А.Н. Зайцев, П.В. Москвин // Вестник Курганского университета Серия «Технические науки», Вып. 2.- Курган: Издательство Курганского гос. университета, 2005 - С. 9-11.

2. Москвин, П.В. Экспериментальные основы методики прогнозирования ресурса металлоконструкций [Текст] / П.В. Москвин, Д.А. Троценко, В.Н. Сызранцев // XXIII Уральская конференция «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами» [сб. докладов]. - Курган // Издательство Курганского гос. университета, 2006. - С. 41.

3. Москвин, П.В. Прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов [Текст] / П.В. Москвин, Д.А. Троценко, В.Н. Сызранцев, И.В. Лисихин, А.К. Давыдов, А.Н. Зайцев // Двенадцатая ежегодная международная конференция «Современные методы и средства

- неразрушающего контроля и технической диагностики»: [сб. материалов] / Ялта-Киев: Издательство УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2004. – С. 154-157.
4. Сызранцев, В.Н. Оценка остаточного ресурса кранов [Текст] / В.Н. Сызранцев, Д.А. Троценко, И.В. Лисихин, П.В. Москвин // Международная научно-техническая конф. «Проблема развития ТЭК западной Сибири на современном этапе» [сб. материалов].- Тюмень: Издательство Тюменского гос. нефтегазового университета, 2003. - Т. 2. - С. 67-70.
5. Москвин, П.В. Выявление эксплуатационных усталостных повреждений в сварных соединениях металлоконструкций крана [Текст] / П.В. Москвин, В.Н. Сызранцев, А.К. Давыдов, И.В. Лисихин, А.Н. Зайцев, Е.И. Коваль // Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Н.Г. Славянова «Сварка и контроль – 2004» [сб. докладов] / Пермь, 2004. – Т.2. - С. 360-363.
6. Сызранцев, В.Н. Определение остаточного ресурса металлоконструкций мостовых кранов [Текст] / В.Н. Сызранцев, Д.А. Троценко, П.В. Москвин, А.К. Давыдов, И.В. Лисихин, С.Ю. Тарунин // 21 научно-техническая конференция сварщиков Уральского региона «Сварка Урала – 2002» [сб. докладов]. - Курган // Издательство Курганского гос. университета, 2002 г. - С. 137-139.
7. Москвин, П.В. Выявление металлоконструкций мостовых кранов, непригодных к дальнейшей эксплуатации с помощью метода металлических пленок [Текст] / П.В. Москвин, Д.А. Троценко, В.Н. Сызранцев, А.К. Давыдов, А.Н. Зайцев, В.С. Котельников, И.В. Лисихин // 13-я ежегодная международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» [сб. материалов]. - Ялта-Киев: Издательство УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. - С. 128-131.
8. Москвин, П.В. Экспериментально-расчетный метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок [Текст] / П.В. Москвин, Д.А. Троценко, А.К. Давыдов, В.Н. Сызранцев, А.Н. Зайцев, И.В. Лисихин // Безопасность труда в промышленности. - 2006. - № 1 - С. 25-28.
9. Москвин, П.В. О прогнозировании долговечности металлоконструкций грузоподъемных кранов [Текст] / П.В. Москвин // Информационно-аналитический бюллетень «Ваша безопасность». - 2004. - № 15 (3) - С. 34-37.
10. Москвин, П.В. Прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов с помощью датчиков деформации интегрального типа. Датчик «здоровья» мостовых кранов [Текст] / П.В. Москвин // Технадзор. – 2007. - № 3. - С. 56-58.
11. Москвин П.В. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок. [Текст] / П.В. Москвин // Дефектоскопия. - 2007-№ 12. Принято в печать.

Москвин Павел Викторович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА
(НА ПРИМЕРЕ МОСТОВЫХ КРАНОВ)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Курганского государственного
университета

Подписано в печать 2007. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 153

Отпечатано в типографии Издательства КГУ.640000, г. Курган, ул. Гоголя, 25.