



**Pavel SOROKIN, Julia SINEVA**

## **МЕТОД И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ И ПУТЕВЫХ МАШИН**

### *Аннотация*

*В статье описывается способ автоматизированной диагностики работоспособности и контроля трещинообразования металлоконструкций, в основе которого лежит связь между напряженно-деформированным состоянием металлоконструкции и оптическими свойствами ее поверхности.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Автоматизация процессов контроля несущих металлических конструкций грузоподъемных и путевых машин является необходимым условием повышения их безопасности, производительности, надежности. Аварии этого класса машин в подавляющем большинстве связаны с разрушением элементов металлоконструкции вследствие накопления усталостных повреждений и перегрузок. Одной из самых важных в комплексе обеспечения надежной и безопасной эксплуатации машин является проблема повреждения несущих металлоконструкций. Цикличность нагружения металлоконструкций и их интенсивная эксплуатация порождает процесс накопления усталостной повреждаемости, приводящий к необратимым повреждениям, степень развития которых может служить критерием работоспособности конструкции. Особенностью грузоподъемных и путевых машин является то, что выполнение ими своих функций происходит в условиях, заранее неизвестных и изменяющихся в процессе работы в широких диапазонах. При этом постоянно изменяются и параметры машины. Таким образом, машина может рассматриваться как нестационарный объект, работающий в условиях априорной неопределенности. Следовательно, представляется актуальным создание автоматизированного диагностического комплекса, выполняющего функции мониторинга состояния металлоконструкции и рабочих механизмов машины и оценки их ресурса.

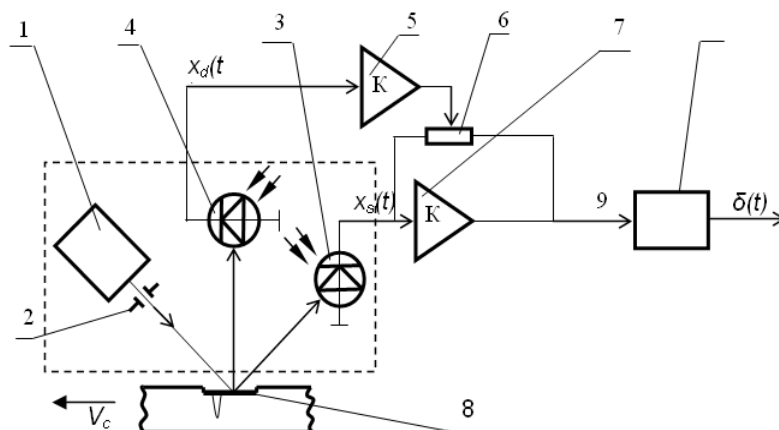
Способ позволяет в процессе эксплуатации металлоконструкции по оптическим свойствам поверхности эталонного участка анализировать кинетику последовательного накопления усталостных явлений и прогнозировать с высокой степенью достоверности остаточный ресурс металлоконструкции. При контроле трещинообразования в качестве критерия поврежденности используются линейные размеры зоны упругопластического деформирования, возникающие в местах повышенной концентрации напряжений.

Оценка размеров зоны позволяет достоверно отслеживать и прогнозировать момент образования макротрещины.

## 1. ПРИНЦИП РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ

Рассматривая работу металлоконструкций при переменном во времени нагружении, можно отметить что, как правило, ее критическим состоянием является усталость или истощение трещиностойкости. Усталостная повреждаемость находит свое отражение, в первую очередь, в поверхностных и приповерхностных слоях нагружаемой металлоконструкции, и если на первых стадиях обнаружить и получить их количественную оценку можно только с помощью специальных приборов, то в начале второго этапа (линия Френча) это можно сделать визуально с помощью простейших увеличительных средств. Причем каждой стадии усталости соответствуют свои изменения рельефа поверхности от появления линий скольжения до образования макротрещин критического размера. Таким образом, количественная и качественная оценка изменений рельефа поверхности может дать объективные данные о степени усталостных повреждений исследуемой металлоконструкции и оценить ее ресурс до разрушения. Причем получить оценку изменений рельефа поверхности можно не только непосредственными измерениями, но и по косвенному признаку – по изменению оптических свойств с помощью средств сканирования рефлектометрическими методами дефектоскопии. Применение рефлектометрии позволяет уменьшить влияние человеческого фактора на процесс диагностирования и, следовательно, увеличить объективность оценки. Помимо этого применение рефлектометрии позволяет достаточно легко автоматизировать процесс мониторинга, что дает возможность уменьшить временные затраты при диагностировании и повысить объективность оценки остаточного ресурса металлоконструкций.

Использование параметра формы индикатрисы рассеяния поверхности, реализовано в системе обнаружения усталостных повреждений с линейной коррекцией, принцип работы которой заключается в управлении коэффициентом преобразования канала обработки одной из составляющих рассеянного поверхностью поля, являющегося каналом контроля, в функции текущих значений другой составляющей по каналу обработки, являющегося каналом коррекции. Излучатель 1 и щелевая диафрагма 2 направляют на поверхность контрольной площадки 8 световой пучок и формируют на ней световую марку (рис.1). В процессе сканирования фотоприемниками 3 и 4 анализируется зеркальная и диффузная составляющие рассеянного поверхностью света. Канал зеркальной составляющей является контрольным, а канал диффузной – корректирующим. Канал диффузной составляющей осуществляет линейную коррекцию функции преобразования контрольного канала в зависимости от яркости в этом канале. При отсутствии дефектов поверхности флуктуации яркости зеркального канала  $\Delta\beta_s$ , вызванные шумами от цветовой неоднородности участков поверхности, посторонними засветками, флуктуациями степени прозрачности среды компенсируются коррекцией коэффициента усиления усилителя 7 канала контроля изменением величины сопротивления резистора 6 в его цепи обратной связи, управляемого синфазными флуктуациями диффузной яркости  $\Delta\beta_d$  по каналу коррекции выходным сигналом усилителя 5. При наличии механического дефекта, из-за перераспределения энергии внутри индикатрисы рассеяния, яркость зеркальной составляющей уменьшается, а диффузной возрастает. При этом коэффициент усиления канала контроля уменьшается.



**Рис. 1** Система обнаружения усталостных повреждений с линейной коррекцией усиления зеркального канала

Уменьшение коэффициента усиления канала контроля, вследствие увеличения диффузной составляющей, вызывает дополнительное уменьшение сигнала, что повышает разрешающую способность контроля, снижая влияние шумов.

В том случае, если получена расчетная модель металлоконструкции (что предпочтительнее, чем использование статистических данных), определяют предполагаемое направление макротрещины, которая распространяется в плоскости, перпендикулярной направлению приложенной нагрузки в условиях реализации плоскодеформированного напряженного состояния у вершины трещины.

В конструкциях, выполненных из малоуглеродистых сталей, при циклических напряжениях с уровнем действующих напряжений близкими к пределу текучести, в зонах концентрации напряжений теоретические максимальные напряжения превышают предел текучести. В результате с первого полуцикла нагружения в зоне концентрации напряжений возникает макропластическая деформация, проявляющаяся в виде единичных полос скольжения.

Последующее повторное нагружение сопровождается как увеличением числа полос, так и расширением зоны пластичности перед концентратором

Рассматривая деформацию материала на макроуровне можно отметить, что зона пластичности перед концентратором расширяется под действием циклических нагрузок практически до момента образования макротрещины. В зависимости от ряда факторов – величина концентрации, свойства материала, действующие нагрузки и т.д. будут варьироваться и размеры зоны пластичности, при достижении которых произойдет образование макротрещины. Геометрические размеры зоны вдоль направления действия растягивающего усилия составили соответственно в относительных величинах 0,4; 0,64; 0,84; 1 от критических размеров зоны.

Одновременно с деформацией на макроуровне происходят и микропреобразования рельефа поверхности материала. Увеличивается среднеквадратическое отклонение высот микронеровностей  $\sigma$  относительно подстилающей поверхности. Одновременно уменьшается корреляционный интервал  $a$ , характеризующий угол наклона граней микронеровностей. Рост микронеровностей также наблюдается до определенного критического значения.

При оценке изменений на макроуровне, параметром, характеризующим степень поврежденности является размер зоны пластичности. Параметрами, характеризующими изменения, происходящие на микроуровне, являются среднеквадратическое отклонение высот микронеровностей  $\sigma$  и корреляционный интервал  $a$ . Величины

корреляционного интервала  $a$  для поверхности образца до нагружения и в момент достижения трещиной своих критических размеров составляют соответственно 0,035 мм и 0,005 мм, а значение среднеквадратического отклонения высот микронеровностей  $\sigma$  0,00004 мм и 0,0534 мм.

Оценка степени поврежденности материала, на основе перечисленных параметров, позволяет объективно оценивать выработанный или остаточный ресурс узла металлоконструкции, предельным состоянием которой, является усталость или исчерпание трещиностойкости.

## **2. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ**

В местах наиболее вероятного разрушения в зоне предполагаемого прохождения и развития трещины подготавливают контрольные площадки. Контрольная площадка представляет собой участок поверхности, обработанный с высокой чистотой. Чистота обработки поверхности контрольной площадки выбирается в зависимости от разрешающей способности используемых средств сканирования. Для сканирования поверхностей контрольных площадок применяют оптические рефлектометрические датчики, реализующие принципы регистрации параметров рассеянного контролируемой поверхностью оптического излучения и позволяющие выявить наличие изменений оптических свойств поверхности. При сканировании контрольных площадок датчики осуществляют равномерное поступательное движение в направлении, перпендикулярном предполагаемому развитию макротрещины, так чтобы во время движения пересечь возможную трещину. После движения сканирования, выполняют возврат датчиков. Размеры контрольных площадок выбирают таким образом, чтобы при сканировании световая марка оптического датчика гарантировано выходила за размеры максимального раскрытия предполагаемой трещины.

В процессе циклического нагружения в исследуемой металлоконструкции происходит накопление усталостных повреждений. Усталостные повреждения, как было отмечено выше, находят свое отражение в поверхностных и приповерхностных слоях металла, изменяя его структуру и рельеф. Трансформация рельефа и микрорельефа, в первую очередь, оказывает влияние на изменение оптических свойств поверхности, которое фиксируется с помощью оптического рефлектометрического датчика. С датчиков производят регистрацию и анализ сигналов, снимаемых с датчиков с помощью вычислительного блока. В качестве датчиков используют оптоэлектронные преобразователи, реализующие принципы регистрации параметров рассеянного контролируемой поверхностью оптического излучения и позволяющие выявить наличие изменений оптических свойств поверхности с высокой надёжностью.

## **3. ИНТЕГРАЦИЯ С ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМОЙ**

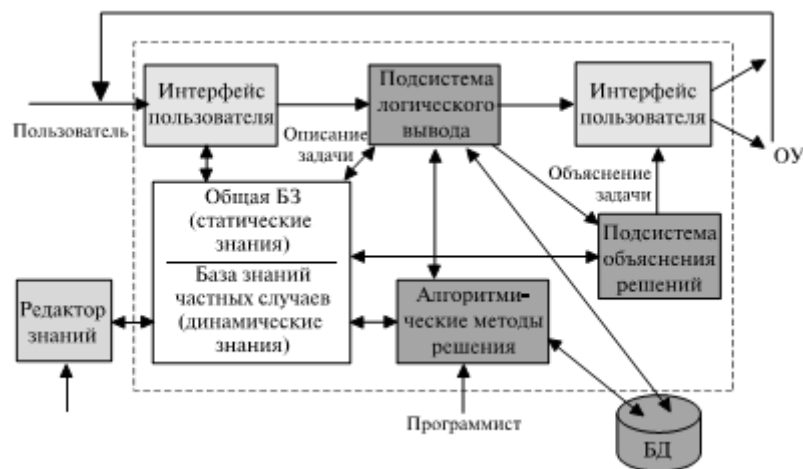
Для того, чтобы увеличить производительность и точность систем диагностирования, и максимально уменьшить влияние человеческого фактора на результат диагностики, в процессе диагностики предлагается использовать экспертные системы, которые за счет комплексного подхода в применении различных методов и алгоритмов обработки информации позволяют наиболее точно выявить наличие дефекта металлоконструкции, его тип, рассчитать остаточный ресурс, а также оптимизировать и снизить затраты на диагностику. Множество операций диагностики состояния металлоконструкций, применяемых на железнодорожном транспорте (рельсы, оси подвижного состава, бандажи и колеса, литые детали подвижного состава,

сварные соединения и др.) делится на операции контроля на поверхности дефектов, контроль внутреннего состояния металлоконструкции и контроль однородной поверхности на соответствие ее требуемым характеристикам.

Характерными чертами экспертной системы являются:

- четкая ограниченность предметной области;
- способность принимать решения в условиях неопределенности;
- разделение декларативных и процедурных знаний (фактов и механизмов вывода);
- способность пополнять базу знаний, возможность наращивания системы и способность к обучению;
- ориентация на решение неформализованных задач;
- алгоритм решения не описывается заранее, а строится самой экспертной системой.

Общая структура экспертной системы представлена на рис.2.



**Рис. 2.** Структура экспертной системы

Полный процесс работы экспертной системы распознавания дефектов включает в себя следующие этапы:

1. Получение информации о поверхности с помощью различных датчиков, в том числе рефлектометрических, преобразование этой информации в цифровую форму и запись ее в память микропроцессорного комплекса.

2. Предварительная обработка полученных данных. Фильтрация шумов и сегментация (выделение локальной информации, необходимой для распознавания).

3. Выделение признаков. Признаки изображения могут иметь различные уровни. Строго говоря, сегментация также является частью выделения признаков. Методы выделения признаков могут быть локальными и глобальными. Примером локального метода является обнаружение границ, глобального — кластеризация и метод расширения областей. Для обнаружения границ используются неоднородности между областями, в то время как кластеризация — это сегментация на основе обнаружения однородных областей. Поскольку в любом случае в информации об изображении содержится шум, не устраненный на этапе предварительной обработки, при сегментации необходима обработка нечеткой информации. Глобальное выделение признаков осуществляется по отношению к форме, свойствам, относительному положению и другим характеристикам выделенных областей. Эта процедура имеет большое значение для следующего этапа.

4. Понимание и оценка. Процессом понимания изображения называют либо классификацию и отождествление путем сравнения полученных кластеров с известными моделями, либо построение трехмерного изображения исходного объекта с

помощью выводов. Результат этого процесса является заключительной целью распознавания.

Выбор метода обнаружения дефектов путем запоминания и последующего анализа совокупности сигналов детектора для всей поверхности детали делает возможным применение математического аппарата теории распознавания образов, нечеткой логики, ассоциативной памяти, кластерного анализа и методов фильтрации с использованием характеристик конкретной дефектограммы. Последнее особенно важно в условиях нестационарности помех в реальном производстве.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предназначением экспертной системы обработки сигналов является оказание максимального содействия оператору в выполнении стоящем перед ним задач по обнаружению дефектов, для упрощения проверки и повышения качества проведения дефектоскопии металлоконструкции. Окончательное решение принимает оператор, а система помогает оператору при окончательной расшифровке. Данная система реализовывается на языке программирования высокого уровня, который поддерживает обработку сигналов и изображения. Применение системы повышает качество диагностики, а значит, как следствие – уровень безопасности движения поездов.

## **METHODS AND MEANS OF AUTOMATED MONITORING OF CARRYING IRON OF HOISTING AND TRACK MACHINES**

### *Abstract*

*The article contains the description of the automated control and diagnostics of cracking of metal, which are based on the relationship between stress and strain state and the optical properties of metal's surface.*

## **БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Соколов С.А. *Вероятностные основы расчёта ресурса металлических конструкций по методу предельных состояний. Проблемы машиностроения и надёжность машин.* 1997, №4, с. 105-112.
2. Аксенов В.А., Евсеев Д.Г., Фомин В.А. *Технологические процессы механообработки и сборки при ремонте подвижного состава.* – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001, с.507-520
3. Сорокин П.А., Чистяков В.Л. *Рефлектометрические методы автоматизированной дефектоскопии поверхности.* – Тула: Гриф и К, 2003. – 148-160 с.
4. В.И. Сероштан, О.С. Марьенко *Прогнозирование технического состояния металлоконструкций грузоподъёмных машин.* Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 118-124 с.
5. Казак С. А. *Вероятностный расчет усталостной долговечности при нормально распределённом случайном стационарном нагружении* // Вестник машиностроения. - 1995. №4. - с. 6-9.

*Autorzy:*

**prof. dr hab. inż. Pavel SOROKIN**

**mgr inż. Julia SINEVA** –Moscow State University of Railway Communications (МИИТ)