

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет»

На правах рукописи

Лент Алексей Николаевич

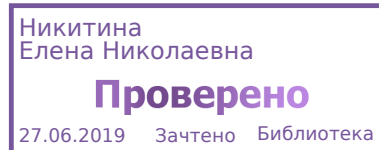
Исследование стадийности накопления усталостных повреждений  
конструкционных материалов

Кафедра «Материаловедение и технология новых материалов»  
Направление 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»  
Профиль – «Материаловедение и технология машиностроительных  
материалов»

## **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени магистра наук

2019г.



## Общая характеристика работы

**Актуальность исследования.** Работе с опасными промышленными объектами неизбежно сопутствует угроза аварий, которые провоцируют возникновение чрезвычайных ситуаций техногенной природы. Ключевая причина подобных явлений заключается в значительном износе, которому подвергаются основные производственные фонды, вызванном, как правило, тем, что накапливаются усталостные и образуются коррозионные повреждения. Выход техники из строя, т.е. ее выведение за рамки технологического процесса, обусловленное форс-мажорными обстоятельствами, провоцирует существенный денежный ущерб, вызванный необходимостью проведения ремонта, а также возникший из-за простоя промышленного оборудования. Пожалуй, самым распространенным примером следует считать вертикальные стальные резервуары (РВС), а именно деградацию их механических качеств, которая провоцирует их деформацию и внушительный финансовый урон. В соответствии с [3], в чрезвычайных случаях совокупный урон может быть выше первичных расходов по возведению в 500 раз, а то и еще больше. Итак, в современных условиях по-прежнему не решена проблема создания условий для того, чтобы промышленное оборудование функционировало в безаварийном режиме.

Важно подчеркнуть, что для решения означенной задачи следует тщательно исследовать напряженно-деформированное состояние конструкций, проведя расчетные задачи на прочность, а также задействовав для этих целей специализированные диагностические методы. Нужно отметить, что количество повреждений в процессе эксплуатации механизмов увеличивается в частях конструкции, в которых в силу особенностей конструктивного свойства присутствует наибольшее число дефектов, возникших при их производстве, либо во время проведения ремонтно-монтажных работ. Наличие внутренних дефектов в металле обеспечивает условия, при которых в ускоренном режиме развивается пластическая деформация, а также формируются концентраторы напря-

жений, в результате чего эксплуатационный срок сокращается, а вероятность возникновения аварии возрастает. Ввиду этого следует говорить о существовании практической необходимости относительно разработки методов и инструментария по оцениванию состояния активно используемых объектов промышленного сектора.

В современных реалиях для того, чтобы создать условия безопасного использования техники, осуществляется задействование методов неразрушающего контроля (в частности, ультразвукового, магнитного, вихретокового). С их помощью можно диагностировать конструкционные материалы на предмет обнаружения приповерхностных и поверхностных дефектов. В то же время, для того, чтобы задействовать означенные методики контроля необходимо просканировать поверхность, в результате чего они сталкиваются с рядом ограничений в ходе диагностирования значительной части объектов промышленной деятельности в реальном времени. В качестве одного из возможных способов разрешения задачи, поставленной данной работой, на наш взгляд, следует выстроить системы диагностического мониторинга, в основе которых лежит метод акустической эмиссии (АЭ). Посредством данного метода можно как обнаружить дефекты с активным развитием, так и классифицировать их по мере опасности деформации или уничтожения объекта, находящегося под контролем. Но, во-первых, для актуальных методов АЭ необходима определенная схема нагружения, при которой превышает рабочее давление, а, во-вторых, их невозможно применять в рамках режима мониторинга. В то же время одна из ключевых задач заключается в изучении характеристик потока, содержащего шумовые сигналы, которые образуются в результате развития усталостных повреждений. Важно подчеркнуть, что львиная доля актуальных критериальных параметров и методов оценивания состояния объектов промышленной деятельности создана для рабочих условий, которые отличаются тем, что при них статической нагрузке отводится роль главной воздействующей силы. Следовательно, для того, чтобы повысить достоверность мониторинга методами АЭ, требуется провести внедрение дополнительных методов, связанных с фильтра-

цией акустических сигналов, а также сформировать линейку важных критериев оценивания состояния находящегося под контролем объекта, которые согласовывались бы с ключевыми фазами развития усталостных повреждений.

**Цель исследования:** исследование стадийности накопления усталостных повреждений конструкционных материалов.

**Задачи исследования:**

- рассмотреть процесс усталостного разрушения конструкционных материалов;
- определить роль поверхностного слоя в процессе усталостного разрушения;
- провести мониторинг развития усталостных повреждений;
- выявить проблему оценки технического состояния и надежности металлоконструкций;
- провести исследование кинетики развития дефекта при изменении параметров схемы нагружения;
- выявить закономерности изменения параметров при развитии УТ;
- определить аспекты влияния ориентации усталостной трещины на параметры потока данных;
- разработать алгоритм разделения стадий развития усталостных трещины;
- оценить вероятность выявления усталостных трещин в зависимости от свойств объекта контроля.

**Методика и методология исследований.** С целью построения математической модели развития усталостных трещин (УТ) на основании критериальных параметров акустических импульсов, регистрируемых в процессе АЭ мониторинга, проводились циклические испытания плоских образцов с надрезом из конструкционной стали (09Г2С) на сервогидравлической установке Instron 8808. Параметры режима нагружения выбирались, исходя из условий эксплуатации реальных промышленных объектов. Определение размеров усталостных трещин при их росте осуществлялось с применением специально разработанной эндоскопической видеокамеры. Подготовка образцов и проведение фракто-

графического анализа структуры усталостного разрушения образцов осуществлялось при помощи специализированного оборудования. При сопоставлении результатов АЭ мониторинга и кинетики роста трещины использовались методы статистического анализа данных.

**Научная новизна:**

- экспериментально подтверждена взаимосвязь между критериальными параметрами накопленных «полезных» АЭ сигналов и стадиями развития усталостной трещины;
- проведена оценка влияния микроструктуры стали на динамику изменения АЭ параметров при развитии усталостной трещины.

**Структура работы:** диссертация разделена на четыре главы.

Первая глава носит теоретический характер, в которой представлены основы мониторинга усталостных дефектов, в частности определена роль поверхностного слоя в процессе усталостного разрушения, проведен мониторинг развития усталостных повреждений, а также определена проблема оценки технического состояния и надежности металлоконструкций.

Во второй главе представлены материалы и методы исследования: представлены оборудование, аппаратура, а также методика проведения испытаний.

Третья глава работы носит исследовательский характер, в которой представлено исследование параметров, зарегистрированных на основных стадиях развития усталостных повреждений, в частности исследована кинетика развития дефекта при изменении параметров схемы нагружения, закономерности изменения параметров при развитии УТ, а также обосновано влияние ориентации усталостной трещины на параметры потока данных.

Четвертая глава посвящена обнаружению и классификации УТ по результатам диагностики. Здесь представлена разработка алгоритма деления стадий развития усталостных трещины, а также проведена оценка вероятности выявления усталостных трещин в зависимости от свойств объекта.

## Содержание исследования

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, ставятся цели и задачи, определяются методология исследования и научная новизна работы.

**В первой главе** представлены основы мониторинга усталостных дефектов, в частности определена роль поверхностного слоя в процессе усталостного разрушения, проведен мониторинг развития усталостных повреждений, а также определена проблема оценки технического состояния и надежности металлоконструкций.

В главе также определено, что для пластичных материалов микротрещины имеют главным образом порообразную, затупленную форму. Размер зародившейся микротрещины  $\approx 10^{-7} \div 10^{-6}$  м. Также приведена зависимость концентрации микротрещин от их размеров после разрыва образца - концентрация зародышевых микротрещин во много раз выше концентрации укрупненных микротрещин. Концентрация зародышевых микротрещин постоянно растет в процессе разрушения. Одновременно с зарождением протекает процесс укрупнения. Микротрещины приводят материал к разуплотнению. Подавляющая часть дефекта плотности сосредоточена в поверхностном слое толщиной порядка  $20 \cdot 10^{-6}$  м. Разуплотнение на поверхностях образца достигает 1%, в то время как в толще материал это значение в несколько раз меньше.

Приращения долговечности удалось достичь для образцов плоской формы, толщина которых равняется 14 мм, а ширина рабочего участка 40 мм, где присутствует концентратор, роль которого принадлежит отверстию (диаметр – 6,5 мм), вслед за предварительной наработкой 30% от нормативной долговечности с дальнейшим устранением поверхностного слоя самого пораженного материала на концентраторе напряжений. Поверхностный слой устранялся таким образом: отверстие растачивалось до 8,2 мм, другими словами, показатель толщины устраненного слоя равняется 0,85 мм. Долговечность была увеличена в условиях естественного роста уровня напряжений в результате того, что сечение образца было уменьшено.

С целью оценивания таких параметров, как долговечность и надежность, зависящих от напряжений, которые провоцируют вибрации, температура, давление и пр., можно задействовать модель «нагрузка - несущая способность», ключевой смысл которой состоит в том, что в условиях испытываемой нагрузки несущей способности системы свойственно поступательное сокращение вплоть до момента, пока система не ответит отказом.

На данный момент существует методика оценки вероятности отказа элемента, надежности и долговечности, основанная на структурно-энергетической теории отказов. Структурно-энергетическая теория отказов, позволяет легко оценить влияние структурных факторов (количества и размеров чувствительных структур материалов) на форму кривой функции распределения энергии разрушения, а, следовательно, на надежность элементов и на этой основе разработать конкретные рекомендации по технологическому обеспечению заданного уровня надежности и качества элементов.

**Во второй главе** представлены материалы и методы исследования: представлены оборудование, аппаратура, а также методика проведения испытаний.

В проведении испытаний относительно усталости участие принимала сервогидравлическая испытательная машина INSTRON 8801. Ее задействование дает возможность испытывать объекты в условиях двух режимов (статического, и динамического), когда предельное значение осевой нагрузки достигает отметки  $\pm 100$  кН. В качестве материала, который должен выступать как основа трубопроводов и резервуаров, необходимо использовать горячеканную или подвергнутую термической обработке углеродистую сталь, в связи с чем образцы для лабораторных испытаний были выполнены из марки стали 09Г2С. Расчет параметра максимальной нагрузки осуществлялся с использованием известных геометрических размеров металлического образца для трех значений эквивалентных напряжений –  $90\% \sigma_{раб}$ ,  $100\% \sigma_{раб}$ ,  $110\% \sigma_{раб}$ . В лабораторных условиях в совокупности было осуществлено 40 испытаний, связанных с циклическим разрушением образцов из металла, основой которых выступила сталь марки 09Г2С, при которых были задействованы разные схемы нагружения.

В рамках контролирующей методики с задействованием АЭ применяется метод создания локационной картины, которая требуется для того, чтобы установить координаты источника шумовых сигналов. Существует прямая связь между типом антенной решетки, численностью и дистанцией между преобразователями - с одной стороны, и геометрическими параметрами контролируемого объекта - с другой.

Далее, в процессе испытаний регистрация акустических сигналов осуществлялась при помощи промышленной системы A-Line 32D фирмы ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Для определения размеров усталостной трещины при циклическом нагружении металлических образцов применяется оптический метод неразрушающего контроля. При помощи эндоскопической камеры каждые 5 секунд проводится съемка поверхности объекта контроля. Подготовка к исследованию микроструктуры начиналась с отрезания заготовки для микрошлифа на станке Buehler AbrasiMatic 300. Затем отрезанный фрагмент был запрессован в компаунд EpoMet методом горячей запрессовки на аппарате Buehler SimpliMet 1000. Запрессованный образец подвергался шлифованию на станке Buehler EcoMet 250. Для исследования микроструктуры использовали оптический микроскоп Zeiss Observer Z1m.

**В третьей главе** представлено исследование параметров, зарегистрированных на основных стадиях развития усталостных повреждений, в частности исследована кинетика развития дефекта при изменении параметров схемы нагружения, закономерности изменения параметров при развитии УТ, а также обосновано влияние ориентации усталостной трещины на параметры потока данных. Первым этапом исследования является определение закономерностей кинетики развития усталостных повреждений при различных значениях коэффициента асимметрии цикла ( $R$ ). Для решения поставленной задачи проведена серия экспериментов по циклическому нагружению металлических образцов при  $R=0, 0,25$  и  $0,5$ , для  $P_{max}=21$  кН и  $f=2$  Гц. В главе представлены характерные формы КДУР, зарегистрированные в процессе лабораторных испытаний. Следующим этапом работы является исследование зависимости стандартных АЭ параметров и ки-



нетики накопления повреждений от частоты нагружения ( $f$ ). Для решения поставленной задачи проведена серия лабораторных испытаний по циклическому нагружению металлических образцов при  $f=0,5, 1, 2$  и  $10$  Гц, а также  $P_{\max}=21$  кН,  $R=0$ . В процессе испытаний зарегистрированы как параметры акустических сигналов, так и длины усталостной трещины. Также в главе показаны зависимости размера трещины от номера цикла нагружения.

Согласно полученным в ходе лабораторных экспериментов результатам были построены кинетические диаграммы, их формы посредством кусочно-линейной функции представляется возможным аппроксимировать. Сопоставлены основные участки КДУР и параметры потока шумовых сигналов. Удалось отметить, что для этапа стабильного роста дефекта характерен низкоамплитудный поток импульсов АЭ.

Результаты дискриминантного анализа показывают, что средние значения АЭ параметров с вероятностью 95% не зависят от значений максимальной нагрузки цикла ( $P_{\max}$ ), коэффициента асимметрии цикла ( $R$ ) и частоты нагружения ( $f$ ). Проведено исследование «вторичных» источников АЭ, возникающих в процессе ветвления УТ. Появление их происходит в силу неоднородности структурного строения металла, которая имеет своим последствием перераспределение внутренних напряжений и возникновение «вторичных» источников. Характерной особенностью таких источников является локализованное во времени повышение амплитуд импульсов АЭ до 80дБ или повышение активности АЭ процесса более 10 имп/с.

**Четвертая глава** посвящена обнаружению и классификации УТ по результатам диагностики. Здесь представлена разработка алгоритма разделения стадий развития усталостных трещины, а также проведена оценка вероятности выявления усталостных трещин в зависимости от свойств объекта. В главе наглядно продемонстрированы различия значений  $\log_{10}(\sum u_m)$  на разных стадиях: когда УТ развивается стабильно и когда ее развитие ускоренно. Начальный этап (от 0 до  $0,55 n/n_{\text{разр}}$ ) нагружения образца: амплитудный параметр постепенно увеличивается, причиной чему служит стабильный рост дефекта. Пара-

метр  $\log_{10}(\sum u_m)$  уменьшается на следующем этапе (0,55-0,95  $n/n_{\text{разр}}$ ). Причиной подобного характера изменения кумулятивной амплитуды является то, что зона разрушения локализуется, а объем разрушения сосредотачивается в вершине УТ, вследствие чего возникает эффект акустического «затишья». Также определено, что в ходе усталостного разрушения образца происходит последовательное образование 4-х характерных кластеров. Акустические сигналы, которые были отмечены на этапе нагружения (0-0,55  $n/n_{\text{разр}}$ ), являются основой для формирования кластера (а). Кластер (б) возник после регистрации интервала акустического «затишья», в результате чего значения критериальных параметров понизились. Кластер (в) (он же «переходной») появился в результате увеличения нагружения (0,90-0,95  $n/n_{\text{разр}}$ ), при котором критериальные параметры плавно повышались.

Также среди основных параметров, благодаря которым вероятность обнаружения УТ понижается, выделены значения порога и показателя затухания шумовых сигналов. Проиллюстрирована существенная зависимость амплитудных распределений импульсов АЭ от протяженности акустического тракта. По мере того, как преобразователь АЭ удаляется от источника, происходит довольно существенное сокращение максимальной амплитуды импульсов АЭ. При сценарии, когда дефект проходит стадию стабильного роста, порог дискриминации импульсов АЭ равен 40 дБ, а приемные преобразователи располагаются в 1 и 5 метрах, то вероятности обнаружения УТ характеризуются значениями, которые равняются 1 и 0,722 соответственно. Если речь идет об аналогичных условиях, но рассматривается стадия ускоренного развития дефекта, то показатель его обнаружения демонстрирует значение 1.

### **Основные выводы и результаты исследования**

1. С помощью сравнительного анализа, который произведен над результатами фрактографического анализа и АЭ данными, можно прийти к сопоставлению отличительных черт, присущих структуре материала и АЭ параметрам. В связи с тем, что в центральной части (по толщине) изделия имеются перлитные полосы, которые отличаются совпадением с направлением проката,

возникают дополнительные концентраторы напряжений. Поэтому уровень средней АЭ активности возрастает до 10 имп/цикл.

2. Начальный этап развития дефекта, во время которого изделию присущ довольно низкий уровень деформации, характеризуется возникновением эффекта Элбера, или смыкания берегов УТ. Результаты обработки шумовых сигналов позволяют установить, что означенный процесс провоцирует возникновение «вторичных» источников АЭ. Исходящие от них сигналы способны достигать 70 дБ, в связи с чем, процедура диагностики и оценивания состояния объекта, находящегося под контролем, затрудняется.
3. Создан механизм, связанный с фильтрацией «вторичных» источников АЭ, которые являются помехой при процедуре диагностики. В основе способа лежит непараметрическая статистика Колмогорова-Смирнова. Именно по ее значениям осуществляется определение момента разладки амплитудного распределения.
4. Также удалось создать методику оценивания стадии развития дефекта, в основе которой лежит размежевание кластеров, которые соответствуют ускоренному и стабильному росту УТ.
5. Произведен расчет вероятности обнаружения УТ при условии, что амплитуда акустических сигналов отличается разными значениями, а приемный преобразователь находится на удалении от места, где пребывает источник АЭ. В ходе исследования параметра выявляемости дефекта, оказалось, что на этапе стабильного роста вероятность обнаружения повреждения, превысившую отметку в 95%, удалось отметить, когда приемный ПАЭ располагался в 2 м от источника, а значение порога достигало 40 дБ.

## **Основные публикации по теме исследования**

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.