

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет»

На правах рукописи

Костюченко Александр Владимирович

**Разработка технологии определения остаточного ресурса  
конструкционных материалов по регистрируемым параметрам  
акустической эмиссии**

Направление подготовки  
22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель

доктор технических наук,  
доцент Башков Олег Викторович

Рецензент

кандидат технических наук,  
Штанов Олег Викторович

Защита состоится «\_\_\_» июня 2019 года в \_\_\_ часов \_\_\_ мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. ...

Автореферат разослан \_\_\_ июня 2019 г.

Секретарь ГЭК

Белова Инна Валерьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Значительное увеличение межремонтных сроков оборудования и сооружений промышленных предприятий, отсутствие достаточных объемов инвестиций в промышленность, привели к катастрофическому старению основных фондов промышленных предприятий и резкому снижению ресурса оборудования и сооружений.

Указанные обстоятельства ставят целый спектр задач по оптимизации процесса эксплуатации, изыскания резервов эксплуатационной пригодности оборудования и продления срока их эксплуатации.

Эти задачи легко решаемы при правильной и достоверной оценке остаточного ресурса эксплуатируемого объекта. В настоящее время оценка остаточного ресурса производится методами *статистического* анализа и является достаточно простым процессом, не требующим большого количества исходных данных, но такая методика позволяет оценить только минимальный остаточный ресурс с достаточно большой погрешностью, т.к. не учитываются локальные изменения материала.

Актуальной является задача разработки метода достоверной оценки *фактического* состояния материалов при прогнозировании ресурса оборудования.

**Целью** данной работы является разработка метода определения остаточного ресурса конструкционных материалов по регистрируемым параметрам акустической эмиссии (АЭ).

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **основные задачи исследования:**

- 1) анализ различных методов оценки остаточного ресурса;
- 2) анализ параметров АЭ для оценки предельного состояния и определения остаточного ресурса;
- 3) определение механизмов деформации и разрушения материалов с использованием метода акустической эмиссии;

4) установление влияния структурных и внешних факторов на АЭ излучение в процессе деформации и разрушения;

5) разработка алгоритма определения остаточного ресурса по регистрируемым параметрам АЭ.

**Объектом** исследования является процесс прогнозирования технического состояния объектов.

**Предметом** исследований является закономерность между параметрами АЭ и остаточным ресурсом объекта.

**Методы исследования** основаны на современных понятиях о накоплении повреждений в материалах и прогнозировании его предельных характеристик. Обработка результатов проводилась с помощью амплитудного, интегрального, локально-динамического, интегрально-динамического критериев. Анализ и оценка остаточного ресурса проводилась при помощи вероятностных методов расчета ресурса, параметрических методов оценки текущего состояния и остаточного ресурса металлоконструкций на основе метода неразрушающего контроля, метода оценки ресурса с использованием диффузионного распределения.

**Новизна полученных результатов:**

- установлено наличие связи параметров интегрального накопления сигналов АЭ с поврежденностью и долговечностью материалов конструкций;
- разработан алгоритм определения остаточного ресурса по регистрируемым параметрам АЭ.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования.**

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность с данными теоретических исследований.

## **Практическая значимость и ценность работы**

Представлены алгоритм и методика определения остаточного ресурса объектов из конструкционных материалов по регистрируемым параметрам акустической эмиссии.

**Личный вклад автора** заключается в анализе различных методологических подходов определения остаточного ресурса конструкционных материалов по регистрируемым параметрам АЭ, а так же в систематизации информации о влиянии структурных и внешних факторов на АЭ излучение в процессе деформации и разрушения.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- алгоритм определения остаточного ресурса по регистрируемым параметрам АЭ;
- закономерность между параметрами АЭ и остаточным ресурсом объекта.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, изложены основные направления проведённых исследований, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первом разделе** представлен обзор литературных данных, посвящённых методике определения и оценки технического состояния объектов, рассмотрена классификация методов оценки остаточного ресурса.

**Во втором разделе** диссертационной работы произведен анализ параметров и критериев акустической эмиссии, определены механизмы деформации и разрушения материалов с использованием метода акустической эмиссии, описана методика проведения испытаний оборудования.

Все критерии оценки построены на принципе выделения из общего потока АЭ информации отдельных источников, т.е. локальные участки (при этом желательно как можно меньшего размера), в которых происходит излучение АЭ сигналов. Если же отдельные источники малого объема

выделить сложно, то приходится оценивать рассредоточенные источники, т.е. относительно большие области, например, участок дефектной структуры наплавки и т.п.

Следует отметить, что выбор критериев – дело достаточно сложное и для правильной оценки состояния объекта требуется, как правило, проведение предварительных испытаний.

Данные по параметру скорости счета  $\dot{N}$  для различных металлов и сплавов были классифицированы по схеме, представленной на рисунке 1 (а – з).

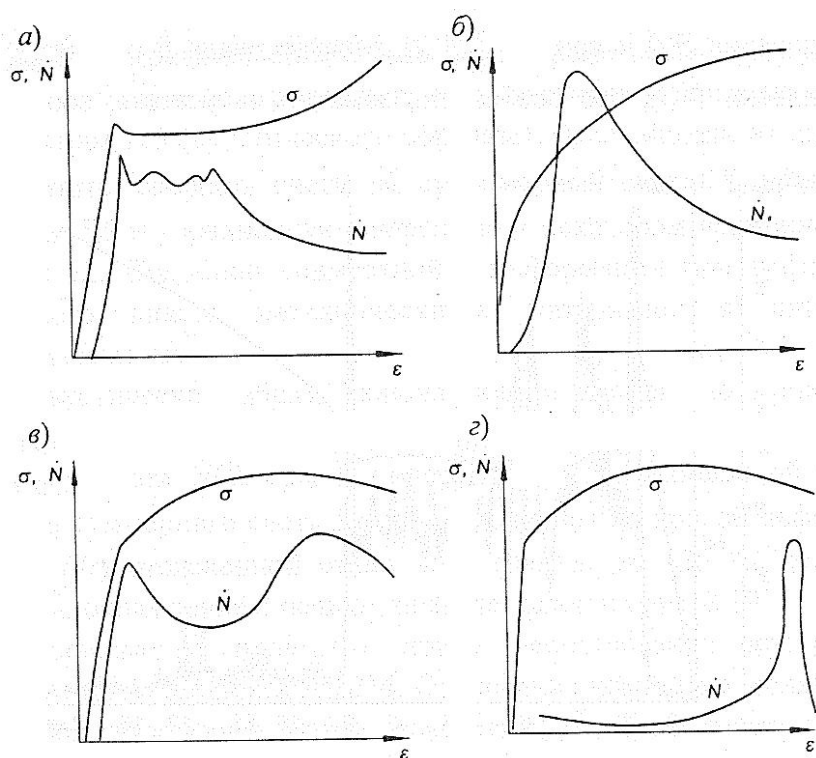


Рисунок 1 – Типичные примеры зависимости скорости счёта  $\dot{N}$  и напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$

Зависимость, представленная на рисунке 1, а, наблюдается обычно при деформации отожженных или нормализованных углеродистых сталей, поликристаллическом или монокристаллическом железе и ряде других металлов и сплавов, для которых характерно наличие площадки текучести на диаграмме нагружения. Начало возрастания скорости счета  $\dot{N}$  приходится на переходную от упругой к пластической области кривой нагружения. Максимум  $\dot{N}$  приходится на площадку текучести и имеет вид зубчатой

кривой с несколькими максимумами, которые обычно связывают с локализацией пластической деформации и градиентом напряжений по длине образца. В области упрочнения АЭ практически исчезает и незначительно проявляется перед самым разрывом образца.

Для закаленных углеродистых сталей и других металлов с параболическим законом упрочнения характерен тип зависимости в виде кривой с одним максимумом (рисунок 1, б). В этом случае кривая деформации  $\sigma(\varepsilon)$  не имеет видимой зубчатости и кривая  $\dot{N}(\varepsilon)$  также является практически гладкой. Отдельные зубцы на кривой связаны обычно с разрушением включений. Максимум на кривой  $\dot{N}(\varepsilon)$  отвечает началу деформационного упрочнения.

При деформировании металлов и сплавов, содержащих прочные и хрупкие компоненты, способные к разрушению или отделению от матрицы при высоких степенях концентрации локальных деформаций, имеет два пика на кривой  $\dot{N} = f(\varepsilon)$  (рисунок 1 в). Один пик приходится на начальную стадию деформирования, а другой на область упрочнения.

Четвертый тип зависимости  $\dot{N}(t)$  (рисунок 1, г) отличается полным отсутствием АЭ вплоть до разрушения или разрыва образца. Подобный тип характерен, например, для коррозионностойких (нержавеющих) сталей. Однако, как отмечено в работе, этот тип связан не с особенностями протекания пластической деформации в этих сталях, а с использованием аппаратуры, обладающей низкой чувствительностью.

Описано влияние на АЭ излучение в процессе деформации таких структурных факторов, как: тип решетки, энергия дефекта упаковки, размер зерна; также описано влияние таких внешних факторов, как: скорость деформации, длина и объем, температура, характер напряженного состояния.

**В третьем разделе** диссертационной работы представлены результаты исследования прогнозирования предельных характеристик по параметрам акустической эмиссии при статическом нагружении конструкционных материалов, предложены гипотезы накопления повреждений в материалах

и прогнозирование его предельных характеристик при воздействии циклических напряжений, предложен алгоритм определения остаточного ресурса при регистрации параметров АЭ.

Дано предположение, что характеристики предельного состояния материалов определяют его несущую способность и зависят от комплекса факторов морфологического и технологического происхождения. К таким факторам относят деградацию структуры металлического изделия, образование в нем внутренних напряжений и, как следствие, образование микро несплошностей в виде микротрещин и микропор. Важно отметить, что образование и рост локальной поврежденности материала протекает как на стадии изготовления образца или изделия, так и на стадии его эксплуатации или испытаний, особенно усталостных. При получении изделия металл проходит стадии кристаллизации, деформирования, термообработки и подвергаются другим воздействиям, при которых возможно образование в материале локальных зон с повышенной концентрацией микронесплошностей. Таким образом, априорно можно утверждать, что изделия или образцы, изготовленные из одного и того же материала и прошедшие идентичные операции обработки, обладают, в общем случае, различными механическими свойствами и их предельное состояние, то есть величина максимальных напряжений, приводящих к разрушению материала, является величиной неопределенной в каждом конкретном случае.

Большинство конструкций и их элементов работают в режиме циклических нагрузок, создающих в материале определённые напряжения. Можно предположить, что за каждый цикл нагружения в материале накапливается определенное число повреждений.

Было предложено несколько гипотез накопления повреждений (рисунки 2, 3, 4, 5).



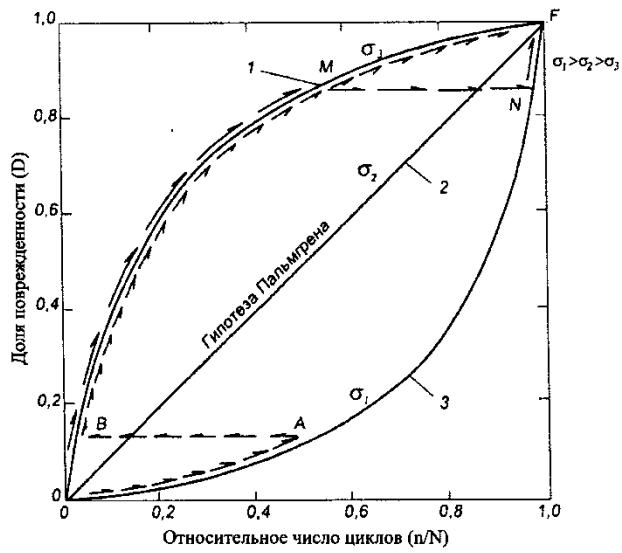


Рисунок 2 – Зависимость доли поврежденности  $D$  от относительного числа циклов  $n/N$

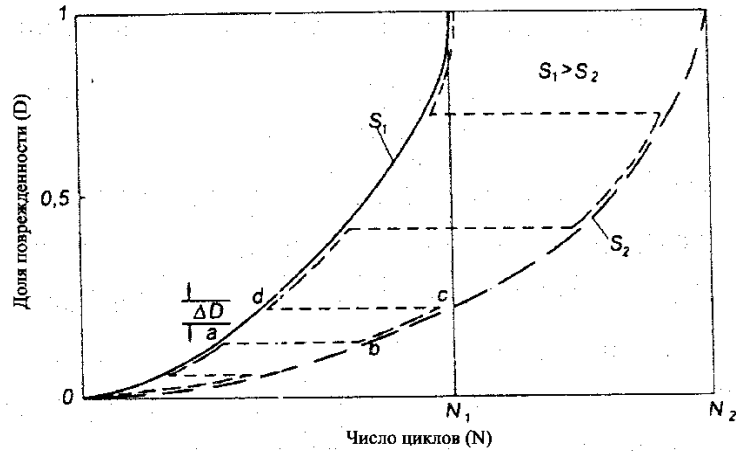


Рисунок 3 – Кривые зависимости поврежденности от числа циклов для двух различных уровней напряжений

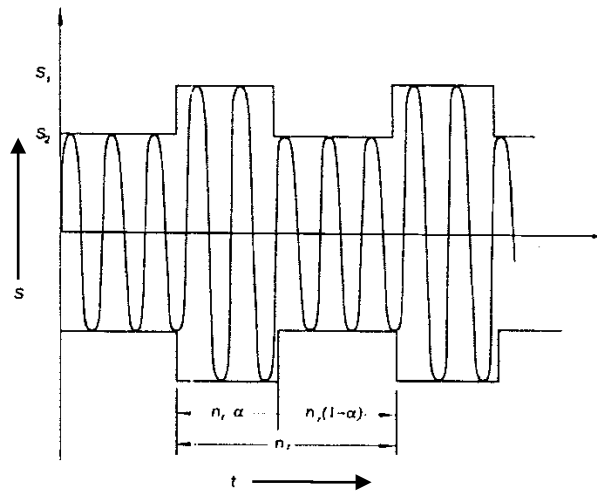


Рисунок 4 – Спектр циклических напряжений двух уровней

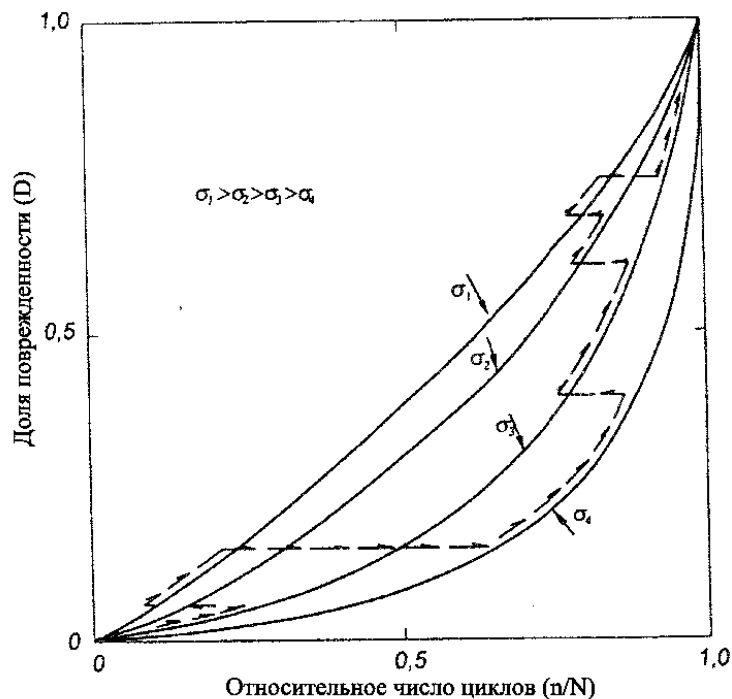


Рисунок 5 – Траектория повреждаемости при последовательном действии различных циклических напряжений

Предложен способ определения остаточного ресурса по параметрам АЭ (рисунок 6).

В качестве информативного параметра была выбрана скорость счета (интенсивность  $\dot{N}$ ) АЭ. С точки зрения практического приложения выбрана активность АЭ  $\dot{N}\Sigma$ , временной интервал отнесения которой выбирается исходя из конкретных условий исследования.

Выведено аналитическое выражение  $N(t)$ , которое позволяет отразить тенденцию изменения процесса разрушения, качественно определить состояние диагностируемого объекта на данный момент времени и дает возможность оценивать остаточный запас работоспособности (ресурс) объекта по данным измерений активности АЭ.

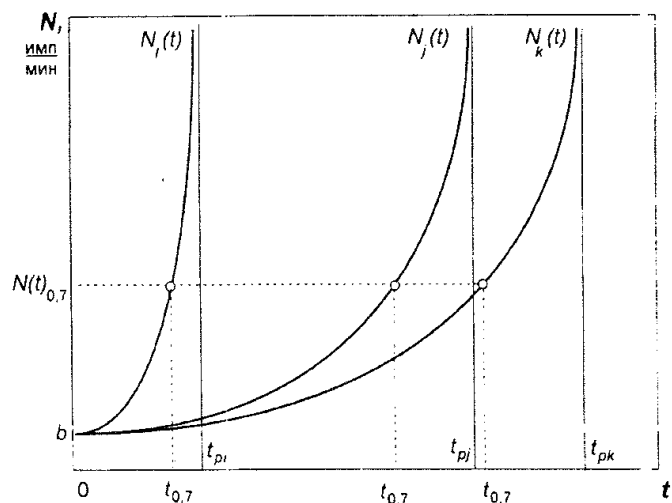


Рисунок 6 – Графическая иллюстрация определения диагностических уровней

Были рассмотрены два варианта развития событий, которые могут развиваться при эксплуатации изделия (рисунок 7).

Первый – постоянно ведется журнал нагружения материала, периодически проводятся испытания объекта с регистрацией параметров АЭ, и эта информация используется в дальнейшем в расчете остаточного ресурса. То есть, если информация полная: есть информация по числу циклов, напряжению которое испытывает объект при нагружении в процессе всего своего периода эксплуатации, а так же во время проведения испытаний производится регистрация параметров АЭ, тогда проводя последующий анализ, основываясь на тенденции изменения параметров АЭ, которые регистрируются при испытании, мы можем определить – на какой стадии накопления повреждений объект находится.

Тем самым, опираясь на уже известный график изменения АЭ в период накопления усталостных повреждений, либо в процессе статического испытания, взятый из предварительно созданной базы данных (статистическая информация о разрушении материала, проведение исследований материалов при статических и циклических нагрузках при регистрации параметров АЭ), можно воссоздать картину прогнозируемого изменения АЭ и, соответственно, рассчитать остаточный ресурс.

Второй – отсутствует информация о числе циклов, напряжении, которое испытывает объект при нагружении в процессе всего своего периода эксплуатации, а регистрация параметров АЭ при испытаниях не осуществлялась. В этом случае, на момент выполнения обследования объекта контроля прогнозирование предлагаемыми методами не представляется возможным при отсутствии необходимой информации. Предлагается провести первичные испытания с регистрацией параметров АЭ (отправная точка), а расчет остаточного ресурса произвести основываясь на характере (классе) источника АЭ. В дальнейшем за весь срок разрешенной эксплуатации необходимо фиксировать количество циклов нагружения и напряжение с фиксацией параметров АЭ, что позволит проследить динамику изменения параметров АЭ. В свою очередь, при дальнейших испытаниях, при расчете остаточного ресурса мы сможем опираться на накопленную за межиспытательный период информацию для соотнесения с базой данных.



Рисунок 7 – Алгоритм определения остаточного ресурса при регистрации параметров АЭ

## **Заключение**

АЭ контроль получает все более широкое распространение в нашей стране. Достоинства метода, такие как интегральность, слабое влияние ориентации объекта и качества его поверхности на результаты контроля, возможность определения степени опасности, обуславливают его применение во многих отраслях промышленности.

В настоящее время АЭ метод применяют при диагностике состояний котлов, цистерн, сосудов и аппаратов, работающих под давлением, и ряда других объектов.

Эксплуатация АЭ комплексов и систем, даже при полной автоматизации всех операций контроля, требует соответствующих знаний и навыков, чтобы вовремя обнаружить неисправности, определить работоспособность ПАЭ, предварительных усилителей, соединительных коаксиальных кабелей, изменить настройки в случае возникновения нестандартных ситуаций.

В магистерской работе была установлена связь параметров интегрального накопления сигналов АЭ с поврежденностью и долговечностью материалов конструкций, путем выведения аналитического выражения  $N(t)$ , которое позволяет отразить тенденцию изменения процесса разрушения, качественно определить состояние диагностируемого объекта на данный момент времени и дает возможность оценивать остаточный запас работоспособности (ресурс) объекта по данным измерений активности АЭ.

Был предложен алгоритм для практического применения при определении остаточного ресурса диагностируемых объектов на опасных производственных объектах, к примеру, во время проведения экспертизы промышленной безопасности.