

УДК 620.199.001.18

Т.Д. Ахметшин, В.В. Носов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭТАПА ОДНОРОДНОГО РАЗРУШЕНИЯ

T.D. Akhmetshin, V.V. Nosov

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF CONSTRUCTION MATERIALS FOUNDED IN THE PHASE OF HOMOGENEOUS DESTRUCTION

Статья посвящена проблеме определения ресурса технических объектов, которая сводится к нахождению времени, оставшегося до наступления их предельного состояния, неразрушающим методом — на основании анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ) с позиции микромеханической модели разрушения и временных параметров АЭ.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. ОДНОРОДНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. РЕСУРС. МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

The article is devoted to the problem of determining a resource of technical objects, which boils down to finding the time remaining before their limiting state, non-destructive method for the analysis of acoustic emission (AE) from a position of micro-mechanical models of destruction and time parameters of AE.

NON-DESTRUCTIVE TESTING. ACOUSTIC EMISSION. HOMOGENEOUS DESTRUCTION. RESOURCE. MICROMECHANICAL MODEL.

Надежность технических объектов зависит от точности оценки их ресурса. Оценка ресурса технического объекта сводится к нахождению времени, оставшегося до наступления его предельного состояния. Существует большое количество методов разрушающего и неразрушающего контроля для решения данной проблемы. К недостаткам существующих методик контроля разрушения можно отнести:

низкую точность оценки, поскольку методики основаны на неадекватных моделях (дают качественную оценку; занижают значение остаточного ресурса при неучете неоднородности состояния), статистически неустойчивы и имеют повышенную чувствительность к помехам (не учитывают изменения условий регистрации сигналов АЭ во время контроля, завышают значение ресурса в случае их отсутствия);

трудоемкость, так как требуют проведения обучающего эксперимента и определения регрессионных зависимостей вследствие недостаточной физической обоснованности и базирования на статистических моделях;

они не дают долгосрочного прогноза остаточного ресурса, поскольку основаны на регистрации только заключительной стадии разрушения (следствие пренебрежения микромеханическими аспектами разрушения и АЭ-излучения).

В предлагаемой статье рассматривается метод нахождения времени до разрушения на основании анализа сигналов акустической эмиссии, полученных в результате испытаний опытных образцов. Методика обладает повышенной точностью. Предложенные АЭ-показатели тесно связаны с определяющим прочностью процессом, статистически устойчивы к помехам регистрации. Снижена неопределенность в оценке класса источника сигналов АЭ. Методика проста в применении, реализуется без обучающего эксперимента, универсальна и унифицирована, так как диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов. Главное достоинство данного метода — возможность оценки ресурса объекта на основании информации, полученной неразрушающим методом на месте эксплуатации. Ис-

пользуемые физическая и математическая модели не зависят от множества внешних факторов, — это упрощает модель, делает ее наиболее точной.

Описание задачи

Основная задача — достичь максимально возможной точности определения времени до разрушения. Программа, разработанная применительно к данной задаче, использует для аппроксимации этап однородного разрушения, определение которого способствует увеличению точности метода.

Одна из основных причин нарушения работоспособности и уменьшения ресурса конструкций и деталей машин — развитие в их материале процесса накопления повреждений. Для описания этого процесса используется микромеханическая модель разрушения, согласно которой временная зависимость поврежденности материала в условиях мелкодисперсного роста концентрации микротрещин C имеет следующий вид:

$$C(t) = C_0 \left(1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta_{cp}(\bar{t})} \right] \right), \quad (1)$$

где t — текущее время; C_0 — начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; Θ_{cp} — среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова, при начальном условии $C(0) = 0$.

Формула Журкова в условиях растяжения при постоянстве напряжения имеет вид

$$\Theta_{cp} = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right), \quad (2)$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$, с, — период атомных колебаний; U_0 — энергия активации процесса разрушения; γ — структурно-чувствительный коэффициент; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Из-за неоднородности структурного и напряженного состояний материала среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае неодинаковы. Таким образом, для различных элементов параметр Θ принимает различные значения. Для характеристики неоднородности

состояния материала вводится функция $\Psi(\gamma)$ распределения параметра γ по структурным элементам. В качестве функции $\Psi(\gamma)$ в зависимости от степени неоднородности материала используются различные распределения. В нашей работе при описании разрушения образцов сварных соединений рассматриваются два из них (рис. 1):

ограниченное вейбулловское распределение с параметрами k, λ, q

$$\Psi(\gamma) = \begin{cases} 0, \lambda \in [0, q), \\ A \left(\frac{k}{\lambda} \right) \left(\frac{\gamma}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(\left(- \frac{\gamma}{\lambda} \right)^k \right) \gamma \in [q, \infty); \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{\int_q^\infty \left(\frac{k}{\lambda} \right) \left(\frac{\gamma}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(\left(- \frac{\gamma}{\lambda} \right)^k \right) d\gamma};$$

логарифмически-нормальное распределение с параметрами σ_z, μ

$$\psi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z\gamma} \exp \left[- \frac{(\ln(\gamma) - \mu)^2}{2\sigma_z^2} \right]. \quad (4)$$

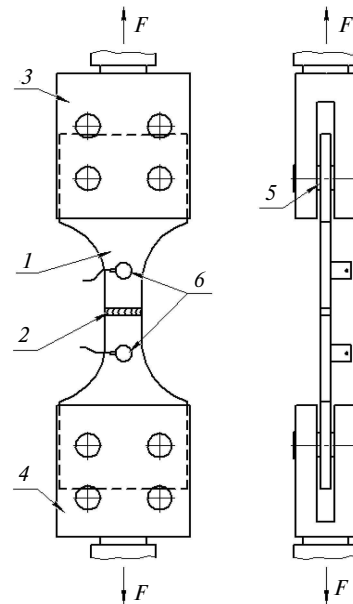


Рис. 1. Схема нагружения образца: 1 — образец; 2 — сварной шов; 3 — верхний захват нагружающего устройства; 4 — нижний захват нагружающего устройства; 5 — палец; 6 — ПАЭ

Зависимость концентрации микротрещин от времени для неоднородного материала можно представить в виде

$$C(t) = C_0 \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma, \quad (5)$$

где γ_{\min} и γ_{\max} — минимальное и максимальное значения γ для данного распределения $\Psi(\gamma)$.

Переход к макроscopicкому разрушению материала происходит, когда число разрушенных структурных элементов достигает 0,01 от числа начальных: $C/C_0 = 0,01$. Время до разрушения τ^* находится из уравнения

$$\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp \left(- \int_0^{\tau^*} \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma = 0,01. \quad (6)$$

Для вычисления времени до разрушения технического объекта необходимо определить значения величин, входящих в уравнение (6). Необходимо знать зависимость напряжения от времени, температуру, величину энергии активации U_0 (постоянна для конкретного материала) и параметры функции $\Psi(\gamma)$. Для нахождения последних используется регистрация сигналов АЭ при нагружении объекта контроля в области упругих деформаций. Число сигналов АЭ $N_{\Sigma}(t)$ пропорционально числу разрушенных структурных элементов:

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C(t),$$

или

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \psi(\gamma) \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma, \quad (7)$$

где k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент (может быть принят постоянным при нагружении с постоянной скоростью в области упругих деформаций).

Параметры функции $\Psi(\gamma)$ находятся путем аппроксимации экспериментальной зависимости числа импульсов АЭ от времени теоретической кривой (7). Далее определяется время до разрушения технического объекта из уравнения (6).

Описание эксперимента

В работе предполагалось определение параметров функции $\Psi(\gamma)$ для образцов стыковых сварных соединений. Материал пластин — сталь СтЗпс; сварка — ручная и автоматическая в среде углекислого газа. Образцы испытывались на растяжение с постоянной скоростью роста деформации, при этом регистрировались сигналы АЭ. Нагружение образцов производилось следующим образом (рис. 1). Концы образца 1 закреплялись в захватах 3 и 4 испытательной установки посредством пальцев 5. Верхний захват 3 оставался неподвижным, а нижний захват 4 перемещался вертикально вниз с постоянной скоростью. Сила, приложенная к образцу, определялась по шкале установки (цена деления шкалы 3000 Н). Для регистрации сигналов АЭ была использована двухканальная акустико-эмиссионная система СДАЭ-16(2), которая состояла из двух преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) типа П113с, предварительных усилителей, блока регулирования усиления, блоков обработки сигналов АЭ, блока управления и компьютера. Принцип работы одного ее канала следующий: акустический сигнал, возникающий в материале образца при его нагружении, превращается пьезоэлектрическим преобразователем в электрический импульс, который подвергается усилению и обработке, после чего информация поступает в компьютер, где отображается в виде таблицы данных и графиков зависимости от времени различных параметров АЭ сигнала. Регистрировались число импульсов АЭ, их амплитуда, энергия, длительность, суммарный счет АЭ и время нарастания сигнала.

Рабочий диапазон частот аппаратуры составлял 20–1000 кГц, эффективное значение напряжений собственных шумов усилительного тракта, приведенное ко входу предварительного усилителя, не превышало 5 мкВ. Нижний уровень порога дискриминации системы определялся необходимостью устранения электромагнитных помех и составлял 47 дБ на каждом канале. Для регистрации сигналов были выбраны преобразователи с диапазоном частот 20–500 кГц.

Для обработки первичных данных АЭ испытаний, определения коэффициентов микромеханической модели разрушения предназначена программа RG, состоящая из нескольких макросов Microsoft Excel.

Одним из этапов выполнения работы является нахождение интервала для аппроксимации. Требуется выбрать линейный участок зависимости логарифма числа импульсов от времени (этап однородного разрушения), а также разработать методологию нахождения данного участка. Были произведены испытания 30-ти образцов и проанализированы: временная зависимость числа импульсов, логарифм числа импульсов, длительность импульсов, коэффициент перекрытия импульсов (вычисляется как отношение суммарной длительности импульсов в течение интервала времени к величине этого интервала), амплитуда, коэффициент вариации амплитуды, параметр $K_{пт}$ (отношение активности АЭ к средней длительности импульсов). В результате анализа и выявления зависимостей выделены следующие задачи этапов нахождения начальной и конечной точек прямолинейного участка:

а) найти на графике зависимости длительности импульсов АЭ от времени момент t_1 , когда наблюдается резкий рост длительности импульсов (свидетельствует о начале пластического деформирования);

б) найти на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени момент t_2 , соответствующий началу роста коэффициента перекрытия. Он свидетельствует о начале пластического деформирования, при котором происходит движение дислокаций, мелкие перестройки в структуре материала, а значит, большое количество «коротких» сигналов, которые накладываются друг на друга. Они сливаются, что

отражается в виде скачка на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени;

в) из двух значений времени (t_1 и t_2) выбрать меньшее.

Пример определения интервала времени для аппроксимации. Для одного из образцов стыковых сварных соединений:

а) резкий рост длительности импульсов наблюдается в момент времени $t_1 = 186$ с (см. рис. 2).

б) коэффициент перекрытия импульсов начинает расти в момент времени $t_2 = 175$ с (рис. 3).

в) $t_2 < t_1$ — для проведения дальнейших действий используем величину времени t_2 . Изменение характера сигналов АЭ указывает на появление пластической деформации материала образца в момент времени $t_2 = 175$ с.

Далее требуется найти первоначальную точку линейного участка (начало упругой деформации), для чего рассматриваем график зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени. На участке от 0 до t_2 (двигаемся от t_2 к 0) выделяем момент t_1 , в который происходит аномальный скачок коэффициента вариации амплитуды.

Скачок вариации амплитуд объясняется тем, что происходит разрушение связей с большим разбросом размеров, структур и напряжений. Разрушение неоднородно, а следовательно, возникают аномально большие амплитуды.

Полученный интервал вносится в макрос программы. Макрос строит теоретическую кривую зависимости числа импульсов АЭ от времени, используя в качестве функции $\Psi(\gamma)$ ограниченное вейбулловское распределение.

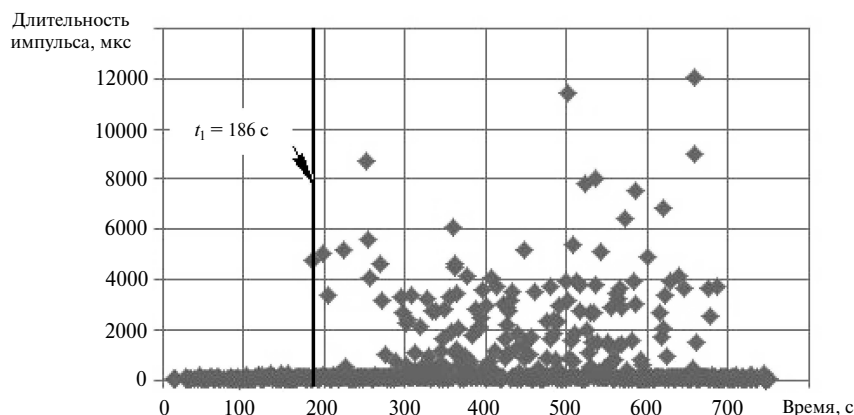


Рис. 2. Определение момента времени t_1 по графику зависимости длительности импульсов от времени

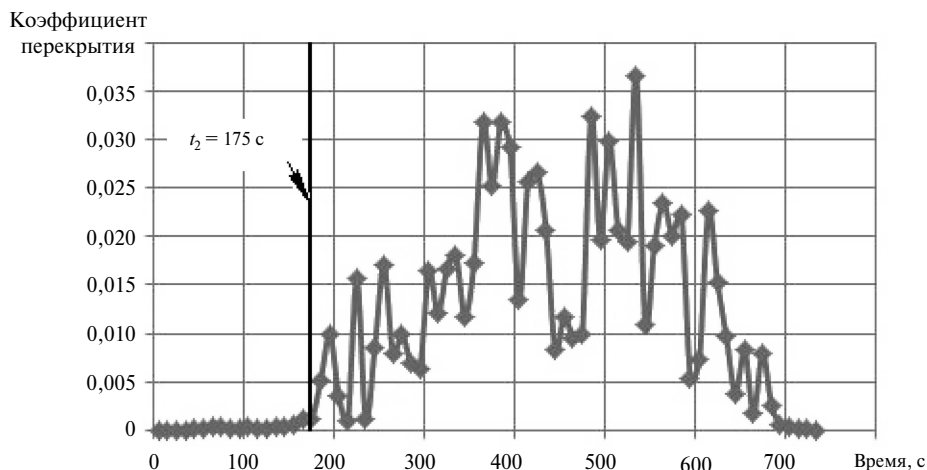


Рис. 3. Определение момента времени t_2 по графику зависимости коэффициента перекрытия импульсов от времени

Изменяя величину параметра λ , мы можем проследить за изменением среднего значения параметра γ распределения $\Psi(\gamma)$.

Путем изменения параметров λ , q и $k_{AE}C_0$ ($k = 3$ — одинаков для всех образцов) добиваемся совпадения теоретической и экспериментальной кривых $N_\Sigma(t)$. При этом величина «Средней ошибки аппроксимации» должна быть минимальной. При совпадении кривых получаем искомые значения параметров микромеханической модели разрушения.

Таким образом, нами был получен метод определения участка однородного разрушения; с его помощью увеличена точность определения

времени до разрушения объекта на 2 %. Сократилась погрешность (с 15 до 13 %), данный результат в пределах нормы. Мы убедились, что разработанная методика обладает повышенной точностью. На основе АЭ-показателей, напрямую связанных с определяющим прочностью процессом и статистически устойчивых к помехам регистрации, получены файлы MS Excel, представляющие собой базу, позволяющую выполнять различные вычисления по желанию пользователя. Мы убедились в простоте применения и универсальности методики, так как диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов.

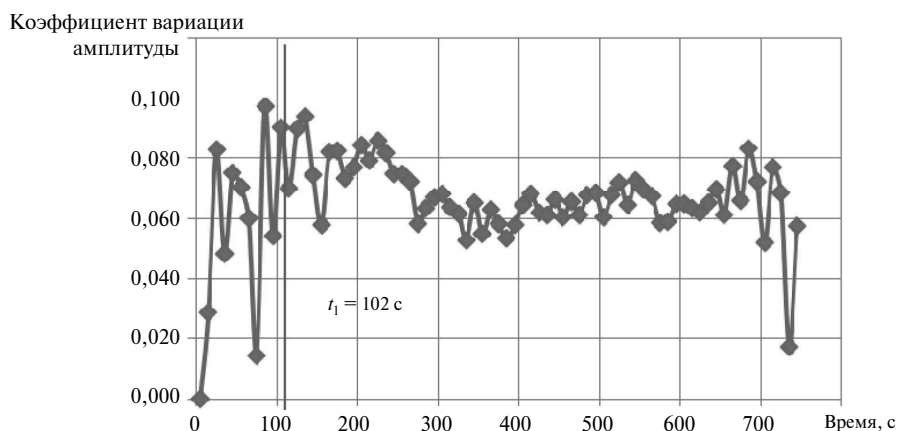


Рис. 4. Определение момента времени t_1 по графику зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов, В.В.** Методология оценки прочности и ресурса технических объектов с помощью метода АЭ [Текст] / В.В. Носов // Труды СПбГТУ. № 504.— 2007.— С. 119–132.
2. **Лахова, Е.Н.** Моделирование процесса перестройки структуры при пластической деформации сварных соединений металлоконструкций [Текст] / Е.Н. Лахова, В.В. Носов // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. Междунар. научно-практ. конф. 14–15 июня 2011 года, Санкт-Петербург.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 301–309.
3. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский.— М.: Наука, 1974.
4. **Носов, В.В.** Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов [Текст] / В.В. Носов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия.— 2004. № 2.— С. 53–61.
5. **Бураков, И.Н.** Оценка параметров процесса разрушения на основе компьютерного моделирования акустической эмиссии сварных соединений [Текст] / И.Н. Бураков // Моделирование акустической эмиссии гетерогенных материалов: Матер. междунар. науч. конф.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.— С. 38–39.

АХМЕТШИН Тимур Дамирович — студент VI курса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, Россия
akhmet-timur@yandex.ru

НОСОВ Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия
nosovvv@list.ru