
УДК 620.199.001.18

В. В. Носов

**ОЦЕНКА РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

UDC 620.199.001.18

V. V. Nosov

**THE ASSESSMENT OF THE RESOURCE OF TECHNICAL OBJECTS BASED
ON MODELING THE TIME DEPENDENCE OF PARAMETERS OF ACOUSTIC
EMISSION**

Аннотация

Рассмотрены проблемы определения ресурса технического объекта. Изложен метод нахождения времени до разрушения на основании анализа сигналов акустической эмиссии. В результате проведенных исследований увеличена точность методики определения ресурса на основе идентификации участка однородного разрушения.

Ключевые слова:

акустическая эмиссия, однородное разрушение, ресурс, диагностика, энергия, прочность, технический объект, моделирование.

Abstract

The paper deals with the problems of determining the resource of a technical object. The method of finding life time before failure based on the analysis of acoustic emission signals is presented. The research resulted in increasing the accuracy of methods for determining the resource based on the identification of the area of homogeneous destruction.

Key words:

acoustic emission, homogeneous destruction, resource, diagnostics, energy, strength, technical object, modeling.

Несмотря на то, что метод акустической эмиссии (АЭ) признан как наиболее информативный в отношении диагностики процесса разрушения, проблема оценки ресурса (времени до разрушения) ещё не решена [1]. В работе рассматривается метод нахождения времени до разрушения на основании развития изложенных в [2–6] идей.

Результаты разработок используются в экспертной деятельности при оценке промышленной безопасности объектов химической, нефтехимиче-

ской, нефтяной, газовой, пищевой отраслей [7].

Основной задачей являлась проверка возможности идентификации (выделения) участка однородного разрушения по статистическим признакам (вариациям значений параметров АЭ) и возможного повышения точности оценки ресурса. Программа, реализуемая в методике, использует для аппроксимации этап однородного разрушения, определение которого способствует увеличению точности метода.

Описание методики

Одной из основных причин нарушения работоспособности и уменьшения ресурса конструкций и деталей машин является 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:

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

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

и логарифмически-нормальное с параметрами σ_z, μ :

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

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

где τ_0 – период атомных колебаний, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с; U_0 – энергия активации процесса разрушения, γ – структурно-чувствительный коэффициент; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Из-за неоднородности структурного и напряженного состояния материала среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае неодинаковы. Таким образом, для различных элементов параметр Θ принимает разные значения. Для характеристики неоднородности состояния материала вводится функция $\Psi(\gamma)$ распределения параметра γ по структурным элементам, в которой в зависимости от степени неоднородности материала используются различные распределения. В работе при описании разрушения образцов сварных соединений рассматриваются два из них: ограниченное вейбулловское распределение с параметрами k, λ, q :

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 коэффициента γ для данного распределения $\psi(\gamma)$.

Переход к макроскопическому разрушению материала происходит, ко-

гда число разрушенных структурных элементов составляет 1 % от числа начальных: $C/C_0 = 0,01$. Время t^* до разрушения находят из уравнения

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

Для вычисления времени до разрушения технического объекта необходимо определить значения величин, входящих в (6), знать зависимость напряжения от времени, температуру, величину энергии активации U_0 (постоянна для конкретного материала) и пара-

метры 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 $\Psi(\gamma)$ находят путем аппроксимации экспериментальной зависимости числа импульсов АЭ от времени теоретической кривой (7). Далее из (6) рассчитывается время t^* до разрушения технического объекта.

В работе предполагается определе-

ние 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).

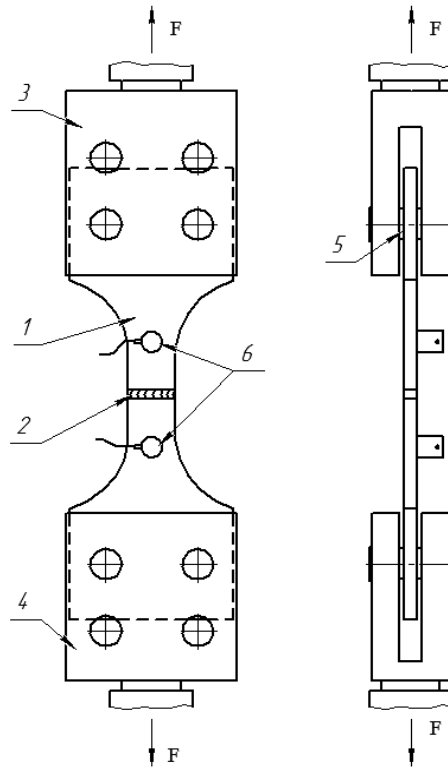


Рис. 1. Схема нагружения образца: 1 – образец; 2 – сварной шов; 3 – верхний захват нагружающего устройства; 4 – нижний захват нагружающего устройства; 5 – палец; 6 – ПАЭ

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). Система 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 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 раз-

рушения 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. 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_{nr} (отношение активности АЭ к средней длительности импульсов). В результате анализа и выявления зависимостей выделены следующие этапы для определения начальной и конечной точек прямолинейного участка:

– найти на графике зависимости длительности импульсов АЭ от времени момент времени t_1 , когда наблюдается резкий рост длительности импульсов

(свидетельствует о начале пластического деформирования);

– найти на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени момент времени t_2 , соответствующий началу роста коэффициента перекрытия. Он свидетельствует о начале пластического деформирования, при котором наблюдаются движение дислокаций, мелкие перестройки в структуре материала, а значит, имеется большое количество «коротких» сигналов, которые, накладываясь друг на друга, сливаются, что отражается в виде скачка на графике зависимости коэффициента перекрытия от времени;

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

Пример определения интервала времени для аппроксимации.

1. Резкий рост длительности импульсов наблюдается в момент времени $t_1 = 186$ с (рис. 2).

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

3. Для проведения дальнейших действий используется величина времени $t_2 < t_1$ (рис. 4).

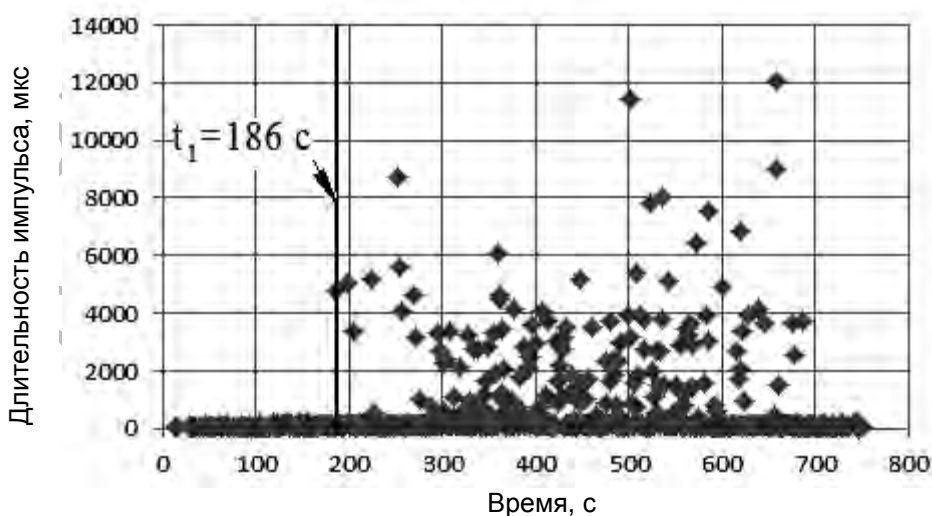


Рис. 2. Определение момента времени t_1 по графику зависимости длительности импульсов от времени

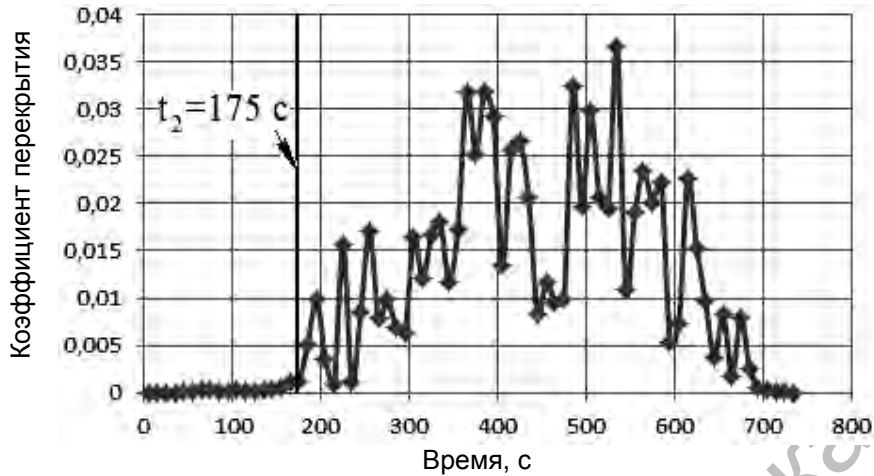


Рис. 3. Определение момента времени t_2 по графику зависимости коэффициента перекрытия импульсов от времени

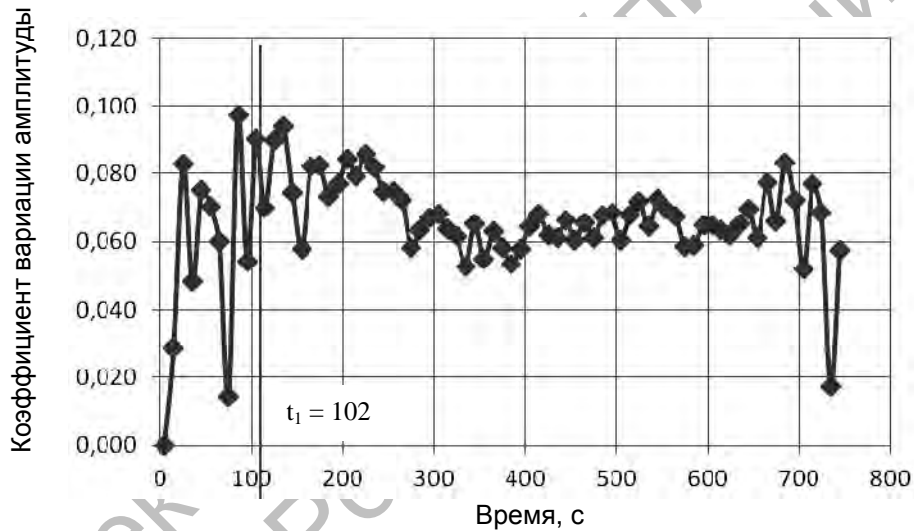


Рис. 4. Определение момента времени t_1 по графику зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени

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 временной зависимости логарифма числа сигналов АЭ (начало этапа однородного разрушения). Для этого рассмотрим график зависимости коэффициента вариации амплитуды от времени. На участке от 0 до t_2 (движение от t_2 к 0) выделяем t_1 , в котором происходит аномаль-

ный скачок коэффициента вариации амплитуды.

Скачок вариации амплитуд объясняется разрушением связей с большим разбросом размеров, структур и напряжений. Разрушение неоднородно, следовательно, возникают аномально большие амплитуды.

Полученный интервал вносится в макрос программы, с помощью которого строится теоретическая кривая зависимости числа импульсов АЭ от времени. При этом используется в качестве функ-

ции $\Psi(\gamma)$ ограниченное вейбулловское распределение. Изменяя величину параметра λ , можно 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 $N_{\Sigma}(t)$. Величина средней ошибки аппроксимации должна быть минимальной. При совпадении кривых получаем искомыми значения параметров микромеханической модели разрушения.

Вывод

В результате авторами был получен метод определения участка однородного разрушения. С помощью метода была увеличена точность определе-

ния времени до разрушения объекта на 2 % (по сравнению с ранее предложенной методикой). Сократилась погрешность с 15 до 13 %, что соответствует нормам. Таким образом, 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. Методика проста в применении, универсальна, т. к. диагностические параметры позволяют оценить ресурс и стандартные характеристики прочности различных по структуре и размерам объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / Л. Н. Серьезнов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с.
2. **Лахова, Е. Н.** Моделирование процесса перестройки структуры при пластической деформации сварных соединений металлоконструкций / Е. Н. Лахова, В. В. Носов // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург 14–15 июня 2011 г. – СПб. : СПбПУ, 2011. – С. 301–309.
3. **Носов, В. В.** Диагностика машин и оборудования : учеб. пособие / В. В. Носов. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2012. – 384 с.
4. **Nosov, V. V.** The Effect of Strength State Nonuniformity on the Acoustic Emission of Structural Materials / V. V. Nosov, G. S. Elchaninov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, № 12. – P. 824–833.
5. **Носов, В. В.** Оценка качества технологического процесса на основе структурно-силового анализа прочностной неоднородности материала изделия / В. В. Носов, Е. Н. Лахова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 8. – С. 69–71.
6. **Носов, В. В.** Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатаной полосы методом акустической эмиссии / В. В. Носов, В. Г. Лаврин // Дефектоскопия. – 2012. – № 3. – С. 18–26.
7. **Пат. 2445615 РФ.** Способ определения прочности материала изделий / В. В. Носов, Е. Н. Лахова. – № 2010145698/28 ; заявл. 09.11.10 ; опубл. 20.03.12, Бюл. № 8. – 4 с.

Статья сдана в редакцию 29 марта 2013 года

Виктор Владимирович Носов, д-р техн. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Тел.: (904) 617-94-38. E-mail: nosovvv@list.ru.

Viktor Vladimirovich Nosov, DSc (Engineering), Prof., National Mineral Resources University (Mining University). Tel.: (904) 617-94-38. E-mail: nosovvv@list.ru.