DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

УДК 620.199

КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В.В.НОСОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Неоднозначность связи результатов акустико-эмиссионного контроля с прочностью материалов делает неэффективным акустико-эмиссионное диагностирование и актуализирует проблему прочностной и метрологической неоднородности. Неоднородность – некоторое отклонение от определенной нормы. Реальный объект всегда неоднороден, однородность является допущением, упрощающим изображение объекта и решение связанных с ним задач. Потребность в рассмотрении неоднородности обусловлена необходимостью уточнения той или иной задачи и является переходом на более сложный уровень исследования. Учет неоднородности требует определения ее вида, критерия и способа оценки. Вид неоднородности зависит от решаемой проблемы и должен быть связан со свойством, определяющим функцию реального объекта, критерий должен быть информативным, а способ его оценки неразрушающим. Сложность прогнозирования поведения неоднородных материалов обусловливает необходимость моделирования определяющего работоспособность процесса разрушения, формулировки критерия неоднородности, интерпретации эффекта Кайзера, как проявляющего неоднородность явления невоспроизведения активности акустической эмиссии (АЭ) при повторном нагружении объекта контроля.

В статье приведен пример моделирования прочностной и метрологической неоднородности, проведен анализ и дана оценка информативности эффекта Кайзера относительно степени опасности состояния объекта диагностирования с позиций микромеханической модели временных зависимостей параметров АЭ, регистрируемой в процессе нагружения конструкционных материалов и технических объектов.

***Ключевые слова*:** неоднородность прочностного состояния, прочность, разрушение, микромеханическая модель акустической эмиссии

Как цитировать эту статью: Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии // Записки Горного института. 2017. Т.226. С.469-479. DOI: 10.25515/PM1.2016.4.469

Введение. Неразрушающий контроль прочности конструкционных материалов базируется на связи результатов контроля с прочностными характеристиками. Неоднородность материалов и условий контроля образует неоднозначную связь, внося неопределенность в результаты контроля. Решение проблемы связано с необходимостью формулировки понятий неоднородности и оценки ее количественных характеристик.

Под неоднородным материалом понимают материал с неоднородными физическими свойствами, гетерогенный материал (материал, состоящий из множества структурных элементов), «некую математическую модель, описываемую с помощью разрывных по координатам материальных функций (например, функций зависимости модулей упругости от координат), определяющих соотношений (например, соотношений напряжений и деформаций)» [2-4, 7].

Все материалы в той или иной степени неоднородны. Дефекты материала и сложности конструкции приводят к неоднородности их структурного, напряженно-деформированного и прочностного состояний, неопределенности поведения и необходимости повышения запаса прочности, что не всегда возможно. Показателями прочностного состояния могут являться форма, размеры, координаты структурных элементов, интенсивности и масштаб процессов их разрушения, деформирования или перестройки структуры, значения действующих или разрушающих напряжений, деформаций, энергий деформирования и т.п., а разброс значений этих показателей формирует структурные, пространственные, кинетические, масштабные, силовые, деформационные или энергетические критерии прочностной неоднородности (рис.1). В частности, структурный критерий прочностной неоднородности материала связан с параметрами распределений количества дефектов по размерам, масштабный – с иерархическим уровнем разрушения (микро-, мезо-, макро- и др.), силовой – с разбросом значений расчетных напряжений, кинетический – с изменением интенсивности процессов перестройки структуры материала. Пространственная неоднородность, проявляющаяся в рассеянности разрушения, является предпосылкой локализации разрушения в момент достижения критической концентрации микротрещин, что ограничивает объект от полного распада на микроэлементы. Энергетическая неоднородность процесса разрушения проявляется в разбросе величин и снижении среднего значения энергии разрушения структурных элементов, кинетическая неоднородность трещинооб-

Отозвано

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469



Рис.1. Схема прочностной неоднородности материала

разования проявляется в сравнительном упрочнении материала и снижении интенсивности его разрушения, момент завершения которого определяется наиболее прочным из разрушаемых структурных элементов. В случаях, когда неоднородность контролируется и активно используется для оптимизации свойств направленного управления структурой и составом материала, материал называют композиционным.

Различные виды и степени прочностной неоднородности по-разному влияют на свойства конструкционных материалов и прогнозируемость их поведения. Сложность прогнозирования поведения неоднородных материалов обусловливает необходимость моделирования определяющих работоспособность процессов, формулировки критерия прочностной неоднородности, который не только должен быть связан с определяющим работоспособность свойством, но и быть прогностическим, а способ его оценки не должен причинять чрезмерных повреждений объекту контроля, т.е. быть неразрушающим. Одним из самых эффективных методов наблюдения за процессом разрушения и информативных методов неразрушающего контроля прочности является метод акустической эмиссии.

Акустическая эмиссия – явление излучения объектом (диагностирования, контроля, испытаний) акустических волн под воздействием нагрузки или влияний иных факторов. Акустическая эмиссия (АЭ) материала, вызванная изменением структуры материала объекта, является отражением процессов, определяющих работоспособность изделий или сооружений. Основанный на анализе параметров волн АЭ акустико-эмиссионный метод диагностирования позволяет найти координаты дефекта, оценки степени его опасности, показателей прочности, остаточного ресурса объекта диагностирования. Задачей неразрушающего АЭ-контроля является информационное обеспечение АЭ-диагностирования, что предполагает необходимость обеспечения корректных механических воздействий, метрологических условий регистрации сигналов АЭ и алгоритмов обработки ее результатов. Проводимые в условиях растущей нагрузки производственные испытания отслуживших определенный срок промышленных объектов акцентируют внимание на характере временных зависимостей параметров АЭ при повторном нагружении или выдержке нагрузки [1, 5, 6, 8, 9]. Отсутствие сигналов при нагрузке меньше первоначальной, а также зату-

Отозвано

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.469*

хающий или стабильный характер АЭ, получившее название эффекта Кайзера (рис.2), интерпретируются как неопасное состояние (участок *AB*, рис.2). Когда сигналы АЭ появляются задолго до достижения значения первоначальной нагрузки образцов или накапливаются с возрастающей активностью, интерпретируется как признак наличия опасных дефектов (участок *FD*, рис.2). Однако в некоторых случаях точность такого качественного диагноза недостаточно высока, а проявление эффекта Кайзера при проведении акустико-эмиссионной оценки состояния вновь вводимых в эксплуатацию и не прошедших термообработку сварных конструкций вносит существенную неопределенность в диагноз и требует дополнительного повторного нагружения, повышающего трудоемкость контроля [5].

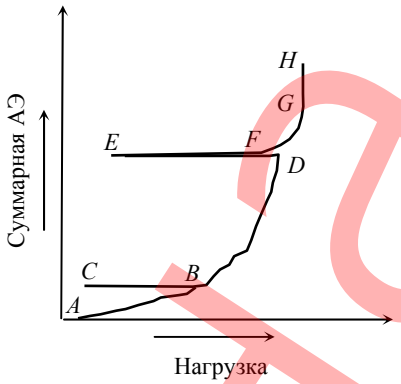


Рис.2. Графическое изображение эффекта Кайзера

В табл.1 рассмотрена связь состояния структуры материала с некоторыми видами прочностной неоднородности, этапами разрушения и их акустико-эмиссионными диагностическими признаками [3-6, 7, 8]. В настоящий момент возникла необходимость в более глубоком осмыслении явления АЭ, обоснованном увязывании его параметров с показателями прочностной неоднородности объектов контроля и создании на основе этого соответствующего современным требованиям методического обеспечения по фильтрации сигналов АЭ, количественному определению информативных показателей состояния, обоснованию достаточности упрощенного диагностического нагружения, снижающего трудоемкость контроля. Подготовке методологической базы указанных оптимизирующих мероприятий и посвящена данная статья.

Таблица 1

Связь состояния структуры материала с видами прочностной неоднородности, этапами разрушения и диагностические АЭ-признаки данных этапов

Состояние структуры	Этапы разрушения	Виды прочностной неоднородности			Диагностические АЭ-признаки
		Пространственная	Кинетическая	Энергетическая	
Деструктивное (разупрочненная)	Делокализованное мелкодисперсное неоднородное	++	++	++	Падение активности АЭ и амплитуды АЭ до окончательного разрушения, вариации РВП, эффект Кайзера
Без концентратора	То же	+	+	+	Падение активности, амплитуды АЭ, вариации РВП, эффект Кайзера
	Делокализованное мелкодисперсное однородное	+	–	–	Вариации РВП, возможность оценки прочностных показателей
С наличием концентратора	Локализованное мелкодисперсное неоднородное	–	+	+	Падение активности, амплитуды АЭ, инвариант РВП, эффект Кайзера
	Локализованное мелкодисперсное однородное	–	–	–	Инвариант РВП, возможность оценки прочностных показателей
Развитие концентратора	Образование и рост трещины	–	+	+	Увеличение длительности сигналов, уменьшение пауз, повышение коэффициента перекрытия
	Пластическое разрушение	–	–	+	Инвариант РВП, возможность оценки прочностных показателей, вариации амплитуды и длительности пауз, эффект Эльбера

Примечание. «++» – повышенная неоднородность; «+» – существенная неоднородность; «–» – несущественная неоднородность; РВП – разница времен прихода сигналов АЭ на каналы регистрации.

Методика исследований. Для оптимизации АЭ-контроля и расширения областей его использования метод АЭ-диагностирования должен рассматриваться как звено в цепи сбора и обработки информации, связывающей происходящие в материале процессы с регистрируемыми сигналами АЭ и показателями надежности [21]. В связи с этим описание определяющего проч-

ОТОЗВАНО

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

ность процесса разрушения и анализа экспериментальных данных, формулировку критерия и показателей прочностной неоднородности, разработку метода их количественной оценки проведем с позиций микромеханических моделей разрушения и временных зависимостей параметров АЭ и применения имитационного компьютерного моделирования [13-15]. Согласно ним разрушение моделируется процессом накопления концентрации микротрещин в гетерогенном материале, описываемом уравнением

$$C(t) = C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega)\left\{1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta\ (\omega(\bar{t}))}\right]\right\} d\omega, \qquad (1)$$

где t – текущее время; C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения; $\theta\ (\omega(t))$ – долговечность структурных элементов, описываемая формулой Журкова [7]:

$$\theta(\omega(t)) = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0}{KT} - \omega(t)\right), \qquad (2)$$

τ_0 – величина порядка периода атомных колебаний; U_0 – энергия активации процесса разрушения; $\omega = \gamma\sigma/KT$ – параметр прочностного состояния; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – напряжение; t – текущее время; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\psi(\omega)$ – функция плотности распределения значений величины ω по структурным элементам; μ – нижняя граница изменения аргумента ω; $\Delta\omega$ – доверительный интервал разброса значений ω по структурным элементам.

Введение функции $\psi(\omega)$ (рис.3) позволяет описать разрушение в условиях прочностной неоднородности и ввести ее количественные параметры. Графически распределение может быть разделено на две части: «колокол», в области которого значения ω невелики (они соответствуют наиболее долговечным структурным элементам) и изменяются незначительно, и «хвост» распределения с большими значениями величины ω (они соответствуют наименее долговечным структурным элементам), где вариация ω (ω_2) существенна.

Вариация параметра ω определяется вариацией двух компонент – параметра γ («технологическая» составляющая разброса), который определяет структурную неоднородность материала, а вариация параметра σ («силовая» составляющая разброса) – неоднородность поля механических напряжений.

Микромеханическая модель временных зависимостей параметров АЭ имеет вид

$$\xi(t) = V \int_{\Delta t}\int_{f}\int_{U} \Phi(\Delta t, f, U)\, dU df d\Delta t\, C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega)\left\{1 - \exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta_{ср}(\omega(\bar{t}))}\right]\right\} d\omega \qquad (3)$$

или

$$\xi(t) = k_{AE}\, C(t), \qquad (4)$$

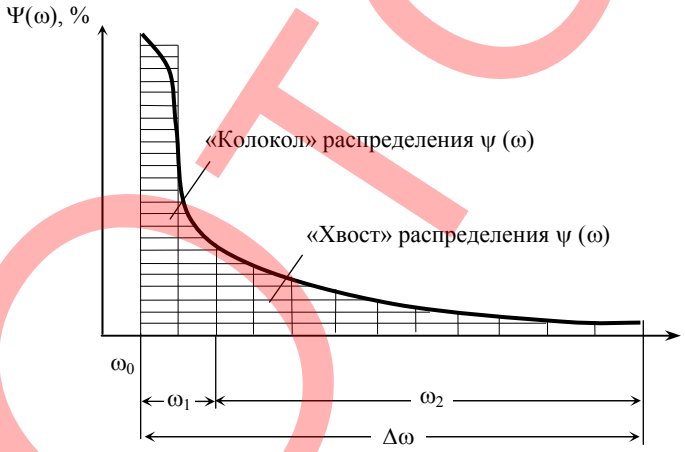


Рис.3. Моделирование прочностной неоднородности материала посредством функции $\psi(\omega)$ распределения по структурным элементам материала параметра ω прочностного состояния

где ξ – первичный информационный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда АЭ); k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК, «звучащий объем» материала); $\Phi(\Delta t, f, U)$ – плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузам) между ними, амплитуде U и частоте f; V – контролируемый объем.

Компьютерное моделирование заключается в имитации на ЭВМ значений концентрации микротрещин или скорости ее накопления и сравнении результатов имитации с регистрируемым числом импульсов

ОТОЗВАНО

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

или активностью АЭ при различных состояниях материала и условиях его диагностического нагружения. Моделирование производилось с помощью оригинальной программы Destruction Modeling, написанной в среде Delphi 7, в условиях равномерного диагностического нагружения с постоянной скоростью изменения напряжений. Временная зависимость концентрации микротрещин при этом имела вид

$$C(t) = C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} \psi(\bar{\omega})\{1-\exp[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta(\omega(\bar{t}))}]\}d\bar{\omega} =$$

$$= C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} \psi(\bar{\omega})\{1-\exp[-\frac{1}{\tau_0}\int_0^t \exp(\bar{\omega}\bar{t}-\frac{U_0}{KT})d\bar{t}]\}d\bar{\omega} =$$

$$= \left[\int_0^t \exp[\bar{\omega}\bar{t}-\frac{U_0}{KT}]d\bar{t} = \frac{1}{\bar{\omega}}\exp[\bar{\omega}\bar{t}-\frac{U_0}{KT}]\Big|_0^t = \frac{1}{\bar{\omega}}\exp[\frac{U_0}{KT}](\exp[\bar{\omega}t]-1)\right] =$$

$$= C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} \psi(\bar{\omega})\{1-\exp[\frac{1-\exp[\bar{\omega}t]}{\tau_0\bar{\omega}\exp[\frac{U_0}{KT}]}]\}d\bar{\omega}. \quad (5)$$

В процессе исследований рассматривались различные виды функции ψ(ω):

• логарифмически-нормальное распределение с функцией плотности

$$\psi(\omega,\mu,\sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega}\exp[-\frac{1}{2\sigma_3^2}(\ln(\omega)-\mu)^2]; \quad (6)$$

• двухпрямоугольное с весами 0,99÷0,999 и 0,01÷0,001

$$\psi(\omega,\omega_0,\omega_1,\omega_2) = \begin{cases} 0{,}99/\omega_1, & \omega\in[\omega_0,\omega_0+\omega_1]; \\ 0{,}01/\omega_2, & \omega\in(\omega_0+\omega_1,\omega_0+\omega_1+\omega_2]. \end{cases} \quad (7)$$

Построение временных зависимостей рассчитываемых параметров повреждаемости C производилось для различных значений параметров функций ψ(ω) при различных режимах нагружения. При этом модели $C(t)$ рассматривались на интервале от нуля до точки достижения критической концентрации $C^* \approx 0{,}01C_0$, при которой завершается стадия делокализованного микротрещинообразования. При имитации $C(t)$ использовались следующие значения постоянных: $\tau_0 = 10^{-14}$ с, U_0 = 94-120 КДж/моль, K = 8,31 КДж/(Кмоль·град.), T = 275 К, C_0 = 10000.

Результаты моделирования сопоставлялись с результатами регистрации сигналов АЭ.

Регистрация проводилось с помощью автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы СДАЕ-16(2), описанной в [3, 4]. Основные характеристики системы: рабочий диапазон частот 20÷1000 кГц; коэффициент усиления предварительного усилителя 34±1 дБ, диапазон изменения программируемого коэффициента усиления основного усилителя от –20 до 40 дБ с шагом 0,375 дБ; программно-управляемый порог дискриминации; использовались преобразователи с диапазоном частот 20-200 кГц. Первичные измеряемые параметры: время прихода сигнала АЭ с начала испытания, время нарастания сигнала, длительность сигнала, число выбросов сигнала, амплитуда импульсов, энергия импульса. Результаты регистрации АЭ в совокупности с неизменностью объема образца и порогов дискриминации использовавшейся аппаратуры АЭ говорили о стабильности значений акустико-эмиссионного коэффициента k_{AE}, корректности (4) и приемлемости допущения

$$N_{\tau^*} = k_{AE}C^* = k_{AE}0{,}01C_0 \;\Rightarrow\; k_{AE}C_0 = 100N_{\tau^*}, \quad (8)$$

где N_{τ^*} – последний элемент массива, соответствующий суммарному числу импульсов АЭ, полученный на момент разрушения τ^* исследуемого образца.

В ходе нахождения параметров модели (3) решалась задача оптимизации:

ОТОЗВАНО

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

$$\sum_{t=t_0}^{\tau^*}\left(N_t - k_{AE}C(t)\right)^2 \to \min, \qquad (9)$$

которая имела вид

$$\sum_{t=t_0}^{\tau^*}\left(N_t - 100N_{\tau^*}\int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega}\psi(\overline{\omega})\{1-\exp[\frac{1-\exp(\overline{\omega}t)}{\tau_0\overline{\omega}\exp(U_0/KT)}]\}d\overline{\omega}\right)^2 \to \min, \qquad (10)$$

где N_t – элементы массива данных, соответствующие суммарному количеству АЭ-сигналов, полученных на момент времени t.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис.4 представлены временные зависимости числа импульсов АЭ-образцов сварных соединений, не прошедших термическую обработку (рис.4, *а*), и амплитуда сигналов АЭ повторно нагруженного образца (рис.4, *б*). Видно, что сигналы появляются до достижения первоначальной нагрузки образцов на 300 с и при этом их количество весьма велико, хотя и меньше, чем при первом нагружении. Очевидно, что затухание активности АЭ и невоспроизводимость параметров АЭ при повторном нагружении материала являются свидетельством необратимости разрушения структурных элементов и объясняются неоднородностью их прочностного состояния, уменьшением в процессе первого нагружения образца доли наиболее перегруженных структурных элементов в нем с низкой долговечностью и параметрами ω из области «хвоста» функции ψ(ω). Это служит признаком кинетической неоднородности процесса трещинообразования.

Микромеханическая модель разрушения материала разбивает первую стадию мелкодисперсного разрушения на этапы однородного и неоднородного разрушения. На неоднородном этапе разрушению подвергаются наименее долговечные элементы материала, которые разрушаются после первого нагружения и ввиду их небольшого количества полностью выбывают из процесса. Однородное разрушение менее интенсивно, однако после завершения неоднородного этапа начинает доминировать. На временной зависимости $\ln N\,\Sigma$ повторно нагружаемых образцов выделяются три участка (рис.4, *а*):

- кинетически неоднородного разрушения *a*-*b*;
- кинетически однородного разрушения *b*-*c*;
- разрушения после превышения предыдущей нагрузки *c*-*d*.

У дефектных образцов участок кинетически неоднородного разрушения короткий или отсутствует. Амплитуды сигналов АЭ после превышения первоначального нагружения повышаются (рис.4, *б*). Это обстоятельство интерпретируется как проявление масштабного эффекта: крупные структурные элементы менее долговечны и разрушаются при первом нагру-

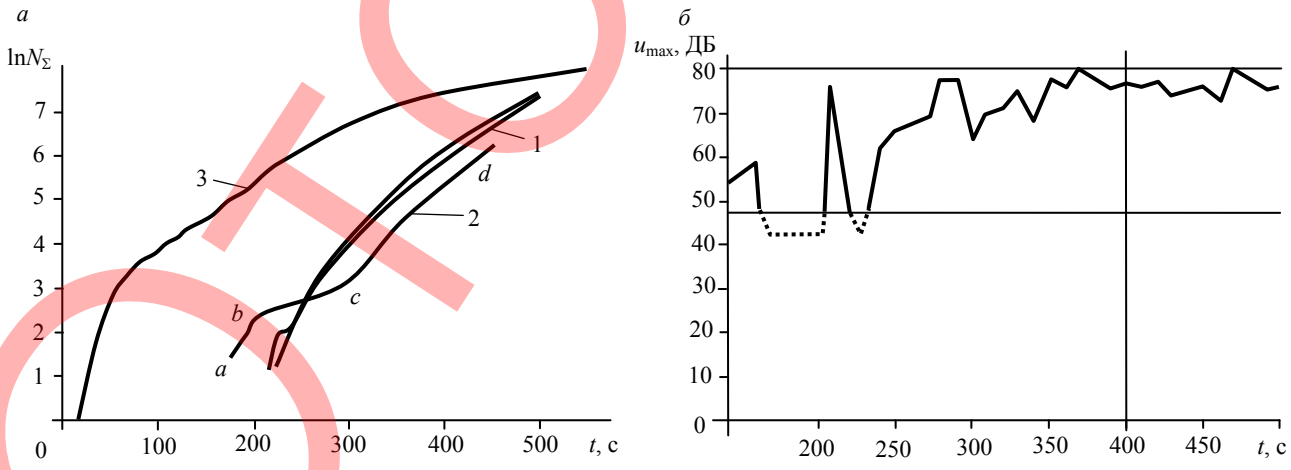


Рис.4. Временные зависимости числа импульсов АЭ-образцов нахлесточных сварных соединений (*а*) и амплитуда сигналов АЭ повторно нагружаемого образца, $A_{пол}$ = 183 мм^2 (*б*)

1 – повторно нагружаемый образец с площадью поперечного сечения $A_{пол}$ = 183 мм^2; 2 – повторно нагружаемый образец, $A_{пол}$ = 525 мм^2; 3 – впервые нагружаемый образец, $A_{пол}$ = 301 мм^2

Отозвано

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

жении, а разрушение оставшихся менее крупных элементов сопровождается выделением меньшего количества энергии. Дальнейшее повышение амплитуды связано также и с повышением напряжений, при которых разрушаются также и менее крупные, но более прочные структурные элементы. Моделируемое с этих позиций поведение параметров АЭ повторно нагружаемых образцов при идеализированных вариантах процесса разрушения показано на рис.5.

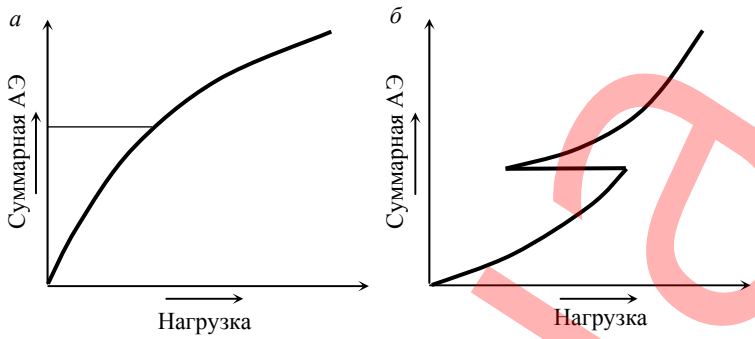


Рис.5. Поведение параметров АЭ при идеализированных вариантах процесса разрушения:
а – кинетически неоднородный процесс разрушения;
б – кинетически однородный процесс разрушения

Реальный материал разрушается в условиях изменяющейся во времени прочностной неоднородности. Степень неоднородности несет информацию о состоянии объекта: протекание процесса кинетически неоднородного разрушения свидетельствует о неопасном состоянии объекта, а протекание процесса однородного разрушения, наоборот, говорит о наличии и развитии опасного дефекта. Эту степень можно оценить на основе имитационного компьютерного моделирования, определяя величину соотношения параметров функции $\psi(\omega)$. Например, при $\Delta\omega/\omega_0 < 1$ (см. рис.3) процесс разрушения имеет однородный характер, так как длина «хвоста» функции $\psi(\omega)$ будет небольшая, а значит, количество наименее долговечных структурных элементов крайне невелико, в противном случае будет наблюдаться неоднородное разрушение (рис.6).

У образцов с неоднородной структурой (с округленными дефектами) $\Delta\omega/\omega_0 > 1$ (рис.7), у образцов, выполненных без искажений структурно-напряженного состояния (однородное разрушение), $\Delta\omega/\omega_0 < 1$. Образцы с повышенной неоднородностью и несформировавшейся структурой характеризуются соотношениями $\omega_2/\omega_1 > 10$; $\omega_2/\omega_0 > 10$; $\sigma_з > 10\mu$ (рис.8).

Предложенная микромеханическая модель параметров АЭ, кроме модели процессов, связанных с прочностью, включает в себя факторы, связанные с распространением и регистрацией сигнала, которые являются нестабильными (рис.9).

Рассмотрим влияние метрологической неоднородности, моделируемой нестабильностью АЭК, на вид временных зависимостей числа импульсов $N_\Sigma(t)$ АЭ. Для этого используем физический смысл АЭК как «звучащего» объема материала и графический смысл производных.

При переменном во времени t значении АЭК модель временных зависимостей числа импульсов АЭ, ее первой и второй производных принимает вид

$$\begin{gathered} N_\Sigma(t) = k_{AE}(t)C(t); \\ dN_\Sigma(t)/dt = N'_\Sigma(t) = k'_{AE}(t)C(t) + k_{AE}(t)C'(t); \\ d^2N_\Sigma(t)/dt^2 = N''_\Sigma(t) = k''_{AE}(t)C(t) + 2k'_{AE}(t)C'(t) + k_{AE}(t)C''(t). \end{gathered} \qquad (11)$$

Абсолютные значения входящих в данные уравнения параметров $k_{AE}(t)$, $C(t)$, $k'_{AE}(t)$, $C'(t)$, $k''_{AE}(t)$, $C''(t)$ не могут быть определены, однако из физических соображений ясно, что $k_{AE}(t) \geq 0$, $C(t) \geq 0$, $C'(t) \geq 0$.

При $N''_\Sigma(t) > 0$ кривая $N_\Sigma(t)$ изогнута выпуклостью вниз, что соответствует росту активности АЭ. Рост активности должен наблюдаться при $k''_{AE}(t) > 0$, $k'_{AE}(t) > 0$, $C''(t) > 0$. При стабильных порогах дискриминации аппаратуры ситуация $k''_{AE}(t) > 0$ возможна, если начинает расти средняя амплитуда сигнала АЭ и определенным образом меняется вид амплитудного распределения: равновероятностное распределение переходит в экспоненциальное, степенное или в распределение с максимумом, что свидетельствует о развитии дефекта или росте трещины. Состояние конструкции должно быть признано опасным.

Ситуация $k'_{AE}(t) > 0$ экспериментально наблюдается при росте средней амплитуды сигналов АЭ, который происходит при росте напряжений в контролируемом объеме материала. Особенно велико значение $k'_{AE}(t)$ может быть при малых амплитудах в начале регистрации. Если рост напряжений происходит из-за роста внешней нагрузки и не связан с ростом трещины, то увеличение АЭК не является признаком опасности состояния. Если $k'_{AE}(t) > 0$ при постоянной нагрузке, то это свидетельствует о росте трещины, состояние конструкции должно быть признано опасным.

ОТОЗВАНО

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.469*

а *б*

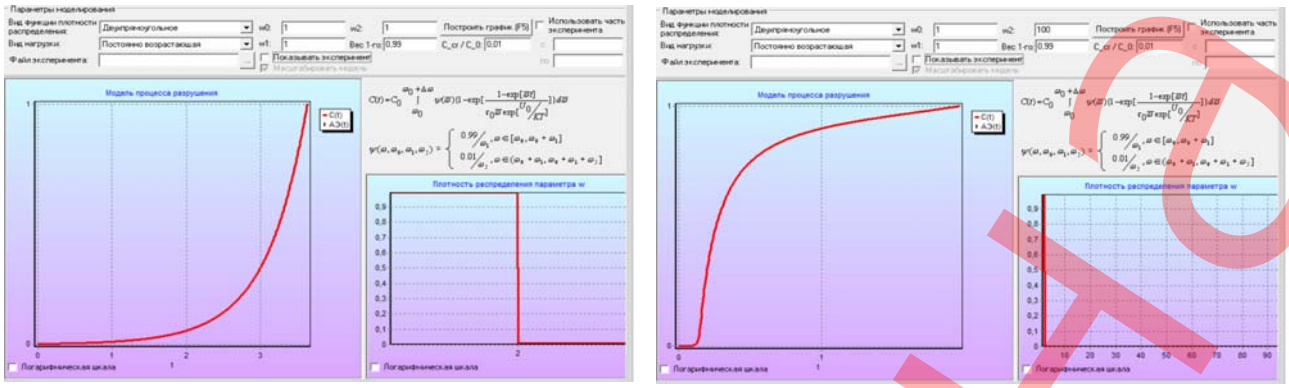


Рис.6. Моделирование однородного (*а*) (маленький «хвост» ψ(ω), $w_2/w_1 = 1$) и неоднородного (*б*) (большой «хвост» ψ(ω), $w_2/w_1 = 100$) разрушений при равномерном нагружении материала

а *б*

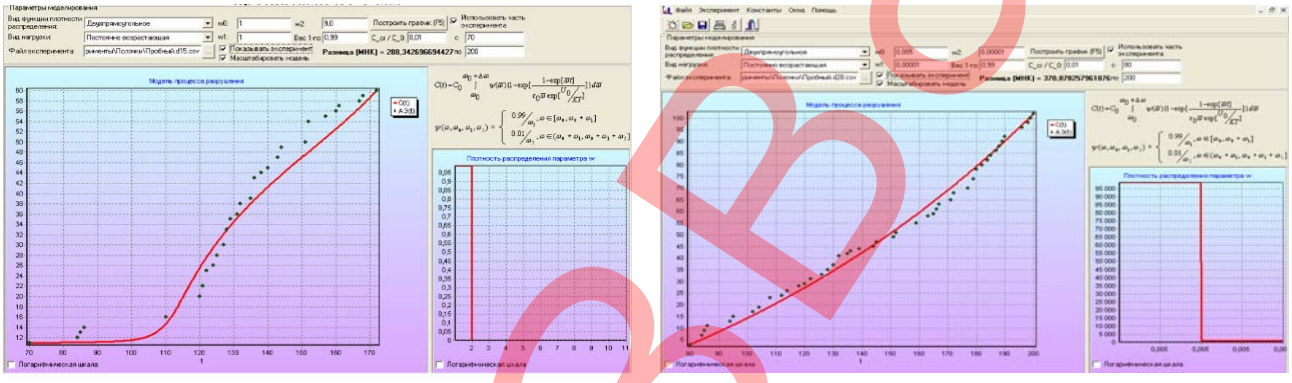


Рис.7. Результаты моделирования микротрещинообразования и регистрации АЭ-образцов стыкового сварного соединения: *а* – с двумя округленными боковыми пропилами на этапе упругого деформирования: двухпрямоугольное распределение ψ(ω): $\omega_2/\omega_1 > 1$, $\omega_2/\omega_0 > 1$; $\omega_1/\omega_0 = 1$, неоднородное разрушение; *б* – бездефектного образца, двухпрямоугольное распределение ψ(ω): $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_1 = 1$, однородное разрушение

а *б*

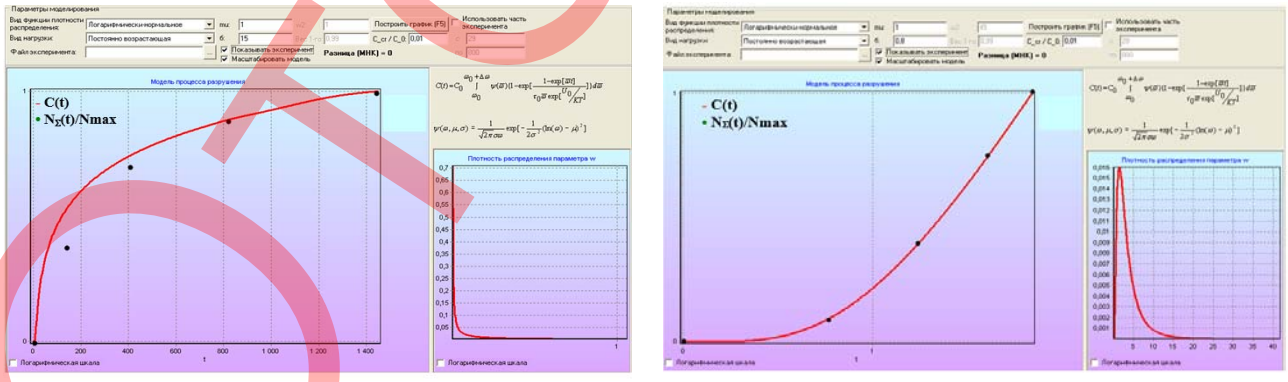


Рис.8. Сопоставление результатов регистрации АЭ-образца цементного камня с несформировавшейся высоконеоднородной структурой (суточным возрастом), $\sigma_3/\mu > 1$ (*а*) и структурированного образца цементного камня (возраст образца –132 сут), $\sigma_3/\mu < 1$ (*б*)

Отозвано

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

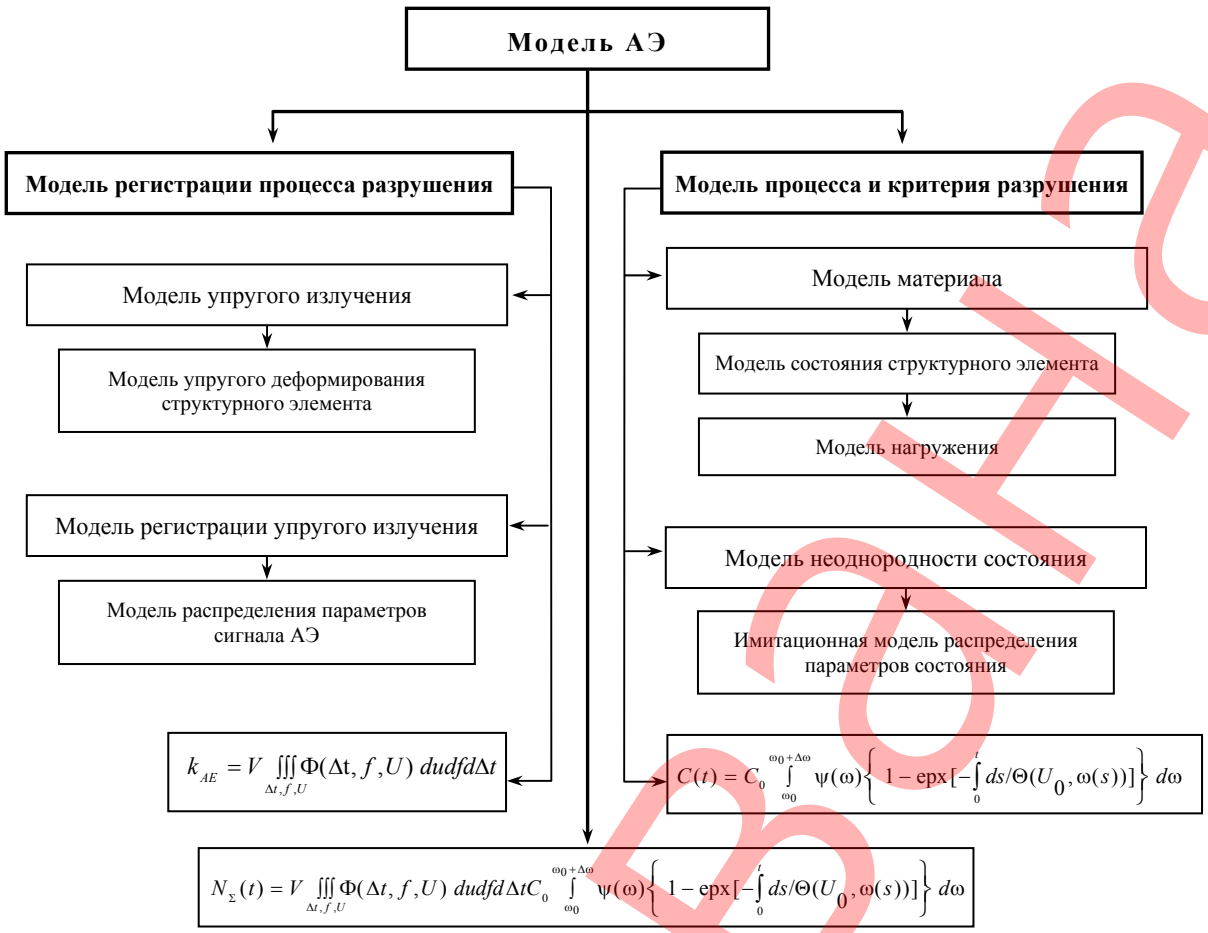


Рис.9. Структура микромеханической модели АЭ

Анализ ситуации с $C''(t) > 0$ также проведем раздельно для постоянной нагрузки и для равномерного нагружения с постоянной скоростью. При постоянной нагрузке, когда номинальные напряжения постоянны, рост концентрации микротрещин C в материале может быть либо затухающим ($C''(t) < 0$, кинетически неоднородное разрушение), либо постоянным ($C''(t) = 0$, кинетически однородное разрушение), которое наблюдается, как правило, при наличии непрогрессирующего концентратора напряжений.

Таким образом, ситуация $C''(t) > 0$ возможна только при росте напряжений в контролируемом объеме, что при нагружении постоянной нагрузкой свидетельствует о росте трещины или прогрессировании дефекта, состояние конструкции должно быть принято аварийным. При нагружении с постоянной скоростью ситуация $C''(t) > 0$, а значит, и $N''_\Sigma(t) > 0$ интерпретируется не так однозначно и может свидетельствовать:

- о развитии дефекта при $d^2\ln C(t)/dt^2 > 0$;
- о присутствии непрогрессирующего концентратора при $d^2\ln C(t)/dt^2 \approx 0$;
- о кинетически неоднородном разрушении и отсутствии существенной концентрации напряжений при $d^2\ln C(t)/dt^2 < 0$.

При $N'_\Sigma(t) < 0$ кривая $N_\Sigma(t)$ изогнута выпуклостью вверх. Для этого достаточно выполнение условий $k''_{AE}(t) < 0$, $k'_{AE}(t) < 0$, $C''(t) < 0$. Ситуация $k''_{AE}(t) < 0$ возможна при уменьшении во время испытаний средней амплитуды сигнала АЭ и наличии амплитудного распределения сигналов, не содержащего максимума, а также при росте средней амплитуды сигнала и содержащем максимум амплитудном распределении.

Рост средней амплитуды сигнала противоречит условию $k'_{AE}(t) < 0$, поэтому его не рассматриваем. Само условие $k'_{\mathrm{AE}}(t) < 0$ означает уменьшение доли регистрируемых сигналов из-за выхода их амплитуд за регистрируемый диапазон или временным перекрытием сигналов. Это уменьшение может сопровождаться либо уменьшением средней амплитуды сигнала, которое на-

ОТОЗВАНО

DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469

блюдается при уменьшении скорости нагружения (контролируется показателями нагрузки), либо увеличением средней амплитуды и ростом коэффициента перекрытия сигналов при увеличении скорости нагружения. Поскольку верхний порог дискриминации U^B, как правило, достаточно высок, а рост коэффициента перекрытия противоречит условию $C''(t) \le 0$, уменьшение АЭК будем связывать только с уменьшением средней амплитуды сигнала. Ситуация $C''(t) \le 0$ как при постоянной нагрузке, так и при равномерном нагружении соответствует стадии кинетически неоднородного разрушения и свидетельствует об отсутствии опасного дефекта. Состояние конструкции является неопасным.

Таким образом, если регистрируемая при выдержке под постоянной нагрузкой временная зависимость числа импульсов АЭ имеет форму кривой с выпуклостью вниз ($N''_{\Sigma}(t) > 0$), то состояние диагностируемой конструкции только по этому признаку должно быть признано опасным. Амплитудный анализ здесь не обязателен. Если регистрируемая при постоянной нагрузке или при равномерном нагружении объекта временная зависимость числа импульсов АЭ имеет форму кривой с выпуклостью вверх ($N''_{\Sigma}(t) < 0$), то состояние диагностируемой конструкции только по этому признаку должно быть признано не опасным, амплитудный анализ здесь также не обязателен. Во всех остальных случаях АЭ-контроля, при которых наблюдается изменение средней амплитуды сигнала и вариация значений АЭК, число регистрируемых импульсов и его временная зависимость недостаточно информативны, для диагностики состояния требуется дополнительный анализ амплитудного распределения. Этот вывод согласуется с идеологией ведущих АЭ-технологий контроля и, в частности, с системой классификации источников АЭ в технологии MONPAC [5]. Различные этапы разрушения объекта можно идентифицировать (табл.2). Для оценки ресурса на этапе однородного разрушения (следующем за неоднородным), соответствующего разрушению структурных элементов со значениями ω из области «колокола» функции ψ(ω) (см. рис.3), необходимо определить прочностные АЭ-показатели Y_{AE}, W_{AE}, описанные в работах [1-4, 7, 10-21].

Таблица 2

Определение этапа разрушения и оценка ресурса

Стадия	Этап разрушения	Диагностический признак этапа разрушения	Формула оценки ресурса (Т-момент диагностирования)
I	Делокализованное мелкодисперсное неоднородное	$d^2\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = 0$; $d^2\ln\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = 0$; $dk_{AE}/dt < 0$ ($dP_U/dt < 0$); $\omega_2/\omega_1 > 1$, $\omega_2/\omega_0 > 1$; $\sigma_3 > \mu$; РВП = var	$\tau^* = (1 \div 10)T$
I	Делокализованное мелкодисперсное однородное	$d^2\xi/dt^2 = 0$ при $\sigma = \text{const}$; $d^2\ln\xi/dt^2 = 0$ при $\sigma = \text{const}$; $dk_{AE}/dt = 0$; $\omega_2/\omega_1 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$; $\sigma_3 < \mu$; РВП = var	Время до локализации $\tau^* = f(Y_{AE})$ или $\tau^* = f(W_{AE})$
I	Локализованное мелкодисперсное неоднородное	$d^2\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = 0$; $d^2\ln\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = 0$; $dk_{AE}/dt < 0$ ($dP_U/dt < 0$); $\omega_2/\omega_1 > 1$, $\omega_2/\omega_0 > 1$; $\sigma_3 > \mu$; РВП = invar	$\tau^* = (0{,}1 \div 0{,}5)T$
I	Локализованное мелкодисперсное однородное	$d^2\xi/dt^2 = 0$ при $\sigma = \text{const}$; $d^2\ln\xi/dt^2 = 0$ при $\sigma = \text{const}$; $dk_{AE}/dt = 0$; $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$; $\sigma_3 < \mu$; РВП = invar	Время до начала роста концентратора $\tau^* = f(Y_{AE})$ или $\tau^* = f(W_{AE})$
II	Образование и рост трещины	$d^2\xi/dt^2 > 0$ при $\sigma = \text{const}$; $d^2\ln\xi/dt^2 > 0$ при $\sigma = \text{const}$; $dk_{AE}/dt > 0$ ($dP_U/dt < 0$); $\omega_1/\omega_0 > 1$, $\omega_2/\omega_0 > 1$; $\sigma_3 > \mu$; РВП ≈ invar	$\tau^* = (0{,}01 \div 0{,}1)T$
II	Пластическое разрушение	$d^2\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = \text{const}$; $d^2\ln\xi/dt^2 < 0$ при $\sigma = \text{const}$; $dk_{AE}/dt < 0$ ($dP_{\Delta f}/dt < 0$); $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$; $\sigma_3 < \mu$; РВП ≈ invar	$\tau^* = (0{,}01 \div 0{,}1)T$

Выводы. Таким образом, применение микромеханической модели процесса разрушения и отражающих его временных зависимостей параметров акустической эмиссии позволяет предложить адекватную, информативную, физически обоснованную математическую модель прочностной и метрологической неоднородности, их количественные критерии и способы их оценки, снять неопределенность в распознавании состояния контролируемых неоднородных объектов, раскрыть информативность эффекта Кайзера и других признаков неоднородного разрушения, сделав их прогностическими.

ОТОЗВАНО

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.469*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузьмин А.Н.* Акустико-эмиссионная дефектоскопия грузоподъемных механизмов / А.Н.Кузьмин, С.Ю.Филиппов // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 2. С. 46-48.

2. *Носов В.В.* Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 62-75.

3. *Носов В.В.* Диагностика машин и оборудования. СПб: Изд-во «Лань», 2016. 376 с.

4. *Носов В.В.* Механика композиционных материалов. СПб: Изд-во «Лань», 2013. 240 с.

5. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. М.: Госгортехнадзор, 2003.

6. Применение метода АЭ при испытании легированной стали в условиях низких температур / И.В.Пархоменко, М.А.Яременко, Ю.В.Жбанов и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1990. № 1. С. 68-71.

7. *Регель В.Р.* Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р.Регель, А.К.Слуцкер, Э.Е.Томашевский. М.: Наука, 1974. 560 с.

8. *Царев И.К.* Акустико-эмиссионный контроль металлоконструкций мостовых кранов // Акустическая эмиссия материалов и конструкций: Сб. тез. докл. I Всесоюзной конф. 11-13 сентября 1984 г. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1984. Ч. II. С. 87-88.

9. *Shen Gongtian.* Gongtian Shen Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane / Gongtian Shen, Zhanwen Wu // Insight: Non-Destruct. Test. and Cond. Monit. 2010. Vol.52. № 3. P.144-147.

10. *Nosov V.V.* The Effect of Strength State Nonuniformity on the Acoustic Emission of Structural Materials / V.V.Nosov, G.S.Eltchaninov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. Vol. 47. № 12. P.824-833

11. *Nosov V.V.* Developing Algorithms for Estimating Strength on the Base of Imitating Structural Model of Acoustic Emission.I. Effect of Instability of Acoustic-Emission Coefficient / V.V.Nosov, Yu.V.Kotov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2001. Vol.37. № 9. P.644-649.

12. *Nosov V.V.* A Micromechanical Model of Acoustic Emission of Heterogeneous Materials / V.V.Nosov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004. Vol.40. № 2. P.113-119.

13. *Nosov V.V.* Use of Amplitude Distribution Parametersof Acoustic Emission Signals for Assessing the Strength of Structural Materials / V.V.Nosov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004. Vol.40. № 3. P.157-162.

14. *Nosov V.V.* Estimation of the Strength and Lifetime of Technical Objects Using the Acoustic-Emission Method / V.V.Nosov, A.I.Potapov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. Vol.45. № 2. P.109-117.

15. *Nosov V.V.* Estimation of the Strength and Lifetime of Welded Constructions Using the Acoustic-Emission Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. Vol.45. № 2. P.118-124.

16. *Nosov V.V.* Estimating the Residual Life of Plastically Deformed Welded Joints using Simulation of Their Acoustic Emission / V.V.Nosov, E.N.Lachova // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. Vol.48. № 2. P.75-84.

17. *Nosov V.V.* Nondestructive Testing of the Quality of Blanks for the Fabrication of Hot-Rolled Strips Using the Acoustic-Emission Method / V.V.Nosov, V.G.Lavrin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. Vol. 48. № 3. P.159-165.

18. *Nosov V.V.* Automated Evaluation of the Service Lives of Specimens of Structural Materials on the Basis of a Micromechanical Model of the Time Dependences of Acoustic Emission Parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. Vol.50. № 12. P.719-729.

19. *Nosov V.V.* Acoustic Emission Testing of the Strength of Metal Structures under Complex Loading / V.V.Nosov, A.I.Potapov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51. № 1. P.50-58.

20. *Nosov V.V.* Consideration of Kaiser Effect from the standpoint of strength inhomogeneity and the way of its estimation / V.V.Nosov, I.V.Matviian // In Scientific Reports on Resource Issues: Efficiency and Sustaiability in Mineral Industry – Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management. June 2016. Technische University Bergakademie Freiberg, Germany. 2016. Vol.1. P. 147-152.

21. *Nosov V.V.* On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. Vol. 52. N 7. P. 386-399.

***Автор* В.В.Носов**, *д-р техн. наук, профессор, nosovvv@list.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 31.10.2016

Отобрано