

ФИЗИКА

УДК 534:537.533

Физико-механические, химические и статистические аспекты акустической эмиссии*

С.И. Буйло

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия)

Physico-Mechanical, Chemical and Statistical Aspects of Acoustic Emission

S.I. Builo

I.I. Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics and Computer Sciences,
Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Представлен обзор по разрабатываемому междисциплинарному подходу к эффекту акустической эмиссии (АЭ), позволяющему создание эффективных методов восстановления параметров процессов структурных преобразований и накопления повреждений по регистрируемым сигналам сопутствующей АЭ. Суть подхода состоит в использовании кинетической концепции прочности, пуассоновской модели процесса дефектообразования и обнаруженных экспериментально физико-механических особенностей явления АЭ (включая статистические параметры, устойчивые в силу ряда предельных теорем случайного процесса АЭ). Результаты получены с использованием элементов физики конденсированного состояния, теории упругости, физики прочности, механики разрушения, статистической радиофизики и теории потоков случайных событий. Приведены особенности АЭ в ходе физико-химических процессов в жидких средах. Разработанные методы и алгоритмы позволяют существенно повысить точность и достоверность результатов оценки параметров процессов структурных преобразований в материалах по данным сопутствующей АЭ.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, дефекты, диагностика, пуассоновский поток, разрушение, растворение, физико-химические процессы.

This paper presents an overview of the proposed interdisciplinary approach to the effect of acoustic emission (AE) with further prospective development of effective methods for restoring the parameters of structural transformations and damage accumulation from the recorded signals of the accompanying AE. The essence of the approach is to use the kinetic concept of strength, Poisson model of the defect formation process, and experimentally discovered physical and mechanical features of the AE phenomenon (including statistical parameters of the random AE process stable due to a number of limit theorems). The results are obtained by exploiting elements of condensed matter physics, theory of elasticity, physics of strength, fracture mechanics, statistical radio-physics, and the theory of streams of random events. The features of AE during physical and chemical processes in liquid media are outlined. The developed methods and algorithms can significantly improve the accuracy and reliability of the assessment of structural transformation processes in materials by utilizing the accompanying AE.

Key words: acoustic emission, defects, destruction, diagnostics, dissolution, Poisson stream, physical and chemical processes.

DOI 10.14258/izvasu(2019)1-01

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 9.4726.2017/8.9).

Введение

В последние годы в физике прочности, физике конденсированного состояния, механике разрушения, неразрушающем контроле для определения структурных изменений в материалах все более активно используется метод акустической эмиссии (АЭ) [1–38]. Суть метода состоит в анализе параметров чрезвычайно слабого ультразвукового излучения, сопровождающего любое изменение либо повреждение структуры металлов, их сплавов, композиционных материалов. В то же время в связи со сложностью и междисциплинарностью протекающих процессов физическая интерпретация экспериментальных данных АЭ во многих случаях затруднительна [1–16, 21, 25]. К сожалению, физико-механическая природа самого явления АЭ до сих пор изучена явно недостаточно, а в существующих моделях этого явления пока не нашел должного отражения случайный характер процессов структурных преобразований в твердых телах. Кроме того, практическое применение метода АЭ тормозится всегда присутствующим искажением и перекрытием реальных сигналов при их многомодовом распространении в твердом теле, что сильно затрудняет, а во многих случаях делает невозможным решение обратной задачи количественного восстановления параметров структурных изменений в материалах по регистрируемым сигналам АЭ. Решение этих проблем требует привлечения достижений из самых различных разделов физики, механики, химии, математики и других наук.

В настоящей работе рассматриваются физико-механические, статистические, химические аспекты АЭ, описывается разрабатываемый нами междисциплинарный подход, позволяющий создавать эффективные методы восстановления параметров процессов дефектообразования и накопления повреждений по регистрируемым сигналам сопутствующей акустической эмиссии.

Физико-механическая природа акта акустической эмиссии

Согласно кинетической концепции прочности в твердом теле в результате теплового движения атомов идут непрерывные процессы разрыва и восстановления межатомных связей. В отсутствие внешней нагрузки эти процессы равновероятны и находятся в динамическом равновесии. При появлении внешней нагрузки разрыв межатомных связей происходит более интенсивно, чем их восстановление, поэтому в твердом теле могут происходить два физико-механических процесса: *деформация и разрушение*.

Элементарный акт деформации (образование и перемещение дислокаций) предполагает временный разрыв межатомных связей с их последующим восстановлением. *Элементарный акт разрушения* (зарождение и рост микротрещин) предполагает необратимый разрыв межатомных связей.

Таким образом, каждый *элементарный акт* деформации или разрушения сопровождается (хотя бы временным) разрывом межатомных связей. Часть энергии, высвобождаемой при разрыве межатомных связей, расходуется на *излучение* в материале *упругого импульса*.

Тем не менее чрезвычайно малая энергия этого излучения не позволяет зафиксировать разрывы отдельных единичных межатомных связей при существующем уровне чувствительности приемной аппаратуры. Однако накопление повреждений и *коллективный* разрыв межатомных связей могут создать акустический импульс, вполне достаточный для его регистрации.

При каждом *коллективном акте* перестройки (или повреждения) структуры материала генерируется первичный упругий импульс, процесс излучения которого представляет собой так называемый *акт* АЭ. Следовательно, измерение интенсивности потока (скорости следования) актов АЭ $\dot{N}_a = dN_a/dt$, их общего количества N_a и других параметров АЭ в принципе позволяет количественно исследовать кинетику процессов структурных преобразований, в том числе оценить параметры потоков микродеформации и накопления микроповреждений. Это дает возможность по данным АЭ диагностировать самые ранние стадии предразрушающего состояния материалов.

Рассмотрим возможный дислокационный механизм акта АЭ. Известно, что при деформировании материалов приложенным напряжением σ движущиеся дислокации скапливаются у препятствий, что приводит к появлению касательного напряжения $\tau_2 n_2$, большего, чем напряжение, активирующее источник [3, 11, 15].

$$\tau_2 n_2 \approx n_2 \tau_1 (L/l)^{1/2} = 0,5 n_2 \sigma (L/l)^{1/2}; \quad (L/l) \gg 1,$$

где τ_1 — сдвиговое напряжение в линии скольжения длиной L первого дислокационного источника s_1 ; τ_2 , n_2 , l — соответственно сдвиговое напряжение, число дислокаций и длина линии скольжения вторичного источника s_2 .

Полагая, что каждая дислокация при пересечении границы в момент времени t_i излучает короткий экспоненциальный импульс амплитудой x_{oi} , и учитывая, что их суперпозиция дает регистрируемый импульс амплитудой X , мы получили следующий вид нормированной амплитуды суммарного импульса АЭ от скорости деформации [3, 11, 15]:

$$A(\lambda) = \frac{X}{n x_{oi}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \exp\left(-\frac{\lambda k}{n}\right); \quad \lambda^{-1} \sim \bar{v}; \quad \dot{\epsilon} = M \rho_0 b \bar{v},$$

$$A(\dot{\epsilon}) \approx \int_0^{n-1} \exp\left(-\frac{Ck}{n \dot{\epsilon}}\right) dk \approx \frac{\dot{\epsilon}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{\min} \dot{\epsilon}_{\max}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_{\min} \dot{\epsilon}_{\max}}}{\dot{\epsilon}}\right) \right], \quad (1)$$

где $C \approx \sqrt{\dot{\epsilon}_{\min} \dot{\epsilon}_{\max}}$ — некоторая константа; n — количество дислокаций в скоплении; $\lambda = t_r/\tau_a$ — отношение

ние времени $t_r = n(t_i - t_{i-1})$ пересечения границы скопления к постоянной времени релаксации напряжения τ_a ; \bar{v} — среднее значение скорости дислокаций; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации; M — ориентационный фактор; ρ_o — плотность подвижных дислокаций; b — модуль вектора Бюргерса; $\dot{\epsilon}_{\min}$, $\dot{\epsilon}_{\max}$ — соответственно минимальные и максимальные в эксперименте скорости деформации.

Подобную формулу можно записать и для связи амплитуды АЭ с частотой нагружения F в случае усталостных испытаний (так как $\dot{\epsilon} \sim F$).

На рисунке 1 показана реализация такой модели акта АЭ на примере зарождения микротрещины по дислокационному механизму Коттрелла при пересечении двух плоскостей скольжения в металлах с ОЦК решеткой.

Зависимость (1) хорошо подтверждается экспериментально [3, 11]. Это позволяет с ее помощью скорректировать влияние скорости или частоты нагружения на амплитуду регистрируемых импульсов, что заметно повышает точность и достоверность результатов метода АЭ.

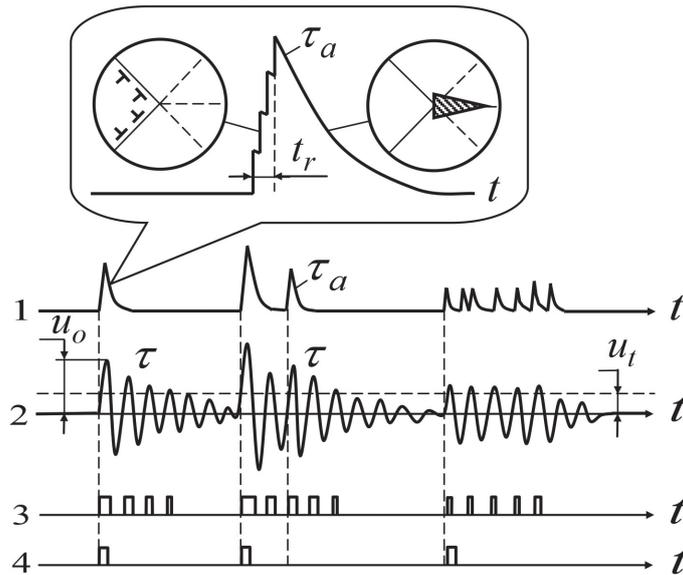


Рис. 1. Акт АЭ при дислокационном зарождении микротрещины и его регистрация приемной аппаратурой: 1 — поток излученных актов АЭ; 2 — поток регистрируемых радиоимпульсов АЭ; 3 — поток осцилляций АЭ (\dot{N}_a — скорость счета АЭ); 4 — поток огибающих протектированных сигналов АЭ (\dot{N}_a — активность АЭ)

Количественное восстановление потока структурных преобразований по регистрируемым сигналам эмиссии

Характерной особенностью строения реальных тел является случайность расположения содержащихся в них дефектов и, соответственно, полей внутренних напряжений, порождаемых этими дефектами. Это приводит к статистическому характеру акустического излучения, сопровождающего образование и движение дефектов.

Устойчивость типа потока актов АЭ. По крайней мере на ранних стадиях деструкции материалов естественно предположить пуассоновский характер потока актов структурных преобразований и соответствующего им излучаемого потока актов АЭ. Насколько нам известно, гипотеза о применимости модели пуассоновского потока к явлению АЭ впервые высказывалась еще в начале 1970-х гг.

В.М. Барановым, И.В. Гулевским и автором этого исследования.

При экспериментальном определении параметров потока актов АЭ нами установлено, что в большинстве случаев плотность распределения $w(\Delta t)$ временных интервалов Δt между соседними актами АЭ в процессе кристаллизации веществ, а также почти вдоль всей кривой механического нагружения твердых тел, действительно, описывается экспоненциальной зависимостью, соответствующей именно пуассоновскому потоку [3, 11, 12]:

$$w(\Delta t) = \dot{N}_a \exp(-\dot{N}_a \Delta t), \tag{2}$$

где \dot{N}_a — интенсивность актов (событий) потока АЭ.

Выражение (2) соответствует плотности вероятности временных интервалов между событиями пуассоновского потока.

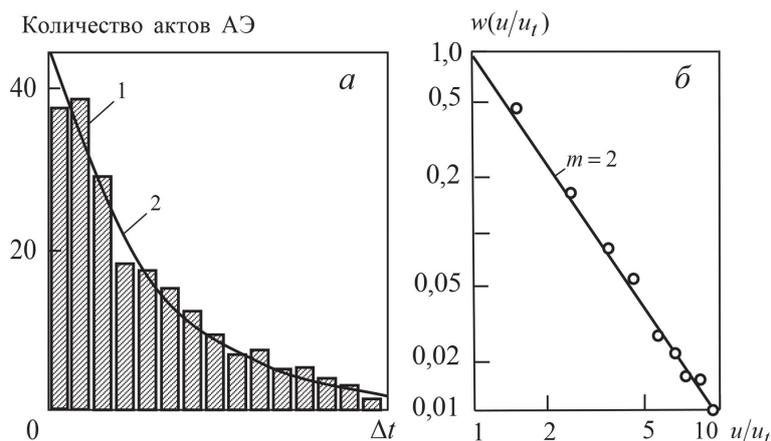


Рис. 2. Экспериментальные гистограммы распределения временных интервалов между актами АЭ при кристаллизации льда (а) и плотность амплитудного распределения сигналов АЭ стали 20 в конце упругой области (б).

Объем выборки — 202 акта; число каналов анализатора — 15; ширина канала — 0,45 мс; 1 — экспериментальные значения; 2 — аппроксимирующий пуассоновский поток

В качестве примера на рисунке 2, а показаны наши результаты экспериментального определения $w(\Delta t)$ в процессе кристаллизации льда (фазовый переход первого рода).

При отсутствии экспериментальных данных гипотеза пуассоновского потока событий во многих случаях может применяться априорно на основании предельной теоремы потоков [3], утверждающей, что результирующий поток будет пуассоновским, если он состоит из суперпозиции любых независимых потоков. Экспериментальное моделирование суперпозиции потоков показывает, что сумма уже 5...10 независимых, даже детерминированных, но независимых потоков, очень хорошо (с погрешностью лучше 3%) сходится к случайному пуассоновскому потоку [3]. При регистрации реальной АЭ эти условия обычно выполняются, так как мы почти всегда регистрируем поток эмиссии от нескольких, чаще всего независимых микроисточников, распределенных по некоторому локальному микрообъему.

Устойчивость вида амплитудного распределения актов АЭ. Данные наших собственных экспериментов, а также анализ результатов других авторов показывают, что нормированная на единичную вероятность суммы всех событий плотность амплитудного распределения АЭ $w_n(u/u_t)$ в широком (порядка 40...60 дБ) динамическом диапазоне для большинства материалов хорошо описывается степенной зависимостью [3, 10, 25, 26]:

$$w_n(u/u_t) = (m-1)(u/u_t)^{-m}, \quad 1 \leq m \leq 3, \quad (3)$$

где u — амплитуда импульса АЭ; u_t — порог дискриминации (уровень отсечки). Чаще всего u_t выбира-

ют на уровне отсечки акустических и электрических шумов.

Результаты теоретического моделирования также подтверждают, что амплитудные распределения АЭ при разрушении микрообъема твердого тела при случайных (пуассоновских) распределениях местоположения микронесплошностей внутри тела, действительно, должны подчиняться степенной зависимости [25]. Таким образом, результаты моделирования и данные прямых экспериментов показывают, что в большинстве случаев *пуассоновский тип потока и степенное амплитудное распределение являются устойчивыми статистическими признаками случайного процесса АЭ.* Ранее для упрощения расчетов нами часто использовалась экспоненциальная аппроксимация вида $w_n(u/u_t)$. Однако при динамическом диапазоне реальной АЭ более 26 дБ следует все же использовать степенную аппроксимацию (3).

На основе модели пуассоновского потока нами просчитаны потери регистрируемых импульсов АЭ при измерении интенсивности потока с помощью различных методов. К сожалению, поток регистрируемых сигналов АЭ во многих случаях сильно отличается от потока актов АЭ источника внутри тела, вследствие чего приходится решать обратную задачу восстановления истинных (излученных) параметров источника по зарегистрированным сигналам АЭ.

Для решения этой проблемы нами предложены и разрабатываются методы восстановления истинной (т.е. соответствующей действительному потоку процесса структурных преобразований внутри материала) интенсивности потока актов АЭ по регистрируемому сигналу.

На основе моделей пуассоновского потока (2) и наиболее часто встречающемся степенном виде плотности функции распределения амплитуд АЭ (3) получены простые соотношения для восстановления \dot{N}_a [3, 11, 15, 21]:

$$\dot{N}_a = \dot{N}_r / [1 - \dot{N}_r \tau L(m, D)]; \quad (4)$$

$$L(m, D) = (m - 1)^{-1} - (D^{m-1} - 1)^{-1} \ln D; \quad (5)$$

$$\dot{N}_a = N_r / (T - \Sigma t_0), \quad (6)$$

где \dot{N}_r — интенсивность потока селективированных импульсов АЭ по предложенному нами ранее методу, дающему «мертвое время», близкое к непродлевающему [3]; τ — постоянная времени после звучания датчика и изделия; u_r — уровень порога дискриминации; $D = u_{0\max} / u_r$ — динамический диапазон сигналов АЭ; $u_{0\max}$ — максимальная амплитуда, соответствующая верхней границе динамического диапазона сигналов АЭ; Σt_0 — суммарная длительность импульсов АЭ (общее мертвое время) на выходе регистрирующего тракта за интервал измерения интенсивности T (например, $T = 1$ с или $T = 0,1$ с).

Суть метода заключается в селективировании принятых сигналов АЭ строб-импульсами, длительность которых автоматически управляется амплитудой каждого радиоимпульса АЭ и равна суммарному мертвому времени датчика, материала, в измерении интенсивности потока селективированных импульсов \dot{N}_r . Метод селективирования дает хорошие результаты, однако аппаратная реализация такого селектора получается достаточно сложной и громоздкой.

Для преодоления этого недостатка нами также получены принципиально новые соотношения для возможности восстановления \dot{N}_a по огибающей продетектированных всплесков (активности \dot{N}_Σ) АЭ [3, 11, 15]:

$$\dot{N}_a = \dot{N}_\Sigma \exp[\Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)]. \quad (7)$$

Этот метод легко аппаратно реализуется, не требует специального селективирования и может быть использован на большинстве уже существующих аппаратных АЭ-комплексах [16, 24].

Полученные результаты позволяют также восстановить \dot{N}_a по скорости счета осцилляций АЭ \dot{N} [3, 11, 15]:

$$\dot{N}_a = \dot{N} / (f - \dot{N}) \tau L(m, D). \quad (8)$$

$$\dot{N}_a \approx \dot{N} / (f - \dot{N}) \tau, \text{ при } m = 2; D \gg 1, \quad (9)$$

где f — частота заполнения сигналов АЭ (приблизительно равна резонансу датчика). Условия $m \approx 2; D \gg 1$ часто выполняются для реальной АЭ.

Восстановление спектра, энергии и длительности акта АЭ

Из всех регистрируемых параметров спектр претерпевает наибольшие искажения в процессе распространения и приема сигналов, что часто приводит к недостаточной достоверности результатов диагностики по энергетическим и спектральным параметрам АЭ. Нами предложен метод, позволяющий восстановить спектральный состав во всей полосе частот и по нему оценить среднюю длительность τ_a и истинную (излученную) среднюю энергию акта АЭ E_a на разных стадиях деформации [3, 11, 15].

Известно, что нормированная на единичную площадь спектральная плотность $G(f)$ пуассоновского потока актов АЭ длительностью τ_a во всей $(0 \dots \infty)$ полосе частот имеет следующий вид [3, 11, 15]:

$$G(f) = 4\tau_a / (1 + 4\pi^2 f^2 \tau_a^2). \quad (10)$$

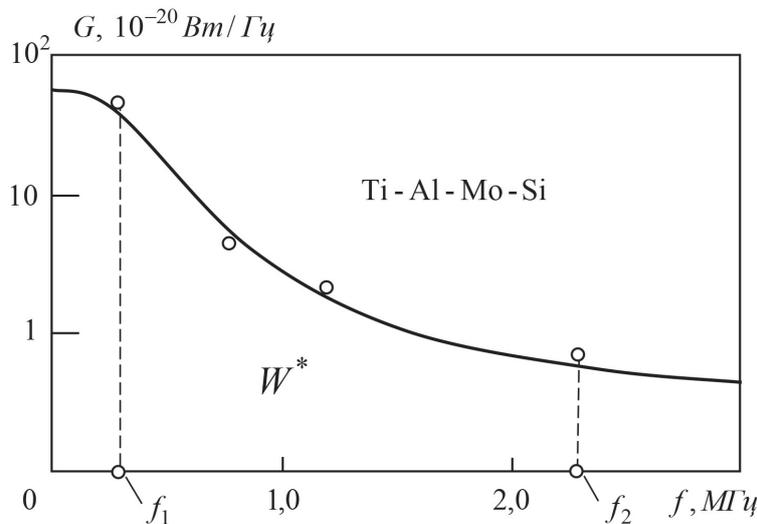


Рис. 3. Спектр АЭ сплава титана в конце упругой области

В качестве примера на рисунке 3 приведены полученные нами спектры потока сигналов АЭ двухфазного ($\alpha + \beta$) сплава титана (Ti-Al-Mo-Si) мартенситного класса в конце упругой области и аппроксимирующего его пуассоновского процесса импульсов длительностью $\tau_a = 8,5 \cdot 10^{-7}$ с.

По соотношению (10) можно экспериментально оценить среднюю длительность акта АЭ τ_a . Это легко сделать, наложив графики зависимости (10) на экспериментальные точки измеренного спектра АЭ $G^*(f)$ в полосе от f_1 до f_2 и подобрав параметр τ_a в (10) таким образом, чтобы значения аппроксимирующего спектра $G(f)$ наиболее близко прошли через измеренные значения $G^*(f)$ (экспериментальные точки спектра на рисунке 3).

Учитывая, что в полосе от f_1 до f_2 мощность аппроксимирующего процесса со спектром (10) имеет

$$\text{вид } W^{**} = W \int_{f_1}^{f_2} G(f) df, \text{ и приравняв мощности из-}$$

меренного W^* и аппроксимирующего W^{**} процессов в той же полосе от f_1 до f_2 , получим соотношение для оценки восстановленной средней мощности потока акта АЭ W во всей (от 0 до ∞) полосе частот:

$$W^* = W^{**} = W \int_{f_1}^{f_2} \frac{4\tau_a}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau_a^2)} df = W[F(f_2) - F(f_1)], \quad (11)$$

где

$$F(f) = \frac{2}{\pi} \arctg(2\pi f \tau_a). \quad (12)$$

Разрешив (11) относительно W и разделив на восстановленное согласно (7) значение интенсивности потока актов АЭ, получим восстановленное значение энергии акта АЭ E_a :

$$E_a = \frac{W}{\dot{N}_a} = \frac{\pi W^* \exp[-\Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)]}{2\dot{N}_\Sigma [\arctg(2\pi f_2 \tau_a) - \arctg(2\pi f_1 \tau_a)]}. \quad (13)$$

Здесь W^* — мощность АЭ, экспериментально измеренная в ограниченной полосе от f_1 до f_2 .

Установлено, что восстановленные согласно (10) и (13) по данным АЭ энергия E_a и длительность τ_a акта излучения связаны со степенью деформации, слабо зависят от ее скорости и для сплавов на основе Fe и Ti имеют следующие средние значения: $E_a = 10^{-15} \dots 10^{-13}$ Дж при $\tau_a < 10^{-6}$ с. При этом диапазон изменения параметров акта АЭ конкретного материала на разных стадиях деформации укладывается по величине приблизительно всего в один порядок [3, 15, 21]. Таким образом, происходит как бы *квантование энергии* АЭ, что свидетельствует об относительном постоянстве микрообъемов релаксации напряжений за счет скачков пластической микродеформации и о возможном квантовании волн пластической деформации в твердых телах.

Акустическая эмиссия в ходе физико-химических процессов

В последнее время обнаружено, что метод АЭ позволяет получать ценную (часто безальтернативную) информацию о кинетике химических и физико-химических процессов также и в жидких средах. Установлено, что такие процессы, как растворение, расплавление, кристаллизация, электролиз, гомогенные химические реакции, тоже сопровождаются испусканием (эмиссией) акустических волн в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот [28–33].

Типичные параметры сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе растворения приведены на рисунке 4 [28].

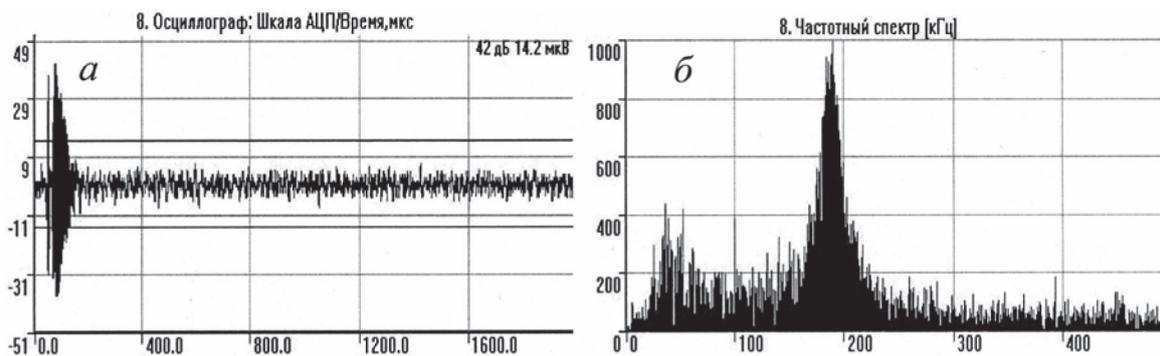


Рис. 4. Форма (а) и частотный спектр (б) импульса акустической эмиссии в процессе растворения кристалла NiSO_4

В настоящее время нет общепринятой точки зрения на природу явления АЭ при растворении, кристаллизации и плавлении веществ. По нашему мнению, источниками АЭ при растворении кристаллов

являются биения между близкими частотами колебаний растворяемых единиц вещества (кластеров, молекул, ионов и т.д.) [28]. Очевидно, что механизм АЭ в этом случае связан с дискретностью процесса рас-

творения, при котором в случае растворения ионного соединения (например, кристаллы NaCl) в полярном растворителе (вода) процесс растворения происходит на уровне отдельных ионов. В ряде случаев, вероятно, может проявляться и структурированность жидкости. Так, наличие супранадмолекулярных ком-

плексов воды может приводить к генерации акустических волн уже на уровне колебаний не отдельных молекул, а кластеров, включающих в себя до 10^9 молекул. Типичная динамика изменения интенсивности потока и суммарного количества актов АЭ в процессе растворения показана на рисунке 5.

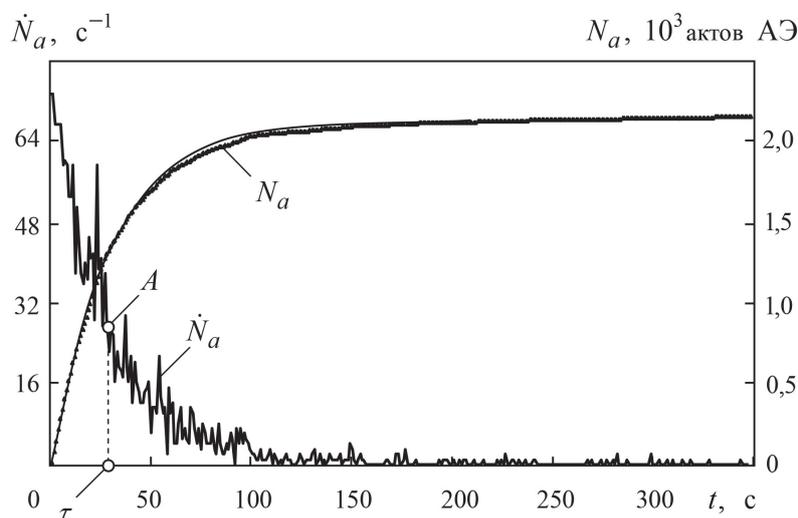


Рис. 5. Динамика изменения интенсивности потока и суммарного количества актов АЭ в процессе растворения кристалла NaCl

Получено следующее уравнение динамики изменения общего количества актов АЭ по мере растворения [28, 32]:

$$N_a = Km(1 - e^{-t/\tau}), \quad (14)$$

где N_a — суммарное количество актов АЭ к данному моменту времени t ; K — некоторый коэффициент, зависящий от чувствительности АЭ-аппаратуры и методики регистрации акустических сигналов; m — масса кристалла в начальный момент времени; τ — постоянная времени релаксации процесса растворения, определяемая в точке A по данным эмиссии (падение в e раз).

На рисунке 5 экспериментальные данные представлены микротреугольниками, а теоретический вид зависимости (14) — непрерывной кривой. Используя уравнение (14), можно рассчитать суммарное количество актов АЭ в любой момент времени для данной массы кристалла. Предварительно определив по данным АЭ-экспериментов конкретные значения K и τ , можно затем по регистрируемым значениям N_a эмиссии экспериментально оценить скорость растворения и массу оставшегося вещества [32].

Эксперименты показывают, что формула релаксационного процесса (14), описывающая изменение суммарного количества актов АЭ, достаточно хорошо описывает также кинетику процессов кристалли-

зации и пропитки [31, 32]. Например, это позволило оценить кинетику процесса роста кристаллов дигидрата сульфата кальция и предложить принципиально новый дистанционный метод определения начала, окончания и всей динамики процесса затвердевания гипсового или цементного раствора в реальном времени по параметрам сопутствующей АЭ, что имеет важное значение в строительной промышленности [32].

Количественная оценка процесса накопления повреждений по параметрам сопутствующей АЭ

Использование пуассоновской модели и восстановление параметров потока актов АЭ по формулам (4) — (9) дает возможность получить истинный вид зависимостей параметров АЭ вдоль кривой нагружения $\sigma - \varepsilon$ и существенно повысить достоверность результатов АЭ-диагностики.

Это позволило предложить основы метода идентификации стадий процессов накопления повреждений по положению различных особых точек интегральных параметров АЭ (например, локальных экстремумов интенсивности потока актов АЭ $\dot{N}_a(t)$, точек перелома $\dot{N}_a(t)$ или общего количества актов АЭ N_a [3, 11, 15, 21, 22]). В качестве примера рассмотрим задачу оценки концентрации микронесплошностей по восстановленному потоку актов АЭ с одной нижней точкой перелома ε . [рис. 6].

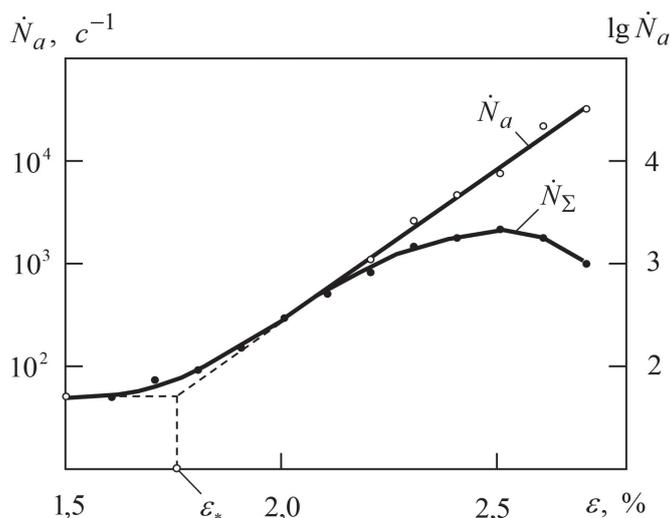


Рис. 6. Интенсивность потока актов АЭ вдоль кривой нагружения. Материал: сталь 95х18. Длина рабочей части образца — 75 мм, диаметр — 6 мм; Скорость деформации — $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$

Линейная зависимость логарифма $\dot{N}_a(\epsilon)$ после точки нижнего перелома ϵ_* на рисунке 6 соответствует экспоненциальной зависимости от ϵ не только интенсивности потока актов АЭ, но и интенсивности вызвавшего ее потока зарождения микронесплошностей. Интеграл от экспоненты тоже дает экспоненциальную зависимость, откуда следует, что концентрация C накопленных микронесплошностей в материале подчиняется экспоненциальной зависимости от ϵ . Таким образом, на основании данных АЭ, накопление микронесплошностей в данном материале вполне адекватно описывается в рамках модели экспоненциально размножающегося процесса, и его концентрация может быть записана в виде следующего соотношения:

$$C = C_0 \exp[\gamma(\epsilon - \epsilon_*)]; \quad C = N_{def} / V, \quad (15)$$

где C_0 — начальная (в точке $\epsilon = \epsilon_*$) концентрация повреждений; γ — постоянная размножения; ϵ_* — деформация начала накопления микронесплошностей; ϵ — текущая деформация; N_{def} — общее число микронесплошностей (микродефектов); V — объем материала.

Все параметры процесса (15) можно количественно оценить по данным АЭ испытаний.

Продифференцировав (15) по времени и считая, что каждый акт повреждения в материале сопровождается актом излучения АЭ, получим следующий вид зависимости интенсивности потока излученных (восстановленных) актов АЭ от приложенной деформации:

$$\dot{N}_a = VC_0 \gamma \dot{\epsilon} \exp[\gamma(\epsilon - \epsilon_*)]. \quad (16)$$

Значение постоянной размножения γ равно тангенсу наклона прямого отрезка $\ln \dot{N}_a = \ln \dot{N}_a(\epsilon)$,

для чего на рисунке 6 надо перейти к нормальным логарифмам, а C_0 определяется из соотношения (16) при $\epsilon = \epsilon_*$ и подстановкой в него соответствующего этой точке значения \dot{N}_a .

Таким образом, определив с помощью АЭ конкретные значения C_0 , γ и ϵ_* , можно по формуле (15) рассчитать реальную концентрацию повреждений в любой момент нагружения, в том числе и в момент разрушения.

Использование метода инвариантов АЭ для диагностики предразрушающего состояния

Некоторое время назад нами был предложен новый подход, заключающийся в том, что связь регистрируемых сигналов АЭ с конкретным процессом разрушения определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) в силу ряда предельных теорем статистических распределений параметров АЭ [3, 12]. Близкий метод использован авторами [23, 37].

Частным случаем такого подхода является метод, суть которого состоит в использовании в качестве критерия образования макродефекта (трещины) факта отклонения параметров потока актов АЭ от пуассоновского вида.

Суть такого подхода заключается в следующем. В силу случайного характера потока микроповреждений на некоторых стадиях деформации и разрушения твердых тел можно найти устойчивые (инвариантные) соотношения $I_p^* = inv$ между регистрируемыми параметрами АЭ. Тогда появление отклонений регистрируемых значений I_p^* этих соотношений от их инвариантных значений I_p^* может служить критерием перехода на следующую стадию деформации или разрушения.

Для количественного описания степени отклонения I_p от I_p^* нами введен *информационный параметр* i_p , простейший вид которого:

$$i_p = i_p(I_p, I_p^*) = |(I_p - I_p^*)| / I_p^*. \quad (17)$$

Отношение стандартного отклонения $\sigma_{\Delta t}$ (корень квадратный из дисперсии временных интервалов между событиями АЭ) к их среднему значению Δt для пуассоновского потока актов АЭ имеет устойчивое значение, равное единице, что позволило предложить это соотношение в качестве первого временно-инвариантного соотношения

$$I_{1\Delta t} = \sigma_{\Delta t} / \Delta t. \quad (18)$$

Инвариантное (устойчивое) значение этого соотношения $I_{1\Delta t}^*$ (первый временной инвариант) и его информационный параметр $i_{1\Delta t}$ у пуассоновского потока имеют следующие величины:

$$I_{1\Delta t}^* = \sigma_{\Delta t} / \Delta t = 1, \quad i_{1\Delta t} = |(I_{1\Delta t} - I_{1\Delta t}^*)| / I_{1\Delta t}^* = 0. \quad (19)$$

Аналогично можно предложить первое амплитудное инвариантное соотношение I_{1u} и амплитудный информационный параметр i_{1u} [3, 12]:

$$I_{1u} = \sigma_u / (\bar{u}) = I_{1u}^* = 0,8, \quad i_{1u} = |(I_{1u} - I_{1u}^*)| / I_{1u}^* = 0, \quad (20)$$

где σ_u и \bar{u} — соответственно стандартное отклонение и среднее значение амплитуды импульсов АЭ, а I_{1u}^* — устойчивое значение первого амплитудного инвариантного соотношения, часто близкое к 0,8 на ранних стадиях нагружения.

Образование макродефекта (трещины) обычно приводит к отклонению параметров потока актов АЭ от пуассоновского, вследствие чего нарушение соотношений (19) и (20) можно рассматривать в качестве *критерия наступления момента предразрушающего состояния*. В некоторых публикациях соотношениям (19) и (20) дано название инвариантов Буйло [38].

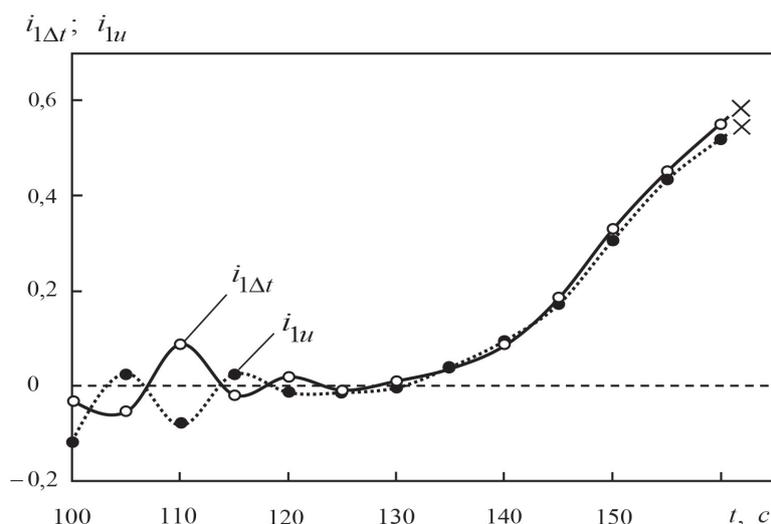


Рис. 7. Графики изменения временных и амплитудных информационных параметров в процессе нагружения образца стали 95x18. Крестиками показан момент разрушения

Результаты наших последних экспериментов показывают, что во многих случаях измерение и анализ вида информационных параметров являются более наглядными и предпочтительными, чем прямое измерение самих инвариантных соотношений [12].

На рисунке 7 приведена динамика изменений (с учетом знака) инвариантных параметров $i_{1\Delta t}$ и i_{1u} при стандартном нагружении образца стали 95x18.

Видно, что графики значений как временных $i_{1\Delta t}$, так и амплитудных информационных параметров i_{1u} почти не зависят от конкретных значений инвариантов ($I_{1\Delta t}^* = 1$; $I_{1u}^* = 0,8$), в ходе рассеянного накопле-

ния микронесплошностей (при $t < 140$ с) близки к нулю [12], а при локализации процесса в ходе зарождения и роста трещины в пределе стремятся к единице. Таким образом, факт существенного отклонения временных и амплитудных информационных параметров АЭ от нуля можно использовать в качестве критерия наступления предразрушающего состояния (зарождения макродефекта).

Описанные в работе методы и алгоритмы позволяют существенно повысить точность и достоверность результатов оценки параметров процессов структурных изменений в материалах по данным АЭ-испытаний. Полученные соотношения учиты-

вают устойчивые в силу ряда предельных теорем статистические параметры случайного процесса АЭ, являются достаточно универсальными, вследствие чего могут быть полезны при решении задач

повышения точности и достоверности результатов при использовании эффекта АЭ в исследованиях динамики различных структурных изменений в твердых телах.

Библиографический список

1. Acoustic Emission. ASTM Special Technical Publication 505. Baltimore. 1972.
2. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М., 2017.
3. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Ростов-н/Д., 2008.
4. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода акустической эмиссии к исследованию деформационного поведения структурно-неоднородных материалов. Барнаул, 2008.
5. Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018) : материалы Всероссийской конференции с международным участием (Тольятти, 28 мая — 1 июня 2018 г.) / отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. Тольятти, 2018.
6. Акустическая эмиссия материалов и конструкций : материалы Первой Всесоюзной конф. / под ред. И.И. Ворovichа. Ростов-н/Д., 1989. Ч. 1.
7. Акустическая эмиссия материалов и конструкций : материалы Первой Всесоюзной конф. / под ред. И.И. Ворovichа. Ростов-н/Д., 1989. Ч. 2.
8. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. М., 1980.
9. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / под ред. Л.Н. Степановой и А.Н. Серьезнова. М., 2008.
10. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / под ред. Л.Н. Степановой и А.Н. Серьезнова. Новосибирск, 2011.
11. Builo S.I. Chapter 15. Physical, Mechanical and Statistical Aspects of Acoustic Emission Diagnostics // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. New York, 2013.
12. Буйло С.И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. 2018. №4.
13. Салита Д.С., Поляков В.В. Применение метода главных компонент к исследованию акустической эмиссии при пластической деформации свинцовых сплавов // Известия Алтайского гос. ун-та. 2018. № 4.
14. Gao G., Xing Y. Monitoring the Evolution of Cracking Damage in an Area Under Stress Concentration Via Acoustic Emission // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2018. No 4.
15. Буйло С.И. Диагностика стадий деформации и разрушения по интегральным параметрам потока актов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2004. № 8.
16. Бобров А. Л., Попков А.А. Восстановление измеряемых характеристик источников акустической эмиссии при контроле металлоконструкций в машиностроении // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2018. № 3. .
17. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С. и др. Исследование деформации и разрушения по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. № 9.
18. Stankevych O., Skalsky V. Investigation and Identification of Fracture Types of Structural Materials by Means of Acoustic Emission // Engineering Fracture Mechanics. 2016. Vol. 164.
19. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. 2016. № 4.
20. Егоров А.В., Поляков В.В., Гумиров Е.А., Лепендин А.А. Регистрация сигналов акустической эмиссии с помощью модифицированного метода осцилляций // Приборы и техника эксперимента. 2005. Т. 48, № 5.
21. Буйло С.И. Метод идентификации стадий деформации и разрушения по положению особых точек восстановленного потока актов АЭ // Дефектоскопия. 2008. № 8.
22. Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Замедленное разрушение и параметры оценки технологической прочности сварных соединений из высокопрочных сталей, работающих при низких температурах // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. № 1.
23. Харитонов К.О., Чье Ен Ун, Калинов Г.А. Методы обнаружения импульсов акустической эмиссии в задачах геомеханического мониторинга // Ученые заметки ТОГУ. 2013. № 4.
24. Сараев А.С., Зимакова М.В., Третьяков А.В. Исследование преддефектного состояния котлов железнодорожных цистерн и установление их остаточного ресурса // Проблемы механики железнодорожного транспорта : материалы XIII Международной конференции (Днепропетровск, 23–25 мая 2012 г.). Днепропетровск, 2012.
25. Буйло С.И. Диагностика предразрушающего состояния материалов по параметрам амплитудного распре-

деления сигналов сопутствующего акустического излучения // Дефектоскопия. 2012. № 11.

26. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, вып. 7.

27. Babak V.P., Beregun V.S., Krasilnikov A.I. and Poloboc T.A. Simulation Modeling of Noise Signals Which are Arising During the Heat-and-Power Equipment Activity // Scientific Proceedings of NDT. 2013. No 2.

28. Буйло С.И., Кузнецов Д.М. Акустико-эмиссионный контроль и диагностика кинетики физико-химических процессов в жидких средах // Дефектоскопия. 2010. № 9.

29. Urbach Alexander, Banov Mukharbiy, Harbuz Yevhen, Zujevs Vladimir, Khodos Nikolay. Application of acoustic emission method for research of process of crystalline substance dilution // Scientific Journal of Riga Technical University. 2010. Volume 34.

30. Титаренко Н.Н., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Полионов В.П. Использование генерации акустических колебаний в химической реакции и свойств пузырьковой среды в жидкости для выявления сквозных дефектов оболочек блочков с натрием // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 1.

31. Буйло С.И., Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л. Акустико-эмиссионный мониторинг капиллярного движения жидкости в пористых средах // Дефектоскопия. 2014. № 7.

32. Builo S.I., Kuznetsov D.M., Gaponov V.L. Chapter 13. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media // Advanced Materials. Studies and Applications. New York, 2015.

33. Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л., Гайдукова Ю.А., Маслова Е.Е. Изучение процессов дегазации в жидкости методом акустической эмиссии // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4.

34. Беляев К.П., Кушнир Н.В. Использование информационных технологий при моделировании накопления дефектов на одномасштабном уровне и разрушении некоторых наноматериалов // Научные труды КубГТУ. 2014. №4.

35. Tao Wang, Yaodong Jiang, Shaojian Zhan, Chen Wang. Frictional sliding tests on combined coal-rock samples // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. No 6.

36. Prashanth Abraham Vanniamparambil, Ivan Bartoli, Kavan Hazeli, Jefferson Cuadra, Eric Schwartz, Raghavendra Saralaya, Antonios Kontsos. An Integrated Structural Health Monitoring Approach for Crack Growth Monitoring // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2013. Vol. 24. No 1.

37. Барат В.А., Чернов Д.В., Елизаров С.В. Применение методов обнаружения разрядки потока данных для повышения помехоустойчивости метода акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2016. № 6.

38. Дорохова Е. Г., Ростовцев М. Ю. Применение информационного статистического АЭ-критерия // В мире неразрушающего контроля. 2007. №2(36).