

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ (05.11.13)

УДК 621.793:620.199:001.18

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-96-101

Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений

В.В. Носов, А.Р. Ямилова, Н.А. Зеленский, И.В. Матвиян

Отсутствие строгости в обосновании подходов к интерпретации результатов регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) делает актуальной необходимость совершенствования методических аспектов акустико-эмиссионного контроля и обеспечения достоверности диагностирования прочностного состояния технических объектов, позволяющих связать параметры АЭ с параметрами повреждаемости материала и показателями надежности. Решение поставленной задачи основано на последовательном построении адекватных, логически взаимосвязанных и иерархически подчиненных моделей объекта контроля по порядку убывания их информативности с повышением уровня абстрагирования и определения параметров модели. С этих позиций сформулированы основные принципы оптимизации технологий АЭ диагностирования, касающиеся правил проведения АЭ испытаний, регистрации и обработки первичной АЭ информации, построения моделей определяющего ресурс процесса разрушения, отображающего его явления АЭ и временных зависимостей ее параметров. Функциональная модель фокусирует внимание на прогнозирование ресурса объекта контроля и выделение в качестве предмета исследования связанных с ним процесса микротрещинообразования и временных зависимостей параметров АЭ, вытекающая из нее физическая модель увязывает выделенные функциональные свойства и факторы обобщенными физическими свойствами и закономерностями. Последующее построение математической модели сводится к количественному описанию выделенных физических закономерностей в виде предельно конкретных математических выражений, объединяющей метрологические и прочностные факторы. Описана построенная в соответствии с этими принципами микромеханическая модель процесса разрушения и временных зависимостей параметров сопровождающей его акустической эмиссии, позволяющая предложить подход к определению информативных диагностических параметров, устойчивых к влиянию дестабилизирующих факторов и несущих информацию о прочностном состоянии объекта контроля. Приведены некоторые концентрационно-кинетические АЭ показатели прочностного состояния технических объектов, включающие формулы оценки характеристик прочности и ресурса.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, информация, оптимизация, микромеханическая модель, диагностические параметры, прочность, ресурс, сварные соединения.

Optimizing the Acoustic-Emission Technique for Examining the Strength of Welded Joints

V.V. Nosov, A.R. Yamilova, N.A. Zelenskiy, I.V. Matviyan

Lack of rigor in the justification of approaches to interpretation of acoustic emission (AE) signal recording results generates the need to improve the methodological aspects of acoustic emission (AE) examination methods and to ensure the validity of diagnosing the strength state of technical items, which would make it possible to correlate the AE parameters with the material damageability parameters and reliability indicators. The stated problem is solved by sequentially constructing adequate, logically interconnected and hierarchically subordinated models of the examined item in decreasing order of their informational content with increasing the level of abstraction and determining the model parameters. Based on this approach, the article formulates the main principles of optimizing the AE-based diagnostic technologies in regard of rules for conducting AE tests, recording and processing primary AE information, and constructing models describing the lifetime governing destruction process, AE phenomenon models reflecting the destruction process, and the time dependencies of its parameters. The functional model is focused at predicting the examined item's lifetime and selecting the crack formation process and time dependences of the AE parameters related to the lifetime as a subject of study. The physical model that follows from the functional model interconnects the selected functional properties and factors via generalized physical properties and laws. The subsequent

construction of the mathematical model boils down to a quantitative description of the selected physical laws in the form of very specific mathematical expressions uniting the metrological and strength factors. The article describes the micromechanical model describing the destruction process and time dependencies of the parameters relating to the acoustic emission accompanying the destruction process. This model, which is constructed in accordance with the above-mentioned principles, makes it possible to propose an approach to determining the informative diagnostic parameters robust to the influence of destabilizing factors and bearing information about the strength of the examined item. The article presents some concentration-kinetic AE indicators characterizing the strength state of technical items, which contain formulas for estimating the strength and lifetime parameters.

Key words: acoustic emission, information, optimization, micromechanical model, diagnostic parameters, strength, lifetime, welded joints.

Введение

Применение метода акустической эмиссии для целей диагностирования в различных областях промышленности опирается на аппаратный и методический базисы. Первый заметно развивается, сопровождаясь повышением чувствительности, оцифровкой сигналов, компьютеризацией и автоматизацией регистрации первичной информации, создавая предпосылки расширения номенклатуры объектов диагностирования, дефектоскопии и неразрушающего контроля, второй более консервативен и в значительной степени отстает в темпах развития от первого [1, 2], сдерживая перспективные технологические разработки. Возможности регистрации превосходят возможности интерпретации получаемых результатов, а действующие на сегодняшний момент Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля [3] направлены, главным образом, на получение первичной информации и обеспечение регистрации сигналов АЭ, вопросам же вынесения конечного диагноза уделено меньше внимания, чему и посвящена данная статья.

Снижение дестабилизирующего влияния помех, неопределенности в интерпретации результатов регистрации сигналов и связи критериев активности источников АЭ с критериями работоспособности сложно нагруженных объектов представляется возможным на основе принципов информационной оптимизации АЭ контроля. В качестве критерия оптимизации следует принимать способность к обеспечению долгосрочного прогнозирования работоспособности и оценки времени до разрушения. Количественно эту способность можно характеризовать коэффициентом корреляции значений диагностических параметров АЭ или рассчитываемых через них прочностных характеристик со значениями экспериментально определяемых времен до разрушения или образования трещины, размеров дефектов, разрушающей нагрузки, предела прочности, расчетных значений напряжений или связанной с ними зоны промышленного объекта и пр.

Принципы оптимизации акустико-эмиссионного контроля прочности

Проведение АЭ контроля включает в себя выбор и подготовку аппаратуры, выбор режима и реализацию диагностического нагружения объекта контроля, про-

ведение АЭ испытаний, обеспечение регистрации сигналов АЭ, получение первичной информации, определение информативных диагностических параметров, связанных с характеристиками состояния, степенью опасности дефектов, критериями работоспособности и показателями надежности объектов диагностирования.

Разработка технологий АЭ контроля прочности должна сводиться:

- к комплексной формулировке эксплуатационных аспектов обеспечения работоспособности промышленных объектов;
- выделению прочности как основного критерия их работоспособности;
- моделированию определяющего прочность и остаточный ресурс процесса накопления повреждений, лимитируемого моментом достижения критической поврежденности;
- к обеспечению возможности прогнозирования этого момента на основе корректного наблюдения за процессом накопления повреждений с помощью метода АЭ.

Подходы к поиску диагностических параметров АЭ и разработке конкретных алгоритмов АЭ диагностирования должны быть основаны на последовательном построении различного уровня моделей процессов и явлений, определяющих работоспособность и параметры регистрируемых сигналов [4].

Физическая модель процесса разрушения и явления акустической эмиссии

Моделирование повреждений требует конкретизации элементарного акта процесса накопления повреждений и увязывание его с сигналом АЭ, количественного описания этого процесса на основе использования универсальных кинетических закономерностей разрушения и его физических констант, формулировки критерия работоспособности (условия завершения процесса), связываемого с потерей работоспособности, критерия подобия процесса разрушения и упругого излучения, обеспечивающего контролепригодность процесса мелкодисперсного разрушения, разработки правил выбора характеристик регистрирующей аппаратуры, проведения диагностического нагружения, регистрации сигналов АЭ, обработки ее результатов, выбора информативных параметров АЭ и расчета ресурса на их основе.

В основу построения физических моделей и подбора диагностических параметров АЭ положены сле-

дующие представления о происходящих в материале процессах накопления повреждений и явления АЭ.

1. Характеристики прочности и параметры АЭ конструкционных материалов являются результатом суперпозиции и зависят от результата конкуренции одновременно протекающих в материале процессов разрушения и пластического деформирования структурных элементов.

2. Процесс разрушения состоит из стадий мелкодисперсного (рассеянного по объему объекта либо локально сгруппированного в области дефекта) накопления концентрации микротрещин, состоящего из кинетически неоднородного и однородного этапов, и укрупненного локализованного разрыва сплошности (образования или роста трещины), протекающего упруго либо пластически.

3. Ресурс большинства длительно и сложно нагруженных промышленных объектов определяется однородным этапом первой стадии накопления концентрации микротрещин до ее критической величины процессом, протекающим в условиях упругого деформирования. Первая стадия моделируется в виде разрушения (появления микротрещины) представительного объема материала (структурного элемента) на соответствующем масштабном уровне.

4. Акустическая эмиссия упруго деформированных материалов связана, главным образом, с процессом микротрещинообразования. Количество сигналов АЭ от пластической деформации перенапряженных структурных элементов относительно невелико. Для уменьшения их дестабилизирующего влияния на результаты контроля следует применять частотную и амплитудную фильтрации.

5. Неоднородность прочностного состояния материала промышленного объекта обусловлена разбросом значений долговечности составляющих его структурных элементов. Степень неоднородности оценивается значением коэффициентов модели временных зависимостей параметров АЭ, определяемых путем сопоставления результатов их имитационного моделирования с результатами натуральных АЭ испытаний.

Образующая в твердом теле микротрещина является точечным источником упругой волны. Исходя из предположений упругого деформирования структурного элемента, высвобождаемая в связи с образованием микротрещины энергия связана с размером структурного элемента и напряжением на нем в момент разрушения. Часть этой энергии переходит в энергию упругой волны, которая, по мере приближения к поверхности материала, затухает в зависимости от частоты волны, коэффициента ее затухания и расстояния, пройденного до места регистрации АЭ. Из всей совокупности испускаемых из материала упругих волн акустико-эмиссионной аппаратурой регистрируется только часть попадающих в некоторый диапазон, ограниченный верхним и нижним уровнями амплитудной, частотной

и временной (по минимальной длительности пауз) дискриминации.

Математическая модель процесса разрушения и явления акустической эмиссии

Регистрируемая первичная АЭ информация количественно описывается микромеханической моделью временных зависимостей параметров АЭ, построенной на основе микромеханики разрушения, кинетической теории прочности и статистических закономерностей упругого излучения.

Для обеспечения информативности АЭ контроля значения первичных параметров АЭ $\xi(t)$ должны иметь смысл аналогов повреждаемости материала и, в частности, быть пропорциональными величине концентрации $C(t)$ образующихся микротрещин:

$$\xi(t) = k_{AE} C(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \times \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t')) \right] \right\} d\omega, \quad (1)$$

где t — текущее время; k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК),

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) dudfd\Delta t, \quad (2)$$

где C_0 — начальная концентрация структурных элементов; ω — параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта, зависящего от изменяющихся во времени растягивающих напряжений на микроэlemente $\sigma(t)$; V — контролируемый объем материала; $\Psi(\omega)$ — моделирующая прочностную неоднородность и пластическую перестройку прочностного состояния функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объема V материала; $\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/KT]$ — время разрушения микроэlementa (формула Журкова); U_0 — энергия активации процесса разрушения; ω_0 и $\Delta\omega$ — нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω соответственно.

Временная зависимость прочностного параметра

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t)/KT, \quad (3)$$

где γ — структурно-чувствительный коэффициент; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

В качестве АЭ аналогов повреждаемости материала $\xi(t)$ могут выступать число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда или энергия сигналов АЭ. Информативными параметрами ξ могут являться любые первичные параметры АЭ — число N_Σ регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счет N АЭ, суммарная амплитуда или комбинация этих параметров.

Уравнение (1) представляет собой модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии,

регистрируемой на стадии мелкодисперсного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности прочностного состояния материала контролируемого объекта, позволяющую в совокупности с известным критическим значением относительной концентрации микротрещин и отработанным ресурсом оценить остаточный ресурс. Модель (1) позволяет направлять поиск наиболее информативных акустико-эмиссионных показателей и способы их оценки. Стабильность значений U_0 подтверждает вывод о том, что основной характеристикой структуры конкретного образца является его структурно-чувствительный коэффициент γ , а для АЭ оценки прочности, контроля или диагностики состояний промышленных объектов в большинстве случаев достаточно определение его величины или величин параметра ω .

Определение параметров микромеханической модели

Этап является наиболее сложным, поскольку наиболее абстрагирован и требует детально обоснованного принятия дополнительных условий, снимающих излишнюю неопределенность. Наибольшее количество работ в той или иной форме посвящено поиску связи между входящими в (1) параметрами на основе решения динамической задачи теории упругости. Поиск осложняется при учете анизотропии упругих свойств, приводящей к неопределенности значения коэффициента $k_{AE}C_0$, отражающей индивидуальность результатов АЭ измерений и зависимость от типа диагностируемого объекта, его формы, размеров, вида дефектов, технологии изготовления, вида напряженного состояния, аппаратуры, помех, способа и качества крепления датчиков, коэффициента усиления измерительного тракта системы АЭ и его колебаний, расстояния датчика до источника АЭ и других факторов, дестабилизирующих связь параметров АЭ со степенью опасности дефекта или прочностными показателями объекта контроля.

Для уменьшения степени влияния этих факторов формулируются стабилизирующие значения k_{AE} условия проведения АЭ измерений, которые состоят в обеспечении в момент проведения АЭ контроля:

- стабильности контролируемого объема, диагностируемого объекта;

- стабильности коэффициента усиления и порогов дискриминации измерительной системы АЭ;
- стабильности характеристик энергетического или амплитудного распределения сигналов АЭ;
- подобия диагностического и рабочего нагружения диагностируемого объекта;
- постоянной скорости диагностического нагружения.

Большинство этих требований обеспечивает выполнение Правил [3].

Связывая параметры однородного этапа микроскопического разрушения с параметрами АЭ, модель позволяет формулировать соответствующие микро- и наноуровням энергетические, структурные и временные характеристики прочности, предложить ряд ценных диагностических АЭ показателей прочностного состояния (см. таблицу) [4—9], лежащих в основе алгоритмов неразрушающего АЭ контроля прочности.

При равномерном нагружении образцов, когда напряжения в них возрастают с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ и $\sigma = \dot{\sigma}t$ (режим нагружения при стандартных статических испытаниях), время до разрушения образцов

$$t^* = \{U_0 - KT \ln[KTC_0/(\tau_0\dot{\sigma}C^*)]\}/\dot{\sigma}, \tag{4}$$

где $\dot{\sigma}$ — скорость роста напряжений; τ_0 — период атомных колебаний (относительно стабильная величина, примерно равная 10^{-13} с); C^* — критическая концентрация микротрещин.

Предел прочности

$$\sigma^* = t^*\dot{\sigma} = \{U_0 - KT \ln[KTC_0/(\tau_0\dot{\sigma}C^*)]\}/\gamma. \tag{5}$$

Разрушающая нагрузка

$$F_p \approx (M + \ln(F'_p k Y_{AE})/(k Y_{AE})), \tag{6}$$

где k — коэффициент пропорциональности между напряжениями и внешней нагрузкой F , $k = \sigma/F$; M — константа вида сварного соединения, температуры и частоты ωN его нагружения, $M \approx U_0/KT - 34$.

Число циклов до разрушения

$$N_C = N_B / \exp W_{AE}. \tag{7}$$

где N_B — характеристический параметр материала, температуры и частоты его нагружения, определяется по кривой усталости образцов данного материала.

Некоторые концентрационно-кинетические АЭ показатели прочностного состояния технических объектов, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов

АЭ показатель	Микромодель	Наномодель	Свойство
X_{AE}	$d \ln \xi / dt$	$\gamma \dot{\sigma} / KT$	Наноструктура
Y_{AE}	$d \ln \xi / d \sigma$	γ / KT	Наноструктура
Z_{AE}	$\ln \xi - \ln A_D$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	Опасность разрушения
ΔZ_{AE}	$\ln \xi_1 - \ln \xi_2$	$\omega_1 - \omega_2$	Относительная опасность
X_{AE}	$\ln \xi_1 / \ln \xi_2$	σ_1 / σ_2	Относительная нагруженность
W_{AE}	$d \ln \xi / d K_n$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	Опасность разрушения

Примечание. $A_D = k_{AE}C_0/\{\tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/KT]\}$; K_n — коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей).

Выводы

Информационная оптимизация акустико-эмиссионного контроля существенно повышает эффективность АЭ-диагностирования и расширяет номенклатуру его возможных объектов. Рассмотренный подход к обработке акустико-эмиссионной информации создает предпосылки для детализации исследований влияния различных факторов на эффективность контроля, повышает точность оценки остаточного ресурса, развивает представления о происходящих в конструкционных материалах процессах. Принципы, заложенные в основу создания подхода, имеют универсальное методологическое значение и могут быть заложены в основу оптимизации технологий неразрушающего контроля состояния объектов различных областей промышленности.

Литература

1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
2. Ivanov V. I. The Prime Problems of Acoustic Emission Diagnostics of Technical Devices and Constructions // 10th European Conference of Non-Destructive Testing. Moscow. June 7 – 11. 2010. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_03.pdf
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
4. Носов В.В. Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основ эффективности неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 3 (65). С. 713.
5. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. СПб: СПбГТУ, 2011.
6. Носов В.В. Механика композиционных материалов. СПб: СПбГТУ, 2011.
7. Носов В.В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 24—35.
8. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 2 (219). С. 182—190.
9. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 52—67.

References

1. Bigus G.A., Daniev YU.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Diagnostika Tekhnicheskikh Ustroystv. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014. (in Russian).
2. Ivanov V. I. The Prime Problems of Acoustic Emission Diagnostics of Technical Devices and Constructions // 10th European Conference of Non-Destructive Testing. Moscow. June 7 – 11. 2010. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_03.pdf
3. ПБ 03-593-03. Pravila Organizatsii i Provedeniya Akustiko-Emissionnogo Kontrolya Sosudov, Apparatov, Kotlov i Tekhnologicheskikh Truboprovodov. (in Russian).
4. Nosov V.V. Metodologiya Akustiko-Emission-Noy Otsenki Prochnosti kak Osnov Effektivnosti Nerazrushayushchego Kontrolya // V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya. 2014;3(65);713. (in Russian).
5. Nosov V.V. Diagnostika Mashin i Oborudovaniya. SPb: SPbGTU, 2011. (in Russian).
6. Nosov V.V. Mekhanika Kompozitsionnykh Materialov. SPb: SPbGTU, 2011. (in Russian).
7. Nosov V.V. Avtomatizirovannaya Otsenka Resursa Obratstov Konstruksionnykh Materialov na Osnove Mikromekhanicheskoy Modeli Vremennykh Zavisimostey Parametrov Akusticheskoy Emissii // Defektoskopiya. 2014;12;24—35. (in Russian).
8. Nosov V.V., Nominas S.V., Zelenskiy N.A. Otsenka Prochnosti Sosudov Davleniya na Osnove Ispol'zovaniya Yavleniya Akusticheskoy Emissii // Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politekhnicheskogo Universiteta. 2015;2 (219):182—190. (in Russian).
9. Nosov V.V. Printsipy Optimizatsii Tekhnologiy Akustiko-Emissionnogo Kontrolya Prochnosti Promyshlennykh Ob'ektov // Defektoskopiya. 2016;7:52—67. (in Russian).

Сведения об авторах

Носов Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, ведущий научный сотрудник инженерингового центра «Центр компьютерного инженеринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, e-mail: nosovvv@list.ru

Ямилова Алсу Римовна — аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, e-mail: alsouyamilova@mail.ru

Зеленский Николай Алексеевич — аспирант кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, e-mail: smoke.kolay@mail.ru

Матвиан Илья Викторович — аспирант кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, e-mail: mortensen19931@yandex.ru

Information about authors

Nosov Viktor V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of the National Instrument Engineering Dept. of Saint-Petersburg Mining Institute, Saint Petersburg, Leading Researcher at the Engineering Center «Computer Engineering Center» of Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, e-mail: nosovvv@list.ru

Yamilova Alsu R. — Ph.D.-student of Transportation and Storage of Oil and Gas Dept. of Saint-Petersburg Mining Institute, Saint Petersburg, e-mail: alsouyamilova@mail.ru

Zelenskiy Nikolay A. — Ph.D.-student of Instrumentation Dept. of Saint-Petersburg Mining Institute, Saint Petersburg, e-mail: smoke.kolay@mail.ru

Matviyan Ilya V. — Ph.D.-student of Instrumentation Dept. of Saint-Petersburg Mining Institute, Saint Petersburg, e-mail: mortensen19931@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2016