

УДК 620.168

doi:10.18720/SPBPU/2/id-159

Е.Е. Дамаскинская¹, Е.Ю. Нефедьев², Л.О. Стояновский³, Д.И. Фролов⁴

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СТРАГИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В СТАЛЯХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ



¹Дамаскинская Екатерина Евгеньевна,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 754-0687, E-mail: kat.dama@mail.ioffe.ru.



²Евгений Юрьевич Нефедьев,
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (911) 241-1988, E-mail: ne246@ya.ru.



³Стояновский Лев Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (905) 230-4149, E-mail: sto-lev@yandex.ru.



⁴Фролов Дмитрий Игоревич,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 594-9515, E-mail: dm.frolov@mail.ioffe.ru.

Аннотация

Данное исследование посвящено разработке метода определения момента старта трещины в сталях методом акустической эмиссии (АЭ). С данной целью проведено исследование сигналов АЭ, излучаемых конструкционной сталью при нагружении образцов с предварительно

выращенными трещинами. Исследовались образцы, изготовленные из конструкционной стали SA-508 M Gr.4N Cl.2. Использовались методы механики разрушения, акустической эмиссии. Существование связи между параметрами АЭ и величиной подраста трещины проверялось методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова. На уровне значимости 5% проверены гипотезы о существовании линейной связи между подрастом трещины и шестью кумулятивными параметрами АЭ. Показана справедливость такой гипотезы для пяти из шести параметров АЭ. Для одного из параметров АЭ гипотеза отклонена.

Ключевые слова: страгивание трещины, акустическая эмиссия, механика разрушения, непараметрическая статистика.

Введение

Целью исследования была разработка метода акустико-эмиссионного определения момента достижения подраста трещины величиной 0,2 мм. Задачами исследования были: нахождение параметров АЭ, способных контролировать заданный подраст трещины и проверка справедливости гипотезы о существовании связи между параметром АЭ и величиной подраста трещины.

Определение момента старта трещины необходимо при испытании образцов на трещиностойкость для определения механических свойств. А также при испытании и мониторинге за работой конструкций и контроле за технологическими процессами, например, процессом сварки ответственных изделий.

Механика разрушения [9] занимается изучением поведения твердых тел с макротрещинами. Важной стороной механики разрушения является определение параметра трещиностойкости материала. При этом необходимо определить момент страгивания трещины при механических испытаниях.

ГОСТ 25.508-85 [1] требует для получения удовлетворительного результата остановки испытаний при получении подраста трещины величиной 0,2 мм. Аналогичные требования содержатся и в иностранных нормативных документах [2-4].

Основы АЭ систематически были изложены в работе [6], и регламентируются действующим ГОСТом 52727 [7]. Ранним нормативным документом по применения АЭ для определения характеристик вязкости разрушения материалов были Методические рекомендации МР 240-87 [5].

Определением момента старта трещины занимались многие исследователи с момента начала применения метода АЭ в технике [8, 10-12]. Многочисленные подходы чаще всего были основаны на исследовании активности и амплитуд сигналов АЭ, но носили качественный характер.

В работе [11] отмечено, что момент страгивания трещины совпадает с началом непрерывного излучения сигналов АЭ большой амплитуды.

В работе [12] исследовалось показано, что наиболее информативным параметром сигналов АЭ является их амплитуда, которая энергетически характеризует величину единичного подрастания трещины. Сумма амплитуд сигналов связывается с общим подрастанием площади трещины в работах [21, 23, 24].

Момент страгивания трещины характеризуется резким переходом от излучения отдельных низкоамплитудных сигналов, обусловленных раскрытием и нагружением вершины трещины, к спонтанному излучению высокоамплитудных сигналов с высокой частотой следования. Отличительным признаком старта и дальнейшего роста трещины является излучение широкополосных сигналов АЭ, характеризующихся высокоамплитудным наполнением высокочастотных гармоник спектра [20].

Авторы работы [13] показывают, что выявляемость дефектов методом АЭ связана с размером дефекта и скоростью его роста. Исследования на стали, термообработанной на разную структуру, показывают, что амплитуды сигналов АЭ определяются размерами микротрещин.

В настоящее время АЭ используется для оценки степени опасности дефектов в сталях [14,22], титановых сплавах [15], трубопроводах [18], для мониторинга состояния сосудов давления [17, 20] и для контроля технологических процессов, таких как сварка [16].

Чаще всего исследования ограничиваются выявлением качественных зависимостей параметров АЭ от процессов разрушения. Однако для наиболее корректного применения АЭ необходимы доказанные закономерности, базирующиеся на количественных критериях.

При изучении АЭ, являющейся случайным статистическим процессом, необходимо применять методы непараметрической математической статистики. Процесс научного исследования состоит в построении моделей или предложения гипотез, которые проверяются в нашем случае методами непараметрической статистики. Одним из основных методов является применение критерия Колмогорова [19].

Методы

Основная задача работы состояла в нахождении параметров АЭ, описывающих рост трещины, нахождение линейных уравнений, описывающих подрастание трещин, и проверка гипотезы о существовании этих связей.

Испытание образцов производилось в соответствии с основным нормативным документом механики разрушения, описывающим испытание образцов. Это ГОСТ 25.508-85 и стандарт ASTM E1820-18

Правила по применению метода АЭ при испытаниях материалов и конструкций изложены в ГОСТ Р 52727–2007 и МР 240-87.

Проверка гипотез о существовании линейных связей между параметрами АЭ и подрастом трещины осуществлялась методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова.

Критерий Колмогорова позволяет производить проверку согласия эмпирической функции распределения с теоретической. Проверяется справедливость гипотезы $H_0: F^*(x) = F(x)$ в противоположность гипотезе $H_1: F^*(x) \neq F(x)$. Критерий согласия Колмогорова [19] основан на том факте, что распределение супремума разности между теоретической и эмпирической функциями распределения $D_n = \sup|F^*(x) - F(x)|$ одинаково для любой $F(x)$. Величину D_n называют статистикой Колмогорова.

При малых n для статистики Колмогорова имеются таблицы критических точек $D_{кр}$. При больших n используют предельное распределение Колмогорова:

$$P(\sqrt{n}D_n < x) \rightarrow Q(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} e^{-2k^2n^2}, n \rightarrow \infty$$

Для распределения Колмогорова, предельного для статистики $\lambda = \sqrt{n}D_n$ также существуют таблицы критических точек $\lambda_{кр}$. Практически их используют уже при $n > 20$.

Алгоритм проверки гипотезы:

- Результаты наблюдения представляют в виде интервального статистического (вариационного) ряда;
- Находят значение эмпирической функции распределения $F^*(x)$.
- Пользуясь гипотетической функцией распределения, вычисляют значения $F(x)$ теоретической функции распределения, соответствующие наблюдаемым значениям случайной величины ξ .
- Находят D_n и вычисляют наблюдаемое значение выборочной статистики $\lambda_H = \sqrt{n}D_n$.
- По заданному уровню значимости α из таблиц квантилей распределения Колмогорова находят критические точки λ_α .

Таблица 1. Значения статистики для критерия Колмогорова

Уровень значимости α	0,15	0,10	0,05	0,025	0,01
λ_α	1,138	1,224	1,358	1,480	1,626

- Сравнивая наблюдаемое значение выборочной статистики λ_n с критической точкой λ_α , принимают одно из двух решений: а) если $D_n\sqrt{n} < \lambda_\alpha$, то считается, что для отклонения нулевой гипотезы оснований нет, т. е. гипотетическая функция распределения согласуется с опытными данными; б) если $D_n\sqrt{n} > \lambda_\alpha$, то нулевая гипотеза отклоняется в пользу альтернативной.

Результаты

Проведены испытания на вязкость разрушения образцов из стали марки SA-508 M Gr.4N Cl.2. Цель применения АЭ метода состояла в своевременном обнаружении минимального докритического подроста трещины в 0,2 мм при нагружении стальных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной. Схема расположения преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) представлена на рисунке 1.

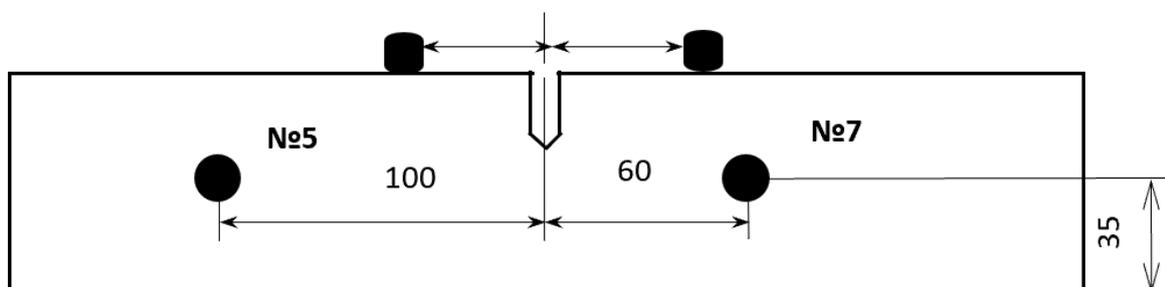


Рис. 1. Схема расположения ПАЭ на образце.

В процессе испытаний регистрировались сигналы АЭ. По разнице прихода сигналов на различные датчики вычислялись координаты источников АЭ. Анализировались сигналы, приходящие только из зоны трещины. На рисунке 2 представлены зависимости нагрузки от раскрытия трещины и активности сигналов АЭ от нагрузки.

Вычислялись различные параметры сигналов: амплитуда, энергия сигнала, число сигналов при различных пороговых уровнях амплитуды, степень опасности сигналов. Испытания останавливались при достижении определенного значения параметров нагружения. Образец в захватах испытательной машины Инстрон показан на рисунке 3.

Образцы разгружались и помещались в муфельную печь для термического окрашивания полученной зоны подроста трещины. После этого образцы доламывались и измерялась величина подроста трещины. Фотография одного из изломов образцов показана на рисунке 4.

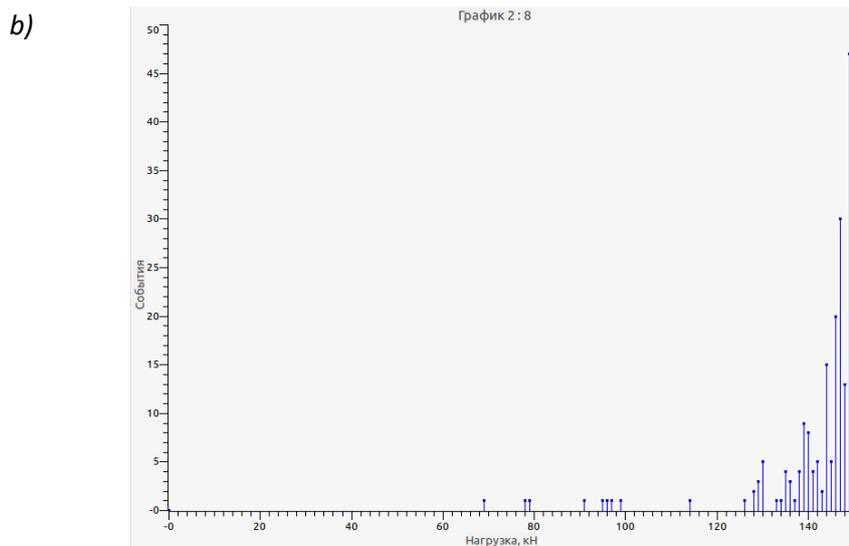
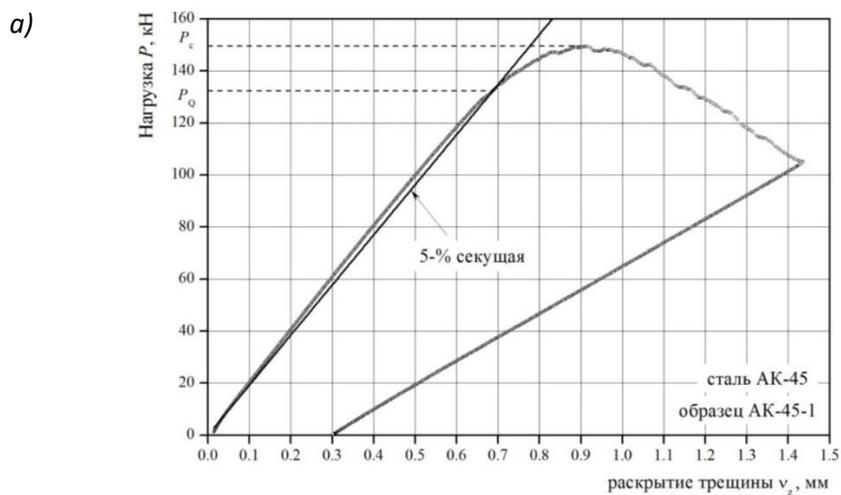


Рис. 2. Зависимости а) нагрузки от раскрытия трещины;
б) активности сигналов АЭ от нагрузки.



Рис. 3. Образец в захватах машины Инстрон.



Рис. 4. Фото излома образца Линейный подрост трещины 0,26 мм.

Рабочая гипотеза состояла в наличии линейной связи между кумулятивными параметрами АЭ и площадью подроста трещины. Строилась зависимость величины подроста трещины от соответствующего параметра АЭ. На рис. 5 представлен пример зависимости подроста трещины от суммы амплитуд сигналов АЭ.

Проверяем гипотезу «Подрост трещины пропорционален сумме амплитуд сигналов АЭ». Данные представлены в таблице 2 и отражены на графике (рис. 5).

Методом наименьших квадратов вычислялись коэффициенты линейного регрессионного уравнения. У нас имеется линейная корреляционная зависимость вида:

$$\Delta l = 0,00004 * \sum A + 0,2258$$

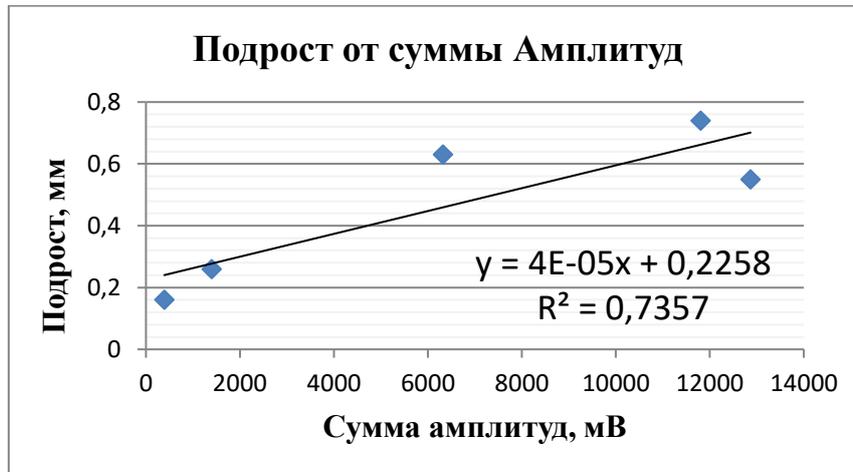


Рис. 5. Зависимость подроста трещины от суммарной амплитуды сигналов АЭ.

Для каждого подроста трещины вычисляем теоретическое число сигналов АЭ. Сравниваем с фактическим значением, находим разницу, нормируем на максимальное теоретическое значение для интервала наблюдений и вычисляем λ . Данные вычислений показаны в таблице 2.

Таблица 2. Данные о подросте трещины и суммарной амплитуде сигналов АЭ

Сумма амплитуд сигналов АЭ	Подрост трещины, мм	Теоретический подрост трещины, мм	Разница	λ
390	0,16	0,24	0,0	
1396	0,26	0,29	0,03	
12866	0,55	0,74	0,19	0,568
6323	0,63	0,48	-0,15	
11806	0,74	0,69	-0,05	

Сравниваем с табличным значением λ_α для уровня значимости 5%. При превышении последнего отклоняем проверяемую гипотезу. В противном случае считаем, что проверяемая гипотеза не противоречит экспериментальным данным на уровне 5%.

Для параметра суммарная амплитуда сигналов АЭ имеем:

$$\lambda < \lambda_\alpha \quad (0,568 < 1.358).$$

Гипотеза не отвергается.

Аналогично проверяем гипотезы о существовании линейной зависимости между еще пятью параметрами сигналов АЭ и подростом трещины. Проверяются следующие параметры АЭ: общее число сигналов АЭ к моменту остановки нагружения – N , число сигналов АЭ с амплитудой более 65 дБ – N_{65} , число сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ – N_{75} , суммарная энергия сигналов АЭ – ΣE и суммарная опасность сигналов АЭ – S . Итоговые данные сведены в таблицу 3.

Параметр λ характеризует нормированное статистическое отклонение по критерию Колмогорова. Были проверены статистическими методами шесть гипотез о связи кумулятивных параметров АЭ с подростом трещины. Для не отклонения гипотезы на 5% уровне значимости он не должен превышать 1,358. Из используемых параметров, которые связаны с подростом трещины, мы отклонили параметр «опасность источника S ». Остальные параметры могут использоваться для оценки подростка трещины. Статистические данные для шести параметров АЭ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Статистические данные о подросте трещины и коэффициентах регрессионных уравнений.

Параметр АЭ	R^2	a	b	Δl	λ
N	0,5483	0,0079	0,228	0,29	0,874
N_{65}	0,6657	0,0207	0,207	0,22	0,651
N_{75}	0,7478	0,0462	0,191	0,16	0,490
ΣA	0,7357	0,00004	0,226	0,19	0,568
ΣE	0,674	0,0259	0,289	0,24	0,725
S	0,571	0,0012	-0,116	0,47	1,389

Для параметра опасности S имеем:

$$\lambda > \lambda_{\alpha} (1,389 > 1.358).$$

Гипотеза отвергается.

Обсуждение

Рассмотрим приведенные данные. Коэффициент R^2 характеризует тесноту корреляционной связи. Наибольшее значение он имеет для числа сигналов, превышающих 75 дБ и суммарной амплитуды сигналов АЭ 0,7478 и 0,7357 соответственно.

Коэффициент a характеризует угол наклона линейной зависимости и зависит от масштаба величин.

Интересен коэффициент b . Он показывает пороговую величину подроста, которую можно определить данной корреляционной зависимостью. Наименьший подрост 0,191 мм выявляется по параметру A_{75} .

Для интерпретации значения величины $-0,116$, относящейся к параметру «опасность источника S », вычислим место пересечения линейной зависимости с осью абсцисс. В точке пересечения S равно 96. Это можно толковать так, что подроста еще нет, а опасность источника равна 96 у.е. такой факт можно отнести на пластическую деформацию без продвижения трещины.

Параметр Δl характеризует отклонение предсказанного значения от реально измеренного. Другими словами, это разброс данной корреляционной зависимости. Наименьший разброс (0,16 мм) мы получаем с помощью параметра A_{75} , а наибольший (0,47) с помощью параметра S .

Рассмотрим параметр число сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ.

$$\Delta l = 0,0462 * N_{75} + 0,191 = 0.36$$

Из решения уравнения находим, что испытания необходимо останавливать при регистрации $3.7 \approx 4$ импульсов АЭ, превышающих 75 дБ.

Таким образом, при АЭ контроле испытаний образцов, при контроле объекта из данного материала или процесса сварки, например, зарегистрировав из локальной области 4 сигнала АЭ с амплитудой, превышающей 75 дБ, мы на уровне значимости 5% можем ожидать, что в данном месте имеется подрост дефекта на величину 0,2 мм. Эти результаты подтверждают результаты других исследователей, но имеют новизну, связанную с количественной оценкой выдвигаемых гипотез.

Заключение

Целью исследования была разработка метода акустико-эмиссионного определения момента достижения подроста трещины величиной 0,2 мм. Задачами исследования были нахождение параметров АЭ способных контролировать заданный подрост трещины и проверка справедливости гипотезы о существовании связи между параметром АЭ и величиной линейного подроста трещины. Данное исследование позволило найти параметры АЭ, связанные с величиной подроста трещины. Такими параметрами оказались: общее число сигналов АЭ к моменту остановки нагружения – N , число сигналов АЭ с амплитудой более 65 дБ - N_{65} , число

сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ - N_{75} , суммарная амплитуда сигналов АЭ – ΣA , суммарная энергия сигналов АЭ – ΣE и суммарная опасность сигналов АЭ – S . Применение методов непараметрической статистики и критерия Колмогорова позволило проверить и принять гипотезы о существовании линейной связи между параметрами АЭ и линейным подрастом трещины для всех вышеперечисленных параметров за исключением суммарной опасности S . Результаты данного исследования могут найти применение при диагностике конструкций и контроле технологических процессов, например, процессов сварки изделий ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ГОСТ 25.506-85 Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении
- [2] ISO 12135 - 2002(E) Metallic materials – Unified method of test for the determination of fracture toughness
- [3] BS EN ISO 15653 – 2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds
- [4] ASTM E1820-18, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness
- [5] МР 240-87 Применение метода АЭ при определении характеристик вязкости разрушения
- [6] Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
- [7] ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
- [8] АС 873108 от 18.06.79 Способ определения момента страгивания трещины, В.С. Иванова и др.
- [9] Черепанов Г.П. Механика разрушения//Москва-Ижевск, ИКИ. 2012. 872 с.
- [10] Лазарев А.М., Рубинштейн В.Д. Исследование акустической эмиссии при испытаниях образцов на вязкость разрушения. – Дефектоскопия, 1980, № 12, с. 42 – 47.
- [11] Кузнецов Б.А., Леонов В.В., Смирнов В.И. Определение момента страгивания трещины методом акустической эмиссии при испытаниях на вязкость разрушения конструкционных материалов и сварных соединений. – Вопросы судостроения. Серия: Сварка, 1976, вып. 22, с. 3 – 10.

- [12] Коровкин Е.Д., Скобло А.В., Дунина Л.П. Определение старта трещины акустическим методом. – Заводская лаборатория, 1980, № 9, с. 865 – 867.
- [13] Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Изд. Дом «Спектр», 2017. – 368 с.: ил.
- [14] Determination of the Degree of Danger of Crack-like Defects in 17G1C Steel by the Acoustic Emission Method / Nefedyev E. at al., In M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov (Ed), Modern Engineering. Science and education, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University – 2017, Pp.387-401.
- [15] Belogur V., Semashko N., Kulesh A. Methodological Approaches to the Diagnosis of Products from Titanium Alloys by Acoustic Emission (AE), In M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov (Ed), Modern Engineering. Science and education, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University - 2016, Pp.350-358.
- [16] Gomera V., Nefedyev E., Smirnov A. On the Possibility of Production Defect-Free Welds Under Acoustic Emission Monitoring, In: A. Evgrafov, O.Egorova (ed.), International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol.11, N 5, May 2017, Special Issue on "Advances in Modern Mechanical Engineering Research", ISSN 1970-8734, , p.343-349.
- [17] Papasalouros D, Bollas K., Ladis I, Aerakis E., Anastasopoulos A., Kourousis D. Novel AE monitoring of hydrogen induced damaged vessel and real time alarms. A case study // Proc. of 33rd European Conf. on AE testing, Senlis, France, 12-14 September 2018, pp.167-174.
- [18] Nefedyev E., Gomera V., Smirnov A. Determination of a Pre-destructive State During Hydraulic Testing of Steel Pipes with Defects by the Acoustic-Emission Method, In: A. Evgrafov (ed.), Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, DOI 10/1007/978-3-319-72929-9, Springer International Publishing AG – 2018, Pp. 115-127.
- [19] Колмогоров А. Н. Теория вероятности и математическая статистика, М.: Наука, 1986. – 535 с.
- [20] Цзян Пэн, Ли Кайруи, Чжан Люинь, Ли Вэй, Янь Сяовэй, Определение параметров разрушения сосудов для хранения водорода под высоким давлением с помощью энтропии акустической эмиссии, – Дефектоскопия, 2022, №6. – С. 26-36
- [21] Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Иванов В. И., Елизаров С. В., Проблемы локации источников акустической эмиссии, – Дефектоскопия, 2021, №9. – С. 35-44
- [22] Прокопьев Л. А., Андреев Я. М., Лукин Е. С., Оценка степени опасности трещиноподобных дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля при локальном низкотемпературном нагружении, – Дефектоскопия, 2022, №12. – С. 17-23

- [23] Растегаев И. А., Ясников И. С., Растегаева И. И., Аглетдинов Э. А., Мерсон Д. Л., Оценка вероятности обнаружения акустико-эмиссионных сигналов методом амплитудной дискриминации при малом соотношении сигнал/шум, – Дефектоскопия, 2022, №3. – С. 3-12
- [24] Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. // М.: Издательство физико-математической литературы. 2004. 136 с.

Е. Е. Damaskinskaya¹, Е. Yu. Nefedyev², L. O. Stoyanovskiy³, D. I. Frolov¹

DETERMINATION OF CRACK INITIATION MOMENT IN STEELS USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

¹Ioffe Institute, Russia;

²Krylov State Research Center, Russia;

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This study is devoted to the development of a method for determining the crack initiation moment in steels using the acoustic emission (AE) technique. For this purpose, an investigation was conducted on AE signals emitted by structural steel during the loading of specimens with pre-grown cracks. The study focused on welded joints of structural steel SA-508 M Gr.4N Cl.2. Methods of fracture mechanics and acoustic emission were employed. The existence of a relationship between AE parameters and crack growth was verified using nonparametric statistics, specifically the Kolmogorov criterion. At a 5% significance level, hypotheses regarding the existence of a linear relationship between crack growth and six cumulative AE parameters were tested. The validity of such a hypothesis was confirmed for five out of the six AE parameters, while it was rejected for one parameter.

Key words: crack initiation, acoustic emission, fracture mechanics, nonparametric statistics.

REFERENCES

- [1] GOST 25.506-85. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading.

- [2] ISO 12135:2002(E). Metallic materials – Unified method of test for the determination of fracture toughness.
- [3] BS EN ISO 15653:2010. Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds.
- [4] ASTM E1820-18. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- [5] MR 240-87. Application of the acoustic emission method in determining fracture toughness characteristics.
- [6] Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. Acoustic Emission: Application in Testing Materials and Products. Moscow: Standards Publishing House, 1976. 272 p.
- [7] GOST R 52727-2007. Technical diagnostics. Acoustic emission diagnostics. General requirements.
- [8] AS 873108 от 18.06.1979. Method for determining crack initiation moment. V.S. Ivanov, Kuznetsov, Reznikov.
- [9] Cherepanov G.P. Fracture Mechanics. Moscow-Izhevsk: IKI, 2012. 872 p.
- [10] Lazarev A.M., Rubinshtein V.D. Investigation of acoustic emission during fracture toughness testing of specimens. Defektoskopiya, 1980, No. 12, pp. 42–47.
- [11] Kuznetsov B.A., Leonov V.V., Smirnov V.I. Determination of crack initiation moment by acoustic emission in fracture toughness testing of structural materials and welded joints. Shipbuilding Issues. Series: Welding, 1976, Issue 22, pp. 3–10.
- [12] Korovkin E.D., Skoblo A.V., Dunina L.P. Determination of crack initiation by the acoustic method. Zavodskaya Laboratoriya, 1980, No. 9, pp. 865–867.
- [13] Ivanov V.I., Barat V.A. Acoustic Emission Diagnostics: A Reference Guide. Moscow: Spectrum Publishing House, 2017. 368 p.
- [14] Nefedyev E. et al. Determination of the Degree of Danger of Crack-like Defects in 17G1S Steel by the Acoustic Emission Method. In: M.M. Radkevich, A.N. Evgrafov (Eds.), Modern Engineering. Science and Education. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2017, pp. 387–401.
- [15] Belogur V., Semashko N., Kulesh A. Methodological Approaches to the Diagnosis of Products from Titanium Alloys by Acoustic Emission (AE). In: M.M. Radkevich, A.N. Evgrafov (Eds.), Modern Engineering. Science and Education. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2016, pp. 350–358.
- [16] Gomera V., Nefedyev E., Smirnov A. On the Possibility of Production Defect-Free Welds Under Acoustic Emission Monitoring. International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2017, Vol. 11, No. 5, pp. 343–349.

- [17] Papasalouros D. et al. Novel AE Monitoring of Hydrogen-Induced Damage in Vessels and Real-Time Alarms: A Case Study. Proc. of 33rd European Conference on AE Testing, Senlis, France, 2018, pp. 167–174.
- [18] Nefediev E., Gomera V., Smirnov A. Determination of a Pre-Destructive State During Hydraulic Testing of Steel Pipes with Defects by the Acoustic-Emission Method. In: A. Evgrafov (Ed.), *Advances in Mechanical Engineering*. Springer, 2018, pp. 115–127.
- [19] Kolmogorov A.N. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow: Nauka, 1986. 535 p.
- [20] Jiang Peng et al. Determination of Fracture Parameters of High-Pressure Hydrogen Storage Vessels Using Acoustic Emission Entropy. *Defektoskopiya*, 2022, No. 6, pp. 26–36.
- [21] Matvienko Yu.G. et al. Problems in Locating Acoustic Emission Sources. *Defektoskopiya*, 2021, No. 9, pp. 35–44.
- [22] Prokopiev L.A. et al. Assessment of the Hazard Level of Crack-Like Defects Based on Acoustic Emission Monitoring Under Local Low-Temperature Loading. *Defektoskopiya*, 2022, No. 12, pp. 17–23.
- [23] Rastegaev I.A. et al. Evaluation of the Probability of Detecting Acoustic Emission Signals by Amplitude Discrimination at Low Signal-to-Noise Ratio. *Defektoskopiya*, 2022, No. 3, pp. 3–12.
- [24] Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. *Dynamic Problems of Elasticity Theory in Applications to Acoustic Testing and Diagnostics*. Moscow: Fizmatlit, 2004. 136 p.