

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

УДК 621.793:620.199:001.18

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-92-101

Методика неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений

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

Приведены примеры реализации методики неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности на основе долгосрочного прогнозирования разрушения сварных соединений, развиваемой на базе микромеханической модели процесса разрушения и временных зависимостей сопровождающей его акустической эмиссии (АЭ). Описаны полученные различными исследователями результаты АЭ испытаний различного вида образцов с отличающейся картиной напряженно-деформированного состояния, сваренных стыковыми и угловыми швами и имеющих различные созданные в ходе сварки или после неё дефекты. В качестве информативных рассматривались как традиционно используемые диагностические параметры АЭ (число импульсов, амплитуда, средняя энергия импульсов АЭ, зарегистрированных на этапе упругого нагружения, значения локально-динамического показателя), так и последовательно рассчитанные диагностические параметры, вытекающие из предлагаемой авторами микромеханической модели. В качестве показателя информативности принята величина коэффициента корреляции значений диагностических параметров АЭ или рассчитываемых через них прочностных характеристик со значениями экспериментально определяемых времен до разрушения или образования трещины, разрушающей нагрузки, величиной напряжений, размеров дефектов. Сопоставление различных вариантов АЭ диагностирования показало предпочтительность предложенных авторами диагностических параметров, инвариантных к типу образцов, виду регистрирующей аппаратуры, роду дефектов, видам нагружений и создаваемого напряжённого состояния, что создаёт предпосылки для повышения эффективности технологий производственного АЭ контроля.

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

Для цитирования: Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиян И.В. Методика неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 92—101. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-92-101.

A Nondestructive Acoustic-Emission Technique for Examining the Strength of Welded Joints

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

The article presents examples of implementing the nondestructive acoustic emission (AE) strength examination technique based on long-term prediction of welded joint fracture. The technique is developed on the basis of a micromechanical fracture process model and time dependencies of the AE accompanying the fracture process. The article describes the AE test results obtained by different researchers for various samples having different stressed-and-strain patterns, with butt and fillet weld joints and having different flaws appeared during the welding process and afterwards. Conventionally used diagnostic parameters (number of impulses, amplitude, average energy of the AE impulses recorded in the elastic loading stage, and the values of the local dynamic parameter), as well as sequentially calculated diagnostic parameters following from the proposed micromechanical model were used as information-containing indicators. The correlation coefficient between the values of AE diagnostic parameters or the strength characteristics calculated from them and the experimentally determined values of time to failure or to cracking, rupture load, stress level, and flaw sizes was adopted as the information content

indicator. Comparison of different AE-based diagnosing versions has shown the advisability of using the proposed diagnostic parameters, which are invariant to the type of samples, type of recording devices, type of defects, types of loading, and the generated stressed state. The obtained results create prerequisites for achieving better efficiency of AE-based production-grade material examination technology.

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

For citation: Nosov V.V., Yamilova A.R., Zelensky N.A., Matviyan I.V. A Nondestructive Acoustic-Emission Technique for Examining the Strength of Welded Joints. MPEI Vestnik. 2017; 3:92—101. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-92-101.

Цель настоящей работы состояла в иллюстрации предпочтительности развиваемого авторами статьи информационно-кинетического подхода к АЭ оценке прочности сварных соединений, основанного на микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ [1—6]. В качестве критерия предпочтительности выбран характеризующий информативность контроля коэффициент корреляции предлагаемых диагностических параметров АЭ с показателями прочности или ресурса сварных соединений, а для наглядности применимости рассматриваемого авторами подхода подробно рассмотрены результаты обработки первичной АЭ информации, полученной при испытании различных образцов сварных соединений. Экспериментальные исследования проводились на плоских и кольцевых образцах сварных соединений, выполненных внахлест и встык, описание и анализ которых проведен в работах [4—7].

Испытания плоских образцов стыковых сварных соединений растягивающей нагрузкой

В [7] описаны результаты АЭ испытаний плоских образцов (рис. 1), выполненных из стали 03Х11Н8М2Ф-ВД со стыковыми сварными швами и различными созданными в ходе сварки дефектами.

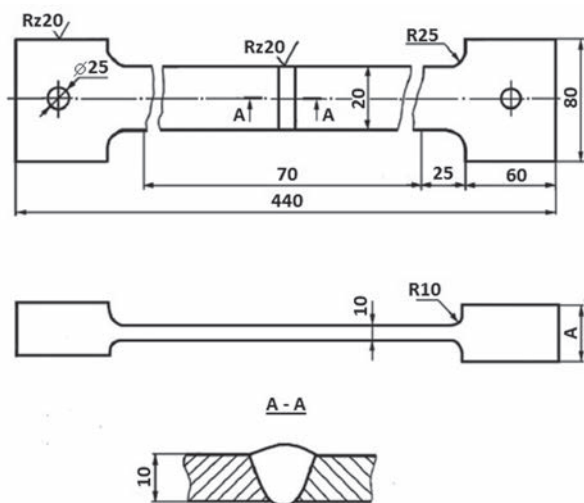


Рис. 1. Плоские образцы со стыковыми сварными швами

Образцы нагружались на растяжение с постоянной скоростью F'_p роста нагрузки, а результаты представлены в виде временных диаграмм нагрузок, суммарного счета (числа импульсов), суммарной амплитуды

сигналов АЭ и их связи с величиной разрушающих нагрузок.

В табл. 1 приведены данные испытаний для образца № 12 [7], имеющего два подреза глубиной 2 мм и трещину по кромке сварного шва длиной 3 мм. В качестве первичного параметра ξ выбрано суммарное число импульсов акустической эмиссии N_Σ и суммарная амплитуда A_Σ сигналов АЭ.

Определение параметров X_{AE} и Y_{AE} микромеханической модели и оценка их информативности

При $\xi(t) = N_\Sigma(t)$, согласно [4—6], участки временных зависимостей числа $N_\Sigma(t)$, регистрируемых при нагружении импульсов акустической эмиссии (АЭ) на этапе однородного разрушения при нагружении с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ роста напряжений, описываются выражением

$$N_\Sigma(t) = k_{AE} C_0 K T \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} \right] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}). \quad (1)$$

Таким образом, на графиках временной зависимости (1), представленной в полулогарифмических координатах, этап однородного разрушения описывается прямолинейным участком.

Тогда логарифм числа импульсов

$$\ln(N_\Sigma(t)) = \ln(k_{AE} C_0) + \frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} - \ln(\tau_0 \gamma \dot{\sigma} / KT). \quad (2)$$

На рис. 2, а представлена зависимость логарифма числа импульсов, зарегистрированных при нагружении образца № 12, с выделением этапа однородного разрушения — период времени $t = 1900 \dots 4750$ с.

Из (2) вытекает определение диагностических параметров X_{AE} и Y_{AE} как производных от $\ln(N_\Sigma(t))$ по времени и напряжениям соответственно:

$$X_{AE} = \frac{d}{dt} \ln(N_\Sigma(t)) = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{KT}; \quad (3)$$

$$Y_{AE} = \frac{\gamma}{KT} \quad (4)$$

или

$$Y_{AE} = \frac{X_{AE}}{\dot{\sigma}} = X_{AE} \frac{dt}{d\left(\frac{Fg}{A}\right)} = X_{AE} \frac{A}{g} \frac{dt}{dF}, \quad (5)$$

где A — площадь сечения активной части образца, равная 200 мм^2 [7]; g — ускорение свободного падения; F — нагрузка.

Диагностический параметр X_{AE} является показателем прочности, поскольку его значение связано со сте-

Первичные данные экспериментов для образца № 12

Время испытаний t , с	Число импульсов N_{Σ}	Суммарная амплитуда A_{Σ} , мВ	Разрушающая нагрузка F , кг
475	35	2400	1000
950	45	2400	2000
1425	90	4800	3000
1900	170	7200	4000
2375	215	12000	5000
2850	295	18000	6000
3325	370	24000	7000
3800	450	32400	8000
4275	560	42000	9000
4750	790	73200	10000
5225	1160	133200	11000
5463	1460	170400	11500
5700	2700	280800	12000

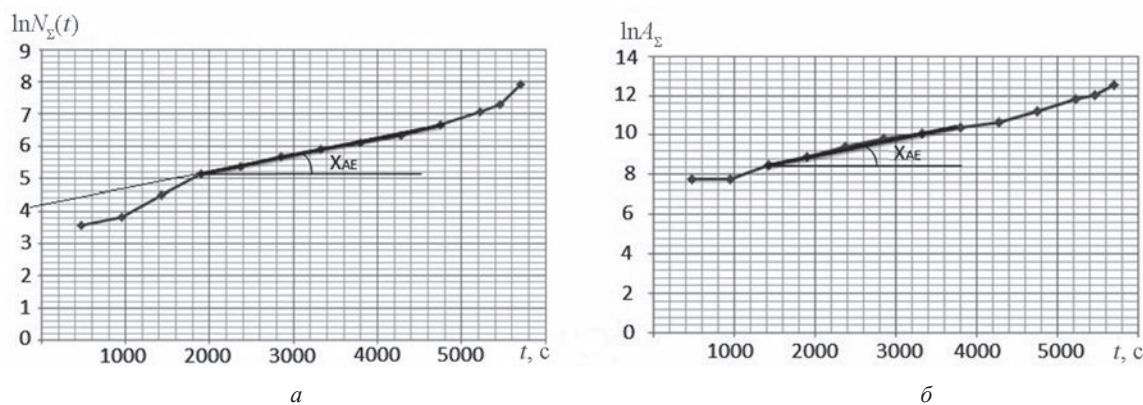


Рис. 2. Временные зависимости параметров АЭ при равномерном нагружении образца № 12:
 а — логарифм числа импульсов и определение ординаты $\ln N_{\Sigma 0}$; б — логарифм суммарной амплитуды A_{Σ}

пенью опасности дефектов, временем до разрушения, пределом прочности σ^* , разрушающей нагрузкой F_p , ресурсом и определяется на этапе кинетически однородного разрушения при равномерном нагружении с постоянной скоростью роста напряжений $\dot{\sigma}$ и нагрузки F' на образец в момент диагностического АЭ испытания.

Временная зависимость логарифма суммарной амплитуды A_{Σ} представлена на рис. 2, б, выделен этап однородного разрушения $t = 1425 \dots 3800$ с. При $\xi(t) = A_{\Sigma}(t)$ выражение (3) для диагностического параметра X_{AE} принимает вид

$$X_{AE} = \frac{d}{dt} \ln(A_{\Sigma}). \quad (6)$$

Для всех образцов в вышеизложенной последовательности были рассчитаны значения диагностических параметров X_{AE} и Y_{AE} , результаты расчета последнего представлены в табл. 2. Как и ожидалось, суммарный счет акустической эмиссии и суммарная амплитуда сигналов АЭ слабо коррелировали с разрушающей

нагрузкой F_p (коэффициент корреляции 0,157 и 0,202 соответственно), корреляция же значений F_p и показателя Y_{AE} существенно лучше (коэффициент корреляции равен $-0,742$), что говорит о большом информативном преимуществе Y_{AE} относительно разрушающей нагрузки перед первичными параметрами N_{Σ} и A_{Σ} .

Определение и оценка параметра $k_{AE} C_0$

Параметр $k_{AE} C_0$ характеризует «звучащий» объем и количество источников потенциально регистрируемой акустической эмиссии. Из (2) получаем формулу для ординаты $\ln N_{\Sigma 0}$, отсекаемой экстраполяцией на ось N_{Σ} линейного участка зависимости $\ln N_{\Sigma}(t)$:

$$\ln N_{\Sigma 0} = \ln(k_{AE} C_0) - \frac{U_0}{KT} - \ln(\tau_0 X_{AE}). \quad (7)$$

Тогда

$$k_{AE} C_0 = \exp \left[\ln N_{\Sigma 0} + \frac{U_0}{KT} + \ln(\tau_0 X_{AE}) \right]. \quad (8)$$

Как видно из рис. 2, а, ордината $\ln N_{\Sigma 0}$ для образца № 12 равна 4,2.

Таблица 2

Результаты расчета диагностических параметров

Номер образца	Вид технологического дефекта	Максимальная нагрузка, кг	N_{Σ}	$N_{\Sigma} \cdot 10^{-3}$, мВ	Y_{AE} по N	Y_{AE} по A_{Σ}
5	Бездефектный сварной шов	13850	222	79,8	0,0064	0,011
6	Непровар длиной 15 мм	13850	645	44,5	0,004	0,0019
7	Три непровара и поры 0,5 мм	6850	7000	965	0,025	0,017
8	Непровар и поры 0,5...1 Мм	8440	13350	2389,6	0,010	0,014
9	Четыре поры $d = 3...5$ Мм	5538	1100	204	0,012	0,014
10	Восемь пор $d = 0,8$ мм и микротрещина	5350	1500	115	0,017	0,015
11	Два подреза и поры $d = 0,01...0,2$ Мм	11545	13657	2485	0,01	0,0067
12	Два подреза глубиной 2 мм и трещина по кромке шва, $L = 3$ мм	12000	2700	281	0,0058	0,0077
13	Трещина вдоль шва $L = 17$ мм	3920	3590	488	0,015	0,020
14	Трещины: поперечная $L = 4$ мм, продольная $L = 12$ мм	410	2230	219	0,116	0,135
15	Трещина: поперечная $L = 10$ мм, продольная $L = 17$ мм и 5 пор	1195	1262	101	0,061	0,067
Коэффициент корреляции с максимальной нагрузкой			0,157	0,202	-0,742	-0,729

Период атомных колебаний τ_0 и энергия активации процесса разрушения U_0 , входящие в (8), являются относительно стабильными величинами. Значения энергии активации определяются по формуле

$$U_0 = KT(\sigma^* Y_{AE} + 35 - \ln(\dot{\sigma} Y_{AE})) \quad (9)$$

или

$$U_0 = KT(\sigma^* Y_{AE} E + 35 - \ln X_{AE}), \quad (10)$$

где σ^* — предел прочности.

Экспериментальные значения предела прочности для рассматриваемых образцов определены из максимальных нагрузок F_g , как

$$\sigma^* = \frac{F_g}{A}. \quad (11)$$

Среднее значение энергии активации $U_{0cp} = 113,6$ Дж/моль, доверительный интервал значений энергии активации (109,7;117,6) с вероятностью 0,99. Разброс значений U_0 до 12 % от среднего обусловлен влиянием внутренних напряжений в образцах.

В табл. 3 приведены значения параметра $k_{AE} C_0$, рассчитанные при среднем значении энергии активации процесса разрушения.

Для образцов № 5, 6, 12, 13, 14, 15 указаны также эквивалентные размеры дефектов (суммарная длина), позволяющие установить корреляционную связь параметра $k_{AE} C_0$ с размерами дефектов. Коэффициент корреляции составил 0,689, что подтвердило информативность параметра $k_{AE} C_0$ по отношению к геометрическим характеристикам дефектов. В табл. 4 для образцов, имеющих дефекты в виде непроваров и пор, проведено ранжирование по числу $k_{AE} C_0$.

Таблица 3

Расчетные параметры для плоских образцов

Номер образца	Вид технологического дефекта	$k_{AE} C_0$	Суммарная длина дефекта
5	Бездефектный сварной шов	4038	0
6	Непровар длиной 15 мм	23246	15
7	Три непровара и поры 0,5 мм	134853	—
8	Непровар и поры 0,5...1 Мм	1110341	—
9	Четыре поры $d = 3...5$ Мм	173770	—
10	Восемь пор $d = 0,8$ мм и микротрещина	161165	—
11	Два подреза и поры $d = 0,01...0,2$ Мм	449017	—
12	Два подреза глубиной 2 мм и трещина по кромке шва, $L = 3$ мм	245083	3
13	Трещина вдоль шва $L = 17$ мм	2109823	17
14	Трещины: поперечная $L = 4$ мм, продольная $L = 12$ мм	4108261	16
15	Трещина: поперечная $L = 10$ мм, продольная $L = 17$ мм и 5 пор	2973006	27

Таблица 4

Ранжирование дефектов по параметру $k_{AE}C_0$

Номер образца	Вид технологического дефекта	$k_{AE}C_0$
5	Бездефектный сварной шов	4038
6	Непровар длиной 15 мм	23246
7	Три непровара и поры 0,5 мм	134853
10	Восемь пор $d = 0,8$ мм и микротрещин	161165
9	Четыре поры $d = 3...5$ мм	173770
11	Два подреза и поры $d = 0,01...0,2$ мм	449017
8	Непровар и поры 0,5...1 мм	1110341

Очевидно, что бездефектный образец имеет наименьшее количество источников АЭ. Увеличение $k_{AE}C_0$ у образцов № 6 и 7 по сравнению с № 5 обусловлено наличием одного и трех непроваров соответственно. Увеличение диаметров пор (следовательно, суммарного объема дефектов) также ведет к увеличению $k_{AE}C_0$ (у образцов № 7, 10, 9). Резкое возрастание числа $k_{AE}C_0$ наблюдается у образца № 11, т.е. дефекты в виде подрезов оказались более активными источниками АЭ.

Расчет прогнозируемых разрушающих нагрузок

В табл. 5 сведены значения прогнозируемых разрушающих нагрузок, рассчитанные по (12), вытекающих из (3), (4), (5), (11), с указанием погрешности по отношению к экспериментальной разрушающей нагрузке бездефектного образца

$$F_p \approx (M + \ln(F'_p k Y_{AE})) / (k Y_{AE}), \quad (12)$$

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

Коэффициент корреляции прогнозируемых и действительных разрушающих нагрузок составляет 0,917, средняя ошибка расчетов $\Delta = 11$ %.

Уменьшение погрешностей оценки возможно посредством устранения мультипликативных помех (учета нестабильности k_{AE}) на основе использования амплитудного распределения сигналов АЭ [4]. Для примера рассмотрим корректировку параметра $k Y_{AE}$. Величина АЭ показателя прочности при переменном коэффициенте

$$k Y = \frac{\ln\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right) + \ln\left(\frac{k_{AE1}}{k_{AE2}}\right)}{F_2 - F_1}, \quad (13)$$

Таблица 5

Параметры АЭ для плоских образцов

Номер образца	F_p , Н	Скорость роста нагрузки F'_p , Н/с	Без учета амплитудного распределения			С учетом амплитудного распределения		
			Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ^* , %	Y_{AE} , МПа ⁻¹	F_p , Н	Δ^* , %
5	135869	21,74	0,0064	102840	24	0,0038	145767	7
6	135869	21,57	0,004	140645	4	-0,0004**	—	—
7	67199	48,00	0,025	43564	35	0,0224	47640	29
8	82796	19,25	0,010	72316	13	0,01	72316	13
9	54328	18,26	0,012	62419	15	0,0122	61667	14
10	52484	18,51	0,017	48319	8	0,0166	49197	6
11	113256	17,91	0,01	70864	37	0,0098	71898	37
12	117720	20,65	0,0058	108316	8	0,004	138480	18
13	38455	27,47	0,015	58354	52	0,0156	56612	47
14	4022	6,36	0,116	8551	113	0,1152	8593	69
15	11723	39,08	0,061	20104	71	0,0618	19886	70
Средние значения			11	—	—	10 (для 10 образцов)	—	—
Корреляция с F_p			0,917	—	0,910	—	—	—

*Относительная ошибка определена как отношение разницы между расчетной и действительной разрушающими нагрузками к действительной разрушающей нагрузке бездефектного образца.

**Знак «—» обусловлен влиянием неоднородности состояний структурных элементов образцов, проявляющейся на рассмотренных этапах нагружения.

где ξ_1, ξ_2 — значения первичных информативных параметров (здесь N_Σ — числа импульсов АЭ) при нагрузках F_1 и F_2 соответственно. Рассмотрен тот же участок однородного разрушения (интервал времени 1900...4750 с) для образца № 12 с допущением того, что амплитудное распределение описывается экспоненциальным законом.

Тогда связываемое с изменением средней амплитуды u_{cp} сигнала АЭ во время перехода с одного уровня нагрузки на другой относительное изменение величины коэффициента k_{AE}

$$\frac{k_{AE1}}{k_{AE2}} = \exp(U_2^H - U_1^H) = \exp\left(\frac{U^H}{u_{cp2}} - \frac{U^H}{u_{cp1}}\right); \quad (14)$$

$$kY = \frac{\ln\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right) + \ln\left(\frac{k_{AE1}}{k_{AE2}}\right)}{F_2 - F_1} = \frac{\ln N_{\Sigma 2} - \ln N_{\Sigma 1} + \frac{U^H}{u_{cp2}} - \frac{U^H}{u_{cp1}}}{F_2 - F_1}, \quad (15)$$

где U^H — нижний порог дискриминации амплитуды, для всех образцов принимаем равным 0,4 В как минимальное зарегистрированное значение амплитуды; $N_{\Sigma 1}, N_{\Sigma 2}, u_{cp1}, u_{cp2}, F_1, F_2$ — значения суммарного числа импульсов, средней амплитуды и нагрузки в моменты времени t_1 и t_2 соответственно.

Рассчитанные без учета и с учетом изменения амплитудного распределения значения параметра Y_{AE} и разрушающих нагрузок по (12) приведены в сравнительной табл. 5. Коэффициент корреляции прогнозируемых F_p , определенных с учетом амплитудного распределения, и действительных F_s разрушающих нагрузок составляет 0,913, средняя ошибка расчетов уменьшилась до 10 %.

Примечательно, что значения Y_{AE} согласуются с величиной Y_R углового коэффициента кривой усталости идентичных образцов, имеющих тот же физический смысл: $Y_R = -d \ln N_c / d \sigma_{max} = \gamma / KT$ (рис. 3).

Испытания кольцевых образцов на одноосное сжатие

Дадим подобный анализ экспериментальным данным испытаний, полученным на образцах с отлича-

ющейся картиной напряженно-деформированного состояния в виде сжимаемых замкнутых колец, состоящих из сваренных между собой стыковыми швами сегментов [6] (рис. 4). Рассмотрены пять кольцевых образцов, каждый образец был изготовлен из четырех сегментов, сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов — сталь марки Ст3. В сварных швах четырёх образцов искусственно создавались дефекты — отверстия диаметром 4 мм различной глубины. Один образец создавался без дефектов. В качестве диагностического использовалось одноосное нагружение, для реализации которого цилиндрический корпус укладывался на две параллельные опоры, и сверху к нему прикладывалась нагрузка, распределенная по двум линиям контакта.

Результаты регистрации и обработки сигналов АЭ представлены в табл. 6. В испытаниях кольцевые образцы не доводились до разрушения, средняя энергия активации процесса их разрушения также принята равной 113,64 кДж/моль, как у плоских образцов. Суммарный объем сварных швов бездефектного образца составил 6623,52 мм³. В табл. 6 представлены объемы сварных швов для каждого образца с учетом дефектов.

Из табл. 6 видно, что наибольшее значение параметра $k_{AE}C_0$ (наибольшее число источников АЭ) имеет бездефектный образец. Прочностное состояние бездефектного образца существенно неоднородно и проявляется длительным этапом кинетически неоднородного разрушения во время нагружения кольца с возрастающей нагрузкой. Этап однородного разрушения у образца № 2 наблюдался с 310-й секунды испытаний. Появление дефекта снижало степень неоднородности состояния, что приводило к доминированию этапа кинетически однородного разрушения кольца (например, у образца № 4 однородное разрушение началось на 207-й секунде испытаний).

В отличие от ранее описанных плоских образцов, имеющих технологические дефекты, в рассматриваемых кольцевых образцах дефекты создавались искус-

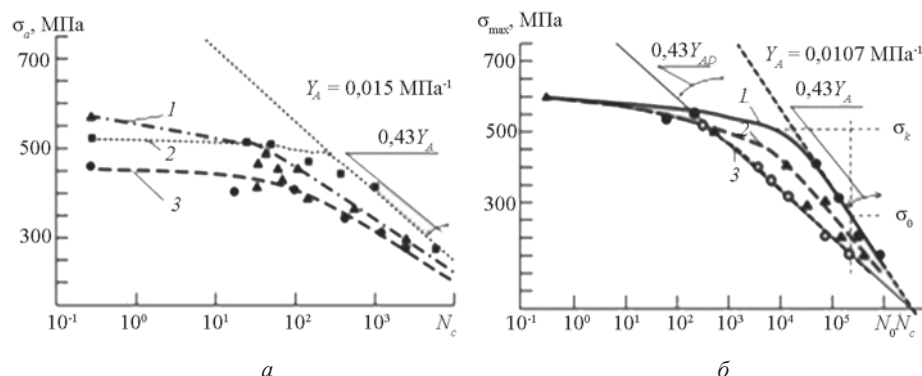


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости сварных соединений:

a — результаты малоциклового испытаний различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСт3сп: 1 — металл углового шва; 2 — металл зон термического влияния стыкового соединения; 3 — основной металл; *б* — результаты малоциклового испытаний стыковых соединений стали 10ХСНД толщиной 20 мм: 1 — качественное соединение; 2 — угловатость 8 мм на длине 1 м; 3 — непровар 4 мм

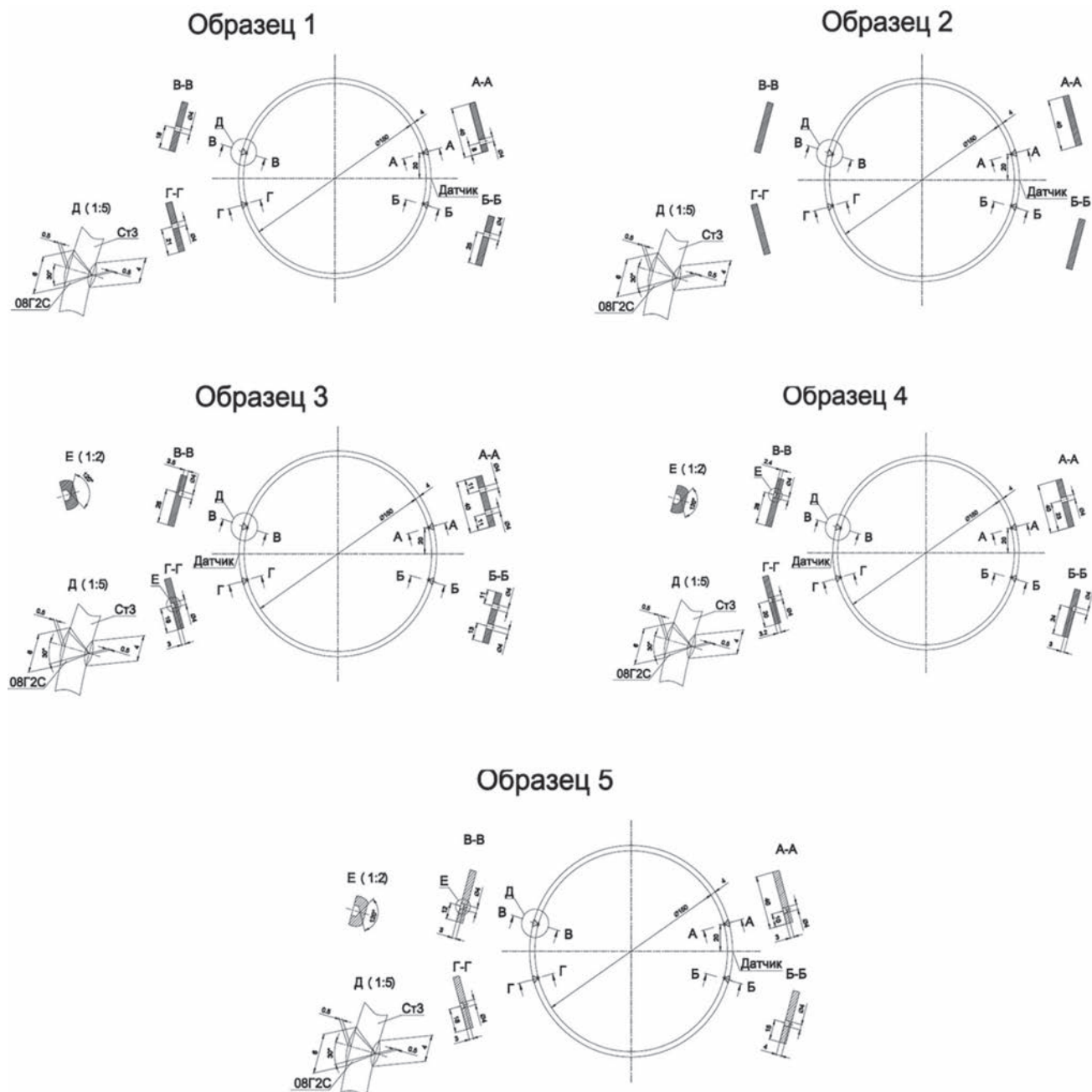


Рис. 4. Образцы сваренных встык колец для АЭ испытания при одноосном сжатии

Таблица 6

Результаты обработки данных испытаний кольцевых образцов

Номер	Дефекты образца	σ_{max} (в сварных швах)	X_{AE}, c^{-1}	W_{AE}	$k_{AE} C_0$	Суммарный объем дефектов	Объем сварного шва
1	Два сквозных отверстия	259	0,0282	3,39	929	200,960	6422,560
2	Без дефектов	188	0,0063	0,69	94271	0,000	6623,520
3	Два несквозных отверстия: внутри 3,5 мм, снаружи 3 мм	266	0,0272	3,04	4244	282,600	6340,920
4	Два несквозных отверстия снаружи: 2,4 мм и 3,2 мм; свищ 1 мм	247	0,0322	2,84	1246	158,256	6465,264
5	Два несквозных отверстия внутри: 4 мм и 3 мм	268	0,0364	4,39	3887	163,280	6460,240

ственно — путем удаления части «звучащего» объема сварного шва, являющегося концентратором напряжений и потенциальной зоной зарождения и развития дефектов. Этим объясняется уменьшение параметра $k_{AE}C_0$ при увеличении объема дефектов (корреляция параметра $k_{AE}C_0$ с объемом сварного шва составила 0,866). Корреляция значений диагностических параметров X_{AE} и Y_{AE} с максимальными напряжениями вблизи дефектов оказалась высокой: 0,925 и 0,941 соответственно, что подтверждает их высокую информативность.

Кроме того, стоит отметить, что малоцикловые испытания объектов из стали 09Г2, близкой по свойствам материалу описанных кольцевых образцов, показали близость значений параметра Y_{AE} и параметра Y_R (определяемого по кривой усталости), что свидетельствует о применимости данных диагностических параметров для оценки состояния объектов как при статическом, так и циклическом нагружении.

Испытания образцов нахлесточных соединений на сдвиг посредством растяжения

Кроме описанных выше образцов, АЭ испытания проводились также на образцах нахлесточных сварных соединений трех типов, испытанных на сдвиг посредством растяжения с постоянной скоростью роста нагрузки (рис. 5). Результаты регистрации и обработки сигналов АЭ представлены в табл. 7 и на рис. 6.

Данный подход показал свою эффективность при диагностике состояния сложно нагруженных технических объектов, при оценке геомеханического состояния массива горных пород, образцах и изделиях из композиционных материалов [10—12].

Выводы

Объектами контроля акустико-эмиссионного метода диагностирования на основе предложенных в настоя-

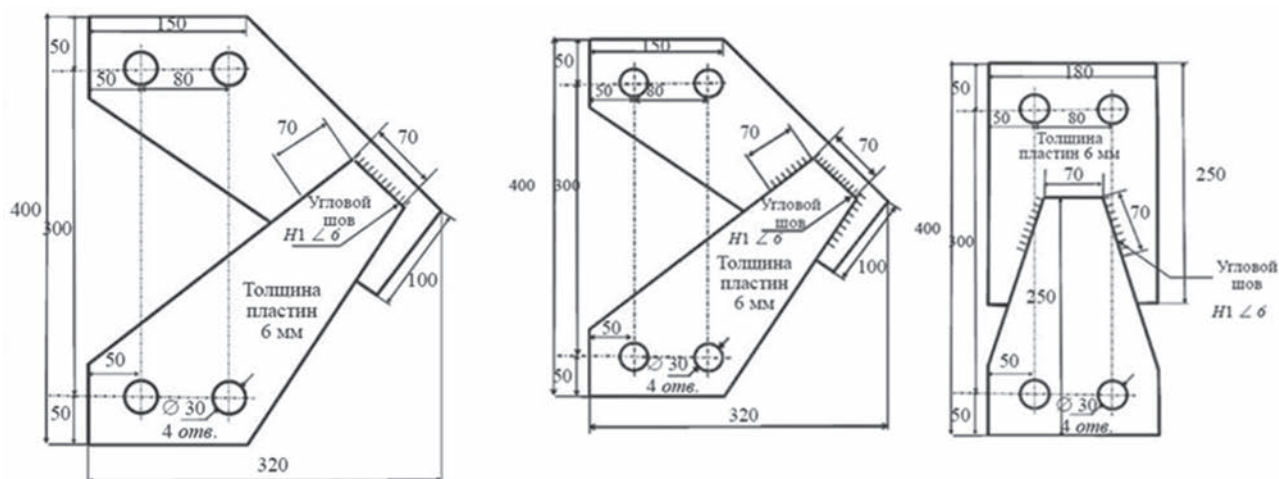


Рис. 5. Образцы нахлесточных сварных соединений

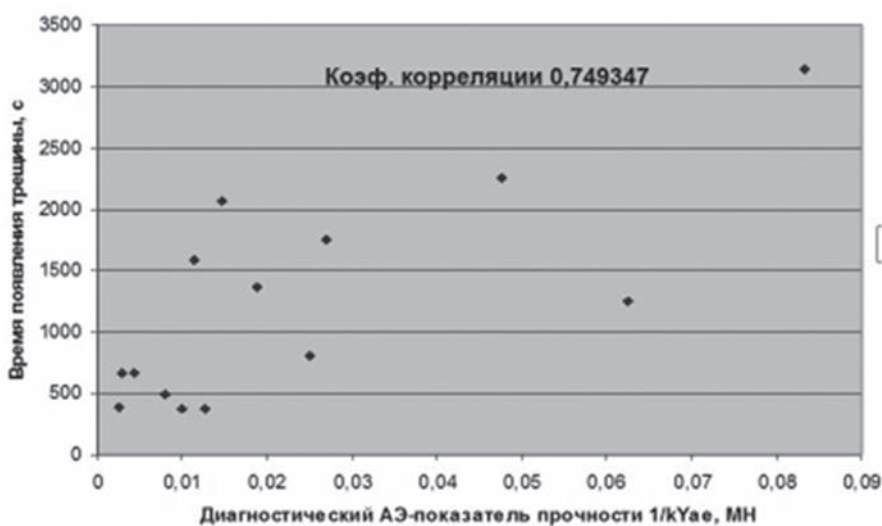


Рис. 6. Корреляция расчётных значений диагностического показателя kY_{AE} и момента появления трещины в образцах нахлесточных сварных соединений

Корреляция значений различных прочностных показателей АЭ образцов нахлесточных сварных соединений с величиной расчетных напряжений

Тип образца	Число отверстий в шве	Максимальное напряжение (по Мизесу), Па	Номинальное напряжение, Па	Число сигналов $N_{упр}$	Средняя амплитуда $A_{ср}$, дБ	Средняя энергия $E_{ср}$, мВ ² ·мс	kY_{AE} , $10^{-6} Н^{-1}$	Показатель m Иванова–Быкова [9]
1	0	85679	52964	188	65,7	46,9	53	0,16
	1 (в нагр. зоне)	191562	59175	28	64,7	24,4	227	0,67
	1 (в разгр. зоне)	180963	59175	26	71,7	167,2	91	0,26
	2	267166	66163	38	67,6	111,2	349	1,05
	4	272232	73386	8	70,7	1475	387	1,19
2	0	66045	8225	48	69,8	198,4	125	5,78
	3 (в нагр. зоне)	76696	8985	22	67,9	155,6	44	1,14
	3 (в разгр. зоне)	71085	8903	51	67,2	49,7	65	3,67
	6	75532	9800	62	65,8	88,8	78	3,62
	12	77589	11718	26	71,7	174,4	89	2,44
3	0	24504	1701	27	70,1	209,4	19	2,41
	2 (в нагр. зоне)	25591	1823	79	70,1	131,1	11	1,27
	2 (в разгр. зоне)	25464	1823	27	67,4	179,3	15	6,43
	4	25713	1965	41	79,4	782,1	42	2,06
	8	25847	2328	50	63,9	7,2	66	1,74
Коэффициент корреляции			0,93	-0,24	0,23	0,38	0,93	0,48

шей работе концентрационно-кинетических показателей прочности могут быть разнообразными изделия, критерием работоспособности которых является прочность и от которых могут быть зарегистрированы сигналы АЭ в процессе корректно проведенного испытания.

Исследования показали, что наилучшую корреляцию с разрушающей нагрузкой или временем до разрушения из наиболее применяемых при диагностировании параметров АЭ (суммарное число импульсов, суммарная амплитуда, средняя энергия импульсов АЭ, зарегистрированных на этапе упругого нагружения, значения локально-динамического m и концентрационно-кинетических показателей) имеют показатели kY_{AE} , X_{AE} и Y_{AE} .

Таким образом, оценка прочности элементов сварных конструкций может быть сведена к оценке предложенных авторами диагностических параметров, определяемых из неразрушающих экспресс-испытаний непосредственно на диагностируемой конструкции.

Литература

1. Носов В.В. Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основа эффективности неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 3 (65). С. 7—13.

2. Носов В.В. Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 24—35.

3. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 52—67.

4. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. СПб.: Лань, 2012.

5. Носов В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия. СПб.: Лань, 2013.

6. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. 2015. № 2 (219). С. 182—190.

7. Апасов А.М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали // Изв. Томского политех. ун-та. 2010. Т. 316. № 2. С. 32—41.

8. Махутов Н.А. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1983.

9. **ПБ 03-593-03.** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.

10. **Носов В.В.** Методика акустико-эмиссионного контроля прочности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1. С. 63—66.

11. **Носов В.В., Потанов А.И.** Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно-нагруженных металлоконструкций // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 61—72.

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

References

1. **Nosov V.V.** Metodologiya Akustiko-Emissionnoy Otsenki Prochnosti kak Osnova Effektivnosti Nerazrushayushchego Kontrolya V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya. 2014;3 (65):7—13. (in Russian).

2. **Nosov V.V.** Avtomatizirovannaya Otsenka Resursa Obraztsov Konstruktsionnykh Materialov na Osnove Mikromekhanicheskoy Modeli Vremennykh Zavisimostey Parametrov Akusticheskoy Emissii. Defektoskopiya;2014;12:24—35. (in Russian).

3. **Nosov V.V.** Printsipy Optimizatsii Tekhnologiy Akustiko-emissionnogo Kontrolya Prochnosti Promyshlennykh Ob'ektov. Defektoskopiya. 2016;7:52—67. (in Russian).

4. **Nosov V.V.** Diagnostika mashin i oborudovaniya. SPb.: Lan', 2012. (in Russian).

5. **Nosov V.V.** Mekhanika Kompozitsionnykh Materialov. Laboratornye Raboty i Prakticheskoe Zanyatiya. SPb.: Lan', 2013. (in Russian).

6. **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 Gos. Politekhn. Un-ta. 2015; 2 (219):182—190. (in Russian).

7. **Apasov A.M.** Issledovanie Signalov Akusticheskoy Emissii pri Sticheskom Nagruzhenii Ploskikh Obraztsov iz Vysokoprochnoy Stali. Izv. Tomskogo Politekhn. Un-Ta. 2010;316;2:32—41. (in Russian).

8. **Makhutov N.A. i dr.** Prochnost' Konstruktsiy pri Malotsiklovom Nagruzhenii. M.: Nauka, 1983. (in Russian).

9. **ПБ 03-593-03.** Pravila Organizatsii i Provedeniya Akustiko-emissionnogo Kontrolya Sosudov, Apparatov, Kotlov i Tekhnologicheskikh Truboprovodov. (in Russian).

10. **Nosov V.V.** Metodika Akustiko-emissionnogo Kontrolya Prochnosti i Prognozirovaniya Ostatochnogo

Resursa Metallicheskih Konstruktsiy. V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya. 2014;1:63—66. (in Russian).

11. **Nosov V.V., Potanov A.I.** Akustiko-emissionnyy Kontrol' Prochnosti Slozhno-Nagruzhennykh Metallokonstruktsiy. Defektoskopiya. 2015;1:61—72. (in Russian).

12. **Nosov V.V.** Otsenka Udaroopasnosti Uchastka Massiva Gornykh Porod po Rezul'tatam Registratsii ego Seysmoakusticheskoy Aktivnosti. Zapiski Gornogo In-ta. 2015;216:62—75. (in Russian).

Сведения об авторах

Носов Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры приборостроения Санкт-Петербургского горного университета, ведущий научный сотрудник инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, e-mail: nosovvv@list.ru

Ямилова Алсу Римовна — аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета, e-mail: alsouyamilova@mail.ru

Зеленский Николай Алексеевич — аспирант кафедры приборостроения Санкт-Петербургского горного университета, e-mail: smoke.kolay@mail.ru

Матвиян Илья Викторович — аспирант кафедры приборостроения Санкт-Петербургского горного университета, e-mail: mortensen19931@yandex.ru

Information about authors

Nosov Viktor V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Instrumentation Dept. of Saint-Petersburg Mining Institute, 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, e-mail: alsouyamilova@mail.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 09.11.2016