

# Влияние структурных границ раздела на статистику коррозионных микротрещин

© В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев\*, Г.И. Морозов\*, А.А. Лебедев\*, Е.Ю. Нефедьев\*\*, М.А. Крючков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

\*\* ОАО „НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова“,  
193167 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 1 декабря 2004 г.)

Исследованы амплитудные распределения сигналов акустической эмиссии (АЭ) при образовании коррозионных микротрещин в нагруженных сварных швах, соединяющих две трубки из коррозионно-стойкой стали. При значениях амплитуды АЭ меньше 0.6 мВ и концентрации микротрещин  $\sim 10 \text{ mm}^{-3}$  плотность распределения амплитуд описывается гамма-функцией. При амплитудах, превышающих 1 мВ, и концентрации микротрещин  $\geq 10^2 \text{ mm}^{-3}$  плотность распределения АЭ имеет два максимума, форма которых описывается выражением для распределения Гаусса. Средние значения амплитуд АЭ различаются в три раза. Изменение вида распределения амплитуд сигналов АЭ объясняется влиянием границы раздела между сварным швом и металлом на процесс формирования микротрещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-05-64831) и совместного гранта Минобразования и Минатома РФ (проект № 4.03-01).

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что форма распределений различных объектов (нанодфектов [1–3] и пятен коррозии [4] на поверхности металлов, микротрещин в границах [5], структурных образований в полимерах [2,6,7], агрегатов сажи в резине, бактерий, грибов, протеиновых молекул [2] и т.д.) по размерам описывается гамма-функцией. Известно [8], что гамма-распределение термодинамически оптимизировано, т.е. конфигурационная энтропия системы максимальна. Существование „равновесной“ формы распределения в неравновесном состоянии обусловлено тем, что все упомянутые объекты успевают сформироваться за время, значительно меньшее интервала наблюдения [2].

Ранее было установлено [9], что концентрация и размеры микротрещин в окрестности границ раздела в металлах имеют значения, отличные от величины этих параметров в объеме. Нас заинтересовал вопрос: как изменится форма распределения в окрестности структурных границ в металле? С этой целью были проведены исследования распределения коррозионных микротрещин внутри сварного шва и в его окрестности. Отметим, что до последнего времени статистика коррозионных трещин не изучалась, а основные усилия исследователей были направлены на исследования механизма коррозионного растрескивания и защиты от него [10–12].

## 1. Методика эксперимента

Две трубки из нержавеющей стали марки 08 × 18Н10Т (внутренний диаметр 10 мм, длина рабочей части 100 мм, толщина 1 мм) соединялись сварным швом шириной  $\sim 1$  мм. Трубки заполнялись технологическим

конденсатом ( $pH = 9.5$ ). Внутри их создавалось давление паров раствора 9 МПа при температуре 300°C. При помощи разрывной машины ИП-4М к образцам прикладывалось растягивающее напряжение 290 МПа. На захватах машины устанавливали два преобразователя акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ регистрировались при помощи автоматизированной системы СДАЭ-8.

## 2. Кинетика накопления микротрещин

На рис. 1 показаны временные зависимости числа сигналов АЭ для одного из изученных образцов. Для остальных образцов они имели аналогичный вид. Видно,

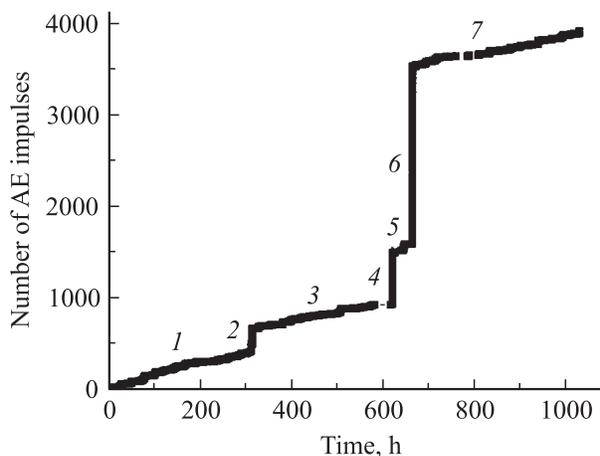


Рис. 1. Зависимость числа импульсов АЭ от времени. Цифрами показаны интервалы, в которых рассчитывались амплитудные распределения импульсов АЭ.

Отношения числа сигналов АЭ, эмитируемых из сварного шва  $N_w$  и его окрестности  $N_0$

Интервал	$N_w/N_0$
1	0.2
2	2
3	0.5
4	24
5	0.05
6	110
7	0.3

что число импульсов АЭ увеличивается немонотонно: периоды медленного накопления их числа сменяются моментами быстрого роста, и наоборот.

Разобьем эту зависимость на семь интервалов, как показано на рис. 1, определим места расположения микротрещин и изучим вид распределений амплитуд сигналов АЭ в каждом из интервалов.

### 3. Расположение микротрещин в нагруженном образце

В таблице приведены отношения числа сигналов АЭ, эмитируемых из сварного шва ( $N_w$ ) и его окрестности ( $N_0$ ). Как следует из таблицы, процессы трещинообразования в сварном шве и его окрестности чередуются: сначала микротрещины накапливаются в окрестности шва, затем внутри его, вновь в окрестности, опять внутри и т. д.

Скорость накопления микротрещин также зависит от места из образования. Так, в сварном шве (интервалы времени 2, 4, 6) она приблизительно на четыре порядка выше, чем в его окрестности (интервалы 3, 5, 7).

### 4. Распределение амплитуд сигналов АЭ из сварного шва

Оказалось, что вид распределений амплитуд сигналов АЭ зависит от их числа и средней величины  $\langle A \rangle$ . Так, в интервале 2, когда значение  $\langle A \rangle \approx 0.6$  мВ, а число сигналов не превышает нескольких сотен, она может быть описана гамма-распределением (рис. 2, *a*)

$$n(A) = n_0 A^2 \exp\left(-\frac{A}{\langle A \rangle}\right), \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда,  $n_0$  — нормирующий множитель.

Иная ситуация имеет место в других интервалах времени, когда среднее значение амплитуды превышает 0.6 мВ, а число импульсов АЭ  $10^3$  (рис. 2, *b*). В этом случае сигналы АЭ с  $A < 1$  мВ отсутствуют, а в распределении амплитуд наблюдаются два максимума с центром при  $\sim 2.5$  и  $\sim 7.5$  мВ, форма которых описывается

выражением для распределения Гаусса

$$n(A) = n_0 \exp\left(-\frac{(A - \langle A \rangle)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где  $\sigma$  — дисперсия.

Изменение вида плотности распределения сигналов АЭ, по-видимому, можно объяснить влиянием границ сварного шва на процесс трещинообразования. В этом случае доля объема, занятого микротрещинами, достигает  $\sim 6-7\%$ . Согласно концентрационному критерию разрушения [13], когда доля объема, занятого микротрещинами, достигает критического значения  $\sim 5\%$ , взаимодействие между ними резко увеличивается и они начинают укрупняться. Как уже отмечалось [9], в окрестности границ раздела в металлах концентрация и размеры микротрещин изменяются. Вероятно, вблизи границ взаимодействие между микротрещинами усиливается, что обуславливает изменение формы распределения микротрещин по размерам в сварном шве.

Известно [14], что амплитуда сигналов АЭ связана с размером микротрещин  $L$  следующим образом:  $A \approx BL^{1.5}$ . Коэффициент пропорциональности  $B$  для материала сварного шва неизвестен. Для гру-

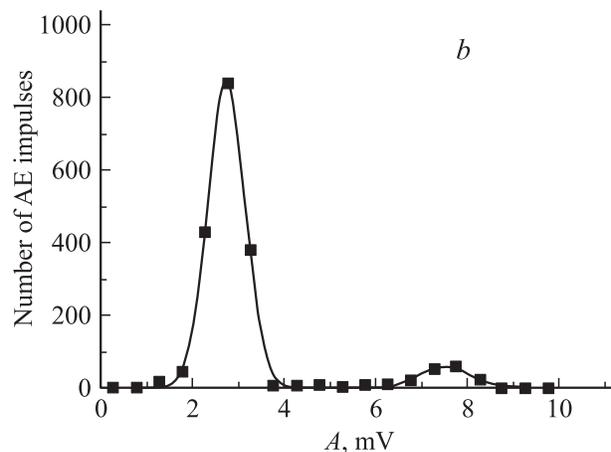
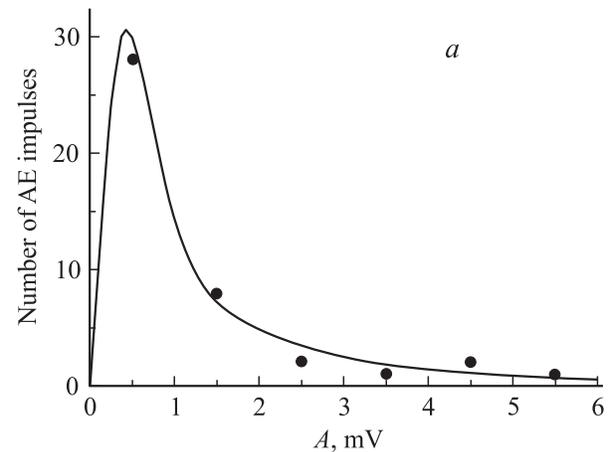


Рис. 2. Распределение амплитуд импульсов АЭ из сварного шва в интервалах 2 (*a*) и 6 (*b*). Сплошная линия на *a* — гамма-распределение, а на *b* — распределение Гаусса.

бой оценки размеров микротрещин можно использовать величину  $B \approx 0.024 \text{ mV}/\mu\text{m}$ , полученную в работе [14] для пружинной стали. Тогда значению амплитуды  $\langle A \rangle = 0.6 \text{ mV}$  соответствует средний размер микротрещин  $\langle L \rangle \approx 8.6 \mu\text{m}$ , при  $\langle A \rangle = 2.5 \text{ mV}$   $L \approx 22.5 \mu\text{m}$ , а при  $\langle A \rangle = 7.5 \text{ mV}$   $L \approx 46 \mu\text{m}$ . Таким образом, средние размеры микротрещин различаются приблизительно в 3 раза. Такое отношение средних размеров не является исключением. Проведенный недавно анализ [5,15,16] распределений амплитуд АЭ для напряженных гранитов, а также размеров нанодефектов [1–3] и пятен коррозии [4] на поверхности металлов, структурных образований в полимерах [2,6,7] показал, что их средние значения также различаются в 3 раза.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что распределение амплитуд сигналов АЭ из сварного шва зависит от размера микротрещин и их концентрации. Когда величина средней амплитуды АЭ (приблизительно пропорциональной размеру микротрещин) составляет  $\sim 0.6 \text{ mV}$ , а число сигналов не превышает нескольких сотен, плотность распределения амплитуд описывается выражением для гамма-функции. Когда среднее значение амплитуды достигает  $2.5 \text{ mV}$ , а число сигналов  $10^3$ , плотность распределения описывается выражением для функции Гаусса. Изменение формы распределения при увеличении размеров и концентрации микротрещин, по-видимому, обусловлено резким увеличением взаимодействия между ними вблизи границ раздела между сварным швом и металлом. Средние значения размеров микротрещин в сварном шве различаются в 3 раза.

## Список литературы

- [1] Х.Г. Килиан, В.И. Веттегрень, В.Н. Светлов. ФТТ **42**, 11, 4024 (2000); **43**, 11, 2107 (2001).
- [2] H.G. Kilian, M. Koepf, V.I. Vettegren. Prog. Colloid Polym. Sci. **117**, 2 (2001).
- [3] А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень, В.Н. Светлов. ФТТ **44**, 7, 1260 (2002).
- [4] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, Г.И. Морозов. Письма в ЖТФ **28**, 13, 1 (2002).
- [5] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, Н.Г. Томилин, М.А. Крючков. ФТТ **46**, 10, 1293 (2004).
- [6] С.В. Бронников, Т.Е. Суханова, Л.А. Лайус. Высокомолекуляр. соединения А **44**, 5, 940 (2002).
- [7] S.V. Bronnikov, T.E. Sukhanova. Image Analysis Steriology **20**, 1, 105 (2001).
- [8] B.L. Lavenda. Statistical Physics. A Probabilistic Approach. J. Wiley & Sons, Inc., N.Y. (1997). 432 p.
- [9] П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. Поры в твердом теле. Энергоатомиздат, М. (1990). 456 с.
- [10] М. Иовчев. Коррозия теплоэнергетического и ядерно-энергетического оборудования. Энергоатомиздат, М. (1988). 222 с.
- [11] Н.П. Жук. Курс теории коррозии и защиты металлов. Металлургия, М. (1976). 472 с.

- [12] Л.Я. Томашов. Теория и защита металлов. АН СССР, М. (1959). 592 с.
- [13] V.S. Kuksenko, V.S. Ryskin, V.I. Betehtin, A.I. Slutsker. Int. J. Fracture Mech. **11**, 5, 829 (1975).
- [14] Ю.Е. Нефедьев, В.А. Волков, С.В. Кудряшов, А.И. Ляшков, В.Н. Савельев. Дефектоскопия **3**, 41 (1986).
- [15] V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaja, D. Lockner. Pure Appl. Geophys. **146**, 1, 253 (1996).
- [16] Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, В.С. Куксенко, ФТТ **36**, 10, 3101 (1994).