

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С РАЗМЕРАМИ МИКРОТРЕЩИН И РАЗМЕРАМИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛИ



¹Евгений Юрьевич Нефедьев,
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)241-1988, E-mail: ne246@ya.ru.



²Стояновский Лев Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905)230-4149, E-mail: sto-lev@yandex.ru.

Аннотация

В работе исследуются зависимости между параметрами сигналов акустической эмиссии (АЭ), размерами зерен и размерами микротрещин в стали 08ГДНФЛ. Рассмотрено влияние структуры, созданной тремя вариантами термической обработки на размеры микротрещин, образующихся при пластической деформации до достижения предела текучести материала. Изучена взаимосвязь размеров образующихся микротрещин, с амплитудами генерируемых при этом сигналов АЭ. Получена единая зависимость амплитуды генерируемых сигналов АЭ от размера образующихся микротрещин, независящая от варианта термической обработки.

Ключевые слова: термообработка, микроструктура, диаметр зерна, размер микротрещины, акустическая эмиссия, амплитуда сигнала АЭ, метод хорд Спектора, критерий Колмогорова.

Введение

Метод акустической эмиссии (АЭ) как метод неразрушающего контроля и способ изучения процессов разрушения в твердых телах

известен около ста лет [1,6,7-9,20]. Однако до сегодняшнего дня не существует единого мнения об источниках АЭ. На эту роль претендуют такие процессы как движение дислокаций, образование микротрещин, фазовые превращения, двойникование и другие механизмы [14,22-23]. Главной целью данного исследования была проверка гипотезы о том, что основным источником АЭ в конструкционных сталях являются процессы образования микротрещин. Второй целью было проверить влияние структуры на размеры образующихся микротрещин [2,3,21]. Решение данной задачи позволяет разрабатывать методики мониторинга за развитием макроскопических трещин в станинах прокатного стана, сосудах давления, трубопроводах и своевременно предупреждать о необходимости ремонта.

Было проведено исследование амплитудного состава сигналов АЭ во время деформирования образцов из стали 08ГДНФЛ при напряжениях не превышающих предел текучести. Оптическими методами исследовалось распределение по размерам ферритных зерен и перлитных колоний в стали и микротрещин на полированных поверхностях образцов во время действия растягивающих напряжений. Размеры трещин сопоставлялись с размерами структурных элементов и амплитудами сигналов АЭ. Сопоставления проводились методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова [10].

Методы

Для варьирования размера структурных элементов использовались различные режимы термической обработки (ТО)

Обычно при описании структуры стали используют балл зерна. Для определения балла используют стандартные шкалы, которые характеризуют количество зерен располагающихся на определенной площади шлифа. Для детального сопоставления размеров трещин и зерен по диаметрам необходимы более тонкие методы, позволяющие сопоставлять их распределения по размерам. Одним из таких методов является Метод хорд Спектора [5]. Он состоит в изучении распределения хорд отсекаемых случайными линиями на зеренной структуре протравленного металлического шлифа. В стали 08ГДНФЛ существуют две структурные составляющие: ферритные зерна и перлитные колонии. Каждая подсчитывалась отдельно.

Механические испытания проводились на установке, позволяющей прикладывать растягивающее усилие и фотографировать полированную поверхность образца без разгрузки образца. Испытывались плоские образцы в форме двойной лопатки. Образцы доводились до напряжения равного 90% от предела текучести.

АЭ контроль осуществлялся в режиме линейной локации и пространственной фильтрации [16, 18-19]. Это позволяло отсекалть помехи от захватов машины и исследовать сигналы АЭ только из рабочей части образца.

Проверка гипотез о соответствии амплитуд сигналов АЭ размерам микротрещин и взаимосвязи размеров трещин с размерами структурных элементов выполнялась методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова [10]. При сравнении двух распределений каждое делилось на одинаковое количество участков. Строились нормированные кумулятивные распределения, и искалось максимальное отклонение между ними. По таблицам определялись максимальные допустимые отклонения на уровне значимости 5%. При превышении величины максимального отклонения нулевая гипотеза о существовании связи между двумя сравнимыми распределениями отвергалась.

Результаты

Различными исследователями показана важность границ зерен, как источников и стопоров микротрещин [1]. Но нет единого мнения на то, какой именно элемент структуры отвечает за образование микротрещин. Основная масса исследователей ограничивается изучением связи лишь среднего размера зерна с прочностными и пластическими свойствами [2]. Поэтому представляло большой интерес изучение влияния размера различных компонент поликристаллической структуры на размер образующихся микротрещин. Попутно необходимо было выяснить, сохраняется ли связь между размером микротрещин и амплитудой сигналов АЭ при изменении размера зерна. Сохранение такой связи подтвердило бы ее справедливость и показало бы, что основным источником дискретной АЭ в конструкционных сталях является образование микротрещин.

Изучение связи размеров микротрещин, образующихся при деформировании конструкционных сталей, с размерами структурных зерен, выполнено на стали 08ГДНФЛ, подвергнутой для этой цели трем различным режимам термической обработки для вариации величины структурных элементов.

Полученная перлитно-ферритная структура показана на рисунке 1.

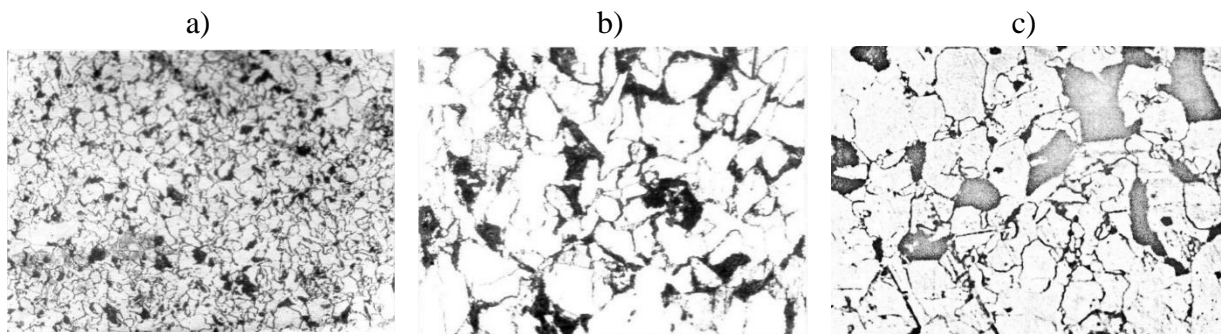


Рис. 1. Ферритно-перлитные структуры, полученные термообработкой по первому, второму и третьему режимам соответственно, при увеличении в 250 раз.

Вид распределений ферритных зерен и перлитных колоний по хордам и диаметрам для заготовок, обработанных по второму режиму термообработки, показан на рис. 2.

Из рисунков видно, что в данном случае размеры ферритных зерен превышают размеры перлитных колоний. Кроме того, как и следовало ожидать, размеры зерен превышают размеры хорд для каждой структурной составляющей. Статистические сведения, позволяющие описать данные распределения для всех режимов термической обработки, представлены в табл. 1 (Fh - распределение по хордам ферритных зерен, Fd - распределение по диаметрам ферритных зерен, Ph - распределение по хордам перлитных колоний, Pd - распределение по диаметрам перлитных колоний).

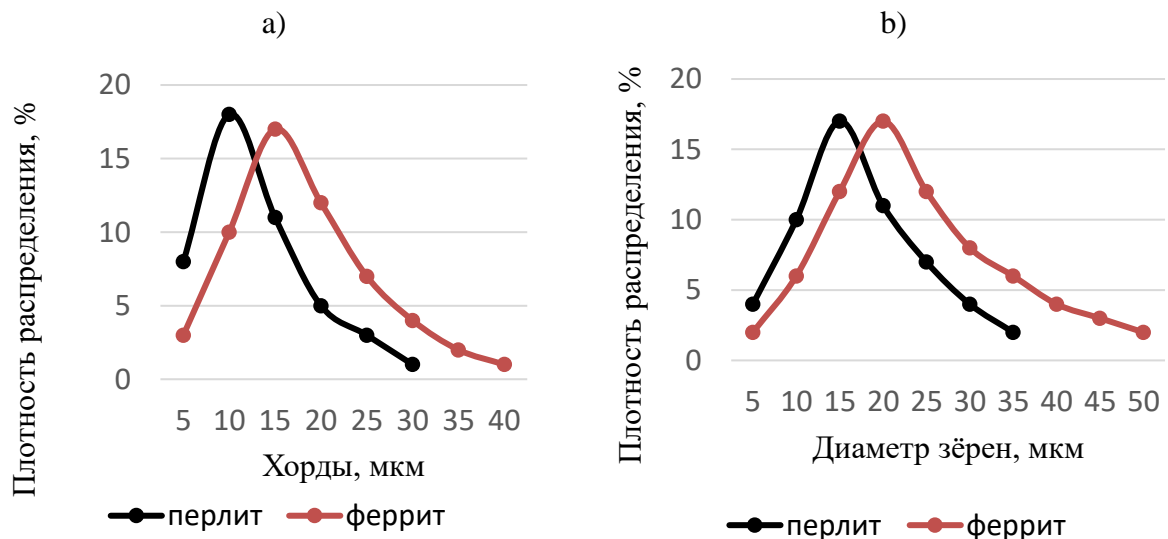


Рис. 2. Распределение ферритных зерен и перлитных колоний по хордам в заготовке, обработанной по режиму №2. 1 – для перлита, 2 – для феррита.

Таблица 1. Статистические параметры распределения размеров зерен

Вариант термообработки	Параметр структуры	Наиболее вероятный размер зерна, мкм	Средний размер зерна, мкм	Стандартное отклонение, мкм
1	Fh	6	9	2
1	Fd	7	11	2
2	Fh	10	21	3
2	Fd	14	21	6
2	Ph	7	13	3
2	Pd	10	15	3
3	Fh	16	30	8
3	Fd	27	35	7
3	Ph	21	35	5
3	Pd	29	43	6

Образцы нагружались до предела текучести материала. Появившиеся микротрещины измерялись на образце, не снимая нагрузки (рис.3), регистрировались все микротрещины, начиная с размера 2 мкм. Для примера на рис. 3 показано распределение микротрещин по размерам в образце из партии № 2, обработанной по второму режиму термообработки.

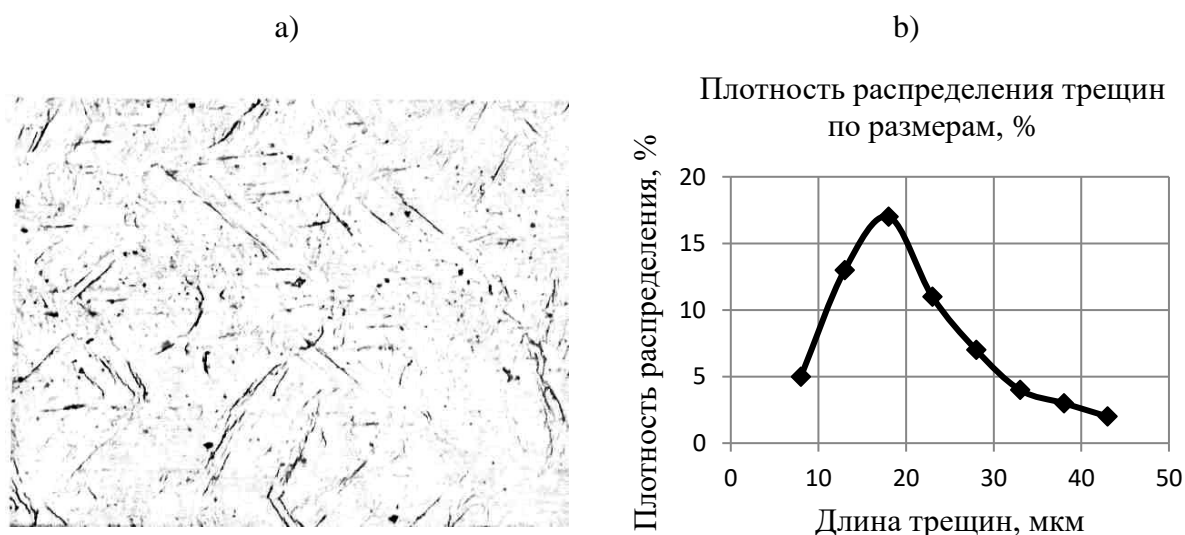


Рис. 3. Микротрещины в нагруженном образце и их распределение по размерам

Параметры распределения микротрещин по размерам показаны в таблице № 2.

Таблица 2. Параметры распределения микротрещин по размерам

Вариант термообработки	Наиболее вероятный размер, мкм	Средний размер, мкм	Среднеквадратичное отклонение, мкм
1	7.5	10	2
2	14	19	6
3	17	27	8

Распределения по размерам зерен и микротрещин представлены на рис. 4.

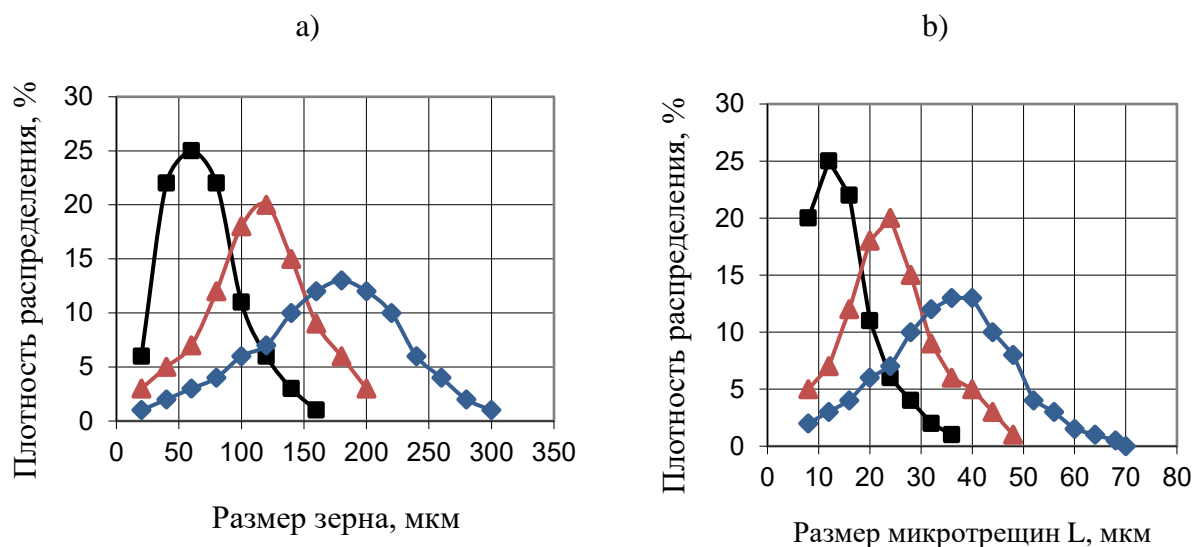


Рис. 4. Распределения по размерам зерен и микротрещин

Для сравнения распределения микротрещин с распределением размеров структурных элементов использовался критерий Колмогорова.

Проверка гипотез о связи размеров микротрещин с размерами структурных элементов показала, что во всех трех партиях образцов с разными режимами термической обработки справедлива гипотеза о том, что размеры микротрещин определяются размерами хорд ферритных зерен. Распределение микротрещин подобно распределению случайных хорд, потому что микротрещина представляет собой случайную плоскость, делящую зерно на две части. Эта плоскость не обязательно должна быть диаметральной плоскостью. Поэтому след ее на поверхности шлифа представляет собой случайную хорду.

Рассмотрим данные об амплитудном распределении сигналов АЭ, полученных из зоны контроля образцов при их нагружении. Амплитудное

распределение сигналов по виду подобно распределению трещин по размерам и зерен по размерам и показано на рис. 5.

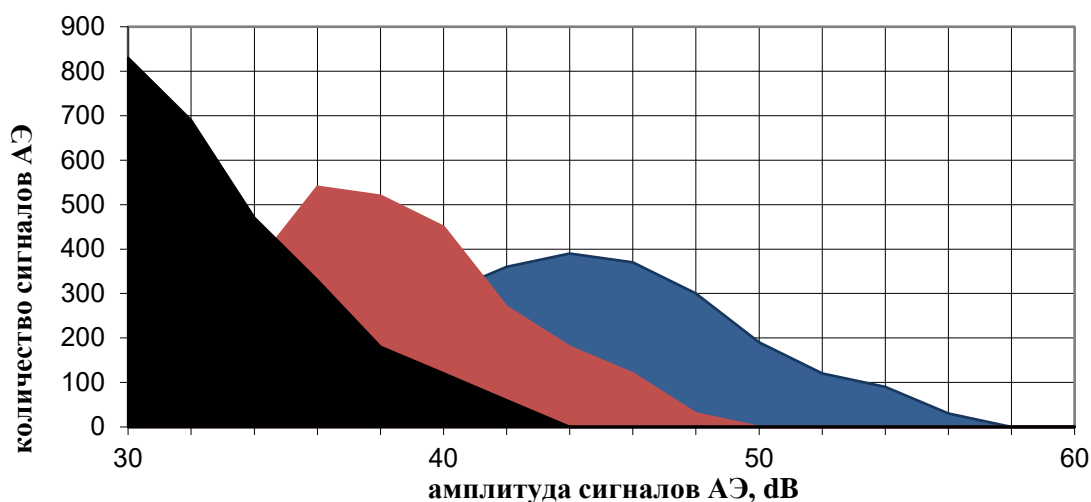


Рис. 5. Распределения сигналов АЭ по амплитудам для трех партий образцов

Наблюдается несомненное подобие распределений зерен, трещин и амплитуд сигналов АЭ.

Используя методику, описанную в [11], аппроксимировали связь амплитуды сигнала АЭ с размером трещины функцией вида:

$$A = C1 * L^{c2}. \quad (1)$$

Коэффициенты для трех партий по-разному термообработанных образцов, вычисленные по методу наименьших квадратов. Рассчитанные по данным коэффициентам зависимости амплитуды сигнала АЭ от размера образующейся микротрещины представлены ниже в порядке возрастания номера варианта термообработки:

$$A = 0.03 * L^{1.38}, \quad (2)$$

$$A = 0.01 * L^{1.64}, \quad (3)$$

$$A = 0.01 * L^{1.68}. \quad (4)$$

В этих выражениях длина трещины выражается в микронах, а амплитуда сигнала АЭ - микровольтах. Показатель степени вычислялся обычным способом, описанным в [4]. Все полученные выражения, не внося большой ошибки, можно заменить одним выражением:

$$A = 0.02 * L^{1.5}, \quad (5)$$

которое удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

Обсуждение

В данном исследовании на конкретном примере широко используемой конструкционной стали 08ГДНЛ мы количественно проверили и подтвердили две гипотезы. Первая гипотеза состоит в том, что микротрещины, образующиеся на начальном этапе деформирования при напряжениях, не превышающих 90% от предела текучести, определяются размерами структурных элементов. Именно в этом диапазоне напряжений работают почти все конструкции. Именно в этом при таких напряжениях мы обычно в соответствии с нормативными документами проводим периодические перегрузочные испытания. Это гидравлические или пневматические испытания для сосудов давления и трубопроводов. А также перегрузочные испытания для лифтов, подъемных кранов и другой грузоподъемной технике.

Использование количественной металлографии позволяет выявить влияние распределения структурных элементов материала по размерам. В обычной практике ограничиваются баллом зерна или его средним размером.

Понимание связи амплитуды сигналов АЭ и размеров микротрещин дает возможность проникнуть в природу излучения АЭ и разобраться в основах метода, а не ограничиваться шаблонными ссылками на недоказанные возможные источники АЭ.

Применение строгих методов непараметрической статистики с опорой на критерий одного из крупнейших математиков 20 века – Н. А. Колмогорова дает 95% процентную уверенность в справедливости сделанных заключений. Это позволяет разрабатывать методики АЭ контроля различного оборудования и технологических процессов, подобных методикам, описанных в следующих источниках [12, 14, 16, 15, 17, 21].

Заключение

Обобщая основные идеи статьи, можно утверждать, что, распределение трещин по размерам определяется распределением ферритных зерен на ранних стадиях деформации.

Существование единой зависимости амплитуды сигнала АЭ от размера возникающей микротрещины, но зависящей от размера структурных элементов, подтверждает выводы о том, что основным

источником сигналов АЭ в конструкционных сталях является возникновение микротрещин

Дальнейшие перспективы исследований могут включать проведение аналогичных экспериментов на других типах стали или материалов, детальное исследование влияния различных параметров термообработки на формирование трещин, и разработку современных методов диагностики и контроля состояния металлоконструкций на основе данных об акустической эмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
- [2] Орлов А. Н., Перевезенцев В. Н., Рыбин В. В. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 156 с.
- [3] Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения стальных конструкций – Киев: Наукова думка, 1981 – 240 с.
- [4] Ирвин, Д. Ж. Основы теории роста трещин и разрушения / Д. Ж. Ирвин, П. Парис // Разрушение. Т.3. / под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1976. – С. 17–66.
- [5] Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1970 – 360 с.
- [6] Palmer I. G., Heald P. T. The Application of Acoustic Emission Measurement to Fracture Mechanics // Materials Science and Engineering. 1973. V. 11. pp. 181-184
- [7] Pollock A. A. Quantitative Evaluation of Acoustic Emission from Plastic zone Growth. Dunegan Endevco. Technical Report. D/E-76-8. 1976, 31p.
- [8] ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
- [9] Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Изд. Дом «Спектр», 2017. – 368 с.: ил.
- [10] Колмогоров А. Н. Теория вероятности и математическая статистика, М.: Наука, 1986. – 535 с.
- [11] Нефедьев Е. Ю., Волков В. А., Кудряшов С. В., Ляшков А. И., Савельев В.Н. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали, – Дефектоскопия, 1986, №3. – С. 41-44.
- [12] 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.

- [13] 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
- [14] Гомера В. П., Смирнов А. Д., Нефедьев Е. Ю., Стояновский Л. О. Мониторинг развития расслоения в корпусе сосуда давления при его периодической инспекции // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 8-й Международной научно-практической конференции (ММЕSE-2019) / Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2019. – с. 237-249.
- [15] Gomera V., Nefedyeve 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.
- [16] Nefedyeve 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.
- [17] 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
- [18] Petersen T. B., Shemyakin V. V, Chernigovsky V. Noise diagnostics at AE monitoring of hazardous industrial assets. Springer. Advances in Acoustic Emission Technology. Proceedings of the ISAE WCAE-2013 Shanghai, China, pp. 93-102.
- [19] Senkevich Yu. I, Duke V.A., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. Information approach to the analysis of acoustic and electromagnetic signals // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 20. 02012. 9 p.
- [20] EN 14584 Non-destructive testing - Acoustic emission - Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Planar location of AE sources.
- [21] Mishin V. M., Filippov G.A. Microstructural factors that decrease the local strength of grain boundaries in martensitic steels // Physics of Metals and Metallography, 2018. Vol. 119. № 5, pp. 504–509. DOI: 10.1134/S0031918X18050101
- [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

E. Yu. Nefedyev¹, L. O. Stoyanovskiy²

STUDYING THE RELATIONSHIP BETWEEN ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AND THE SIZES OF MICROCRACKS AND STRUCTURAL ELEMENTS IN STEEL

¹Krylov State Research Center, Russia;

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The paper explores the relationship between the parameters of acoustic emission (AE) signals, grain sizes and sizes of microcracks in steel 08GDNFL. It considers the impact of the structure, established by three variants of heat treatment, on the sizes of microcracks that form during plastic deformation until the yield strength of the material is reached. The correlation between the sizes of the formed microcracks and the amplitudes of the generated AE signals was analyzed. The study established a consistent relationship between the amplitude of the generated AE signals and the size of the resulting microcracks, a relationship that remains unaffected by the variation in heat treatment methods.

Key words: Heat treatment, microstructure, grain diameter, microcrack size, acoustic emission, AE signal amplitude, Spector's chord method, Kolmogorov's criterion.

REFERENCES

- [1] Greshnikov V. A., Drobot Yu. V. acoustic emission. Application for testing materials and products. - M.: Publishing House of Standards, 1976. - 272 p.
- [2] Orlov A. N., Perevezentsev V. N., Rybin V. V. Grain boundaries in metals. M., Metallurgy, 1980, 156 p.
- [3] Meshkov Yu. Ya. Physical bases of destruction of steel structures. Kyiv, Naukova Dumka, 1981, 240 p.

- [4] Irvin, D. Zh. Fundamentals of the theory of crack growth and fracture / J. Irvin, P. Paris // Destruction. T.Z. / ed. G. Liebovitz. - M.: Mir, 1976. - S. 17-66.
- [5] Saltykov S. A. Stereometric metallography. M, Metallurgy, 1970, 360 p.
- [6] Palmer I. G., Heald P. T. The Application of Acoustic Emission Measurement to Fracture Mechanics // Materials Science and Engineering. 1973. V. 11. pp. 181-184
- [7] Pollock A. A. Quantitative Evaluation of Acoustic Emission from Plastic zone Growth. Dunegan Endevco. Technical Report. D/E-76-8. 1976, 31p.
- [8] GOST R 52727-2007. Technical diagnostics. Acoustic emission diagnostics. General requirements.
- [9] Ivanov V. I., Barat V. A. Acoustic emission diagnostics: Ref. M.: Ed. House "Spectrum", 2017. - 368 p.: ill.
- [10] Kolmogorov A. N. Probability theory and mathematical statistics, Moscow: Nauka, 1986, - 535 p.
- [11] Nefediev E. Yu. Relationship between microcrack sizes and parameters of acoustic emission and the structure of deformed rotor steel, Defectoscopy, 1986, No. 3, p. 41-44.
- [12] 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.
- [13] Jiang Peng, Li Kairui, Zhang Luyin, Li Wei, Yan Xiaowei, Determination of the destruction parameters of vessels for storing hydrogen under high pressure using the entropy of acoustic emission, Defectoscopy, 2022, No. 6, pp. 26-36
- [14] Gomera V.P., Smirnov A.D., Nefediev E. Yu., Stoyanovsky L.O. Monitoring the development of delamination in the pressure vessel during its periodic inspection // Modern engineering: Science and education: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference (MMESE-2019) / Ed. A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2019. - pp. 237-249.
- [15] Gomera V., Nefediev 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, pp. 343-349.

- [16] 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.
- [17] Matvienko Yu. G., Vasiliev I. E., Chernov D. V., Ivanov V. I., Elizarov S. V., Problems of locating sources of acoustic emission, *Defectoscopy*, 2021, no. 9, pp. 35-44
- [18] Petersen T. B., Shemyakin V. V, Chernigovsky V. Noise diagnostics at AE monitoring of hazardous industrial assets. Springer. *Advances in Acoustic Emission Technology. Proceedings of the ISAE WCAE-2013 Shanghai, China*, pp.93-102.
- [19] Senkevich Yu. I., Duke V. A., Mishchenko M. A., Solodchuk A. A. Information approach to the analysis of acoustic and electromagnetic signals // *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 20. 02012. 9 p.
- [20] EN 14584 Non-destructive testing – Acoustic emission – Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Planar location of AE sources.
- [21] Mishin V.M., Filippov G.A. Microstructural factors that decrease the local strength of grain boundaries in martensitic steels // *Physics of Metals and Metallography*, 2018. Vol. 119. № 5, pp. 504–509. DOI: 10.1134/S0031918X18050101
- [22] Prokopiev L. A., Andreev Ya. M., Lukin E. S., Assessing the degree of danger of crack-like defects based on acoustic emission control under local low-temperature loading, *Defectoscopy*, 2022, no. 12, pp. 17-23
- [23] Rastegaev I. A., Yasnikov I. S., Rastegaeva I. I., Agletdinov E. A., Merson D. L., Evaluation of the probability of detecting acoustic emission signals by the amplitude discrimination method at a low signal-to-noise ratio, *Defectoscopy*, 2022, no. 3, pp. 3-12