

# ОБНАРУЖЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПОВТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ СтЗсп

В. Л. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, А. А. ШАРКО<sup>2</sup>, С. А. СМЕТАНКИН<sup>1</sup>, Д. М. СТЕПАНЧИКОВ<sup>2</sup>, К. Ю. ЮРЕНИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонская гос. морская акад. 73000, г. Херсон, пр-т Ушакова, 20, г. E-mail:ksma@ksma.ks.ua

<sup>2</sup>Херсонский нац. техн. ун-т. 73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24. E-mail:kntu@kntu.net.ua

Установлено наличие трех участков последовательно уменьшающейся интенсивности акустической эмиссии при повторном одноосном нагружении, соответствующих зонам деформационного упрочнения стали СтЗсп. Обнаружен эффект уменьшения плотности сигналов акустической эмиссии при возрастании нагрузки. Дается объяснение этому явлению, исходя из представления энергии излучаемых сигналов. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, эффекты, сталь, нагружение, сигналы, информация, дислокации

Повышение надежности оборудования – одна из многоплановых задач технического диагностирования, позволяющего определять состояние оборудования непосредственно в процессе эксплуатации, а также прогнозировать его изменения. Среди методов технической диагностики особое место принадлежит неразрушающему контролю технического состояния объектов по измерениям физико-механических свойств материалов без разборки элементов конструкции. Для осуществления такого контроля необходимо изучить корреляционные связи между механическими характеристиками металлов и параметрами акустической эмиссии (АЭ) в различных условиях испытания материалов.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что связь между процессом образования дефектов и наличием сигналов АЭ позволяет определять степень работоспособности материала при изменяющихся условиях эксплуатации изделий [1, 2], уровень напряжений и деформации материала [3], обнаруживать дефекты [4], определять их координаты, оценивать степень их опасности [5]. Проблемные вопросы изучения явления АЭ освещены в работах [6–8], однако в них не акцентируется внимание на причинах и механизмах зарождения источников АЭ.

Целью данной работы является исследование взаимосвязи структурных переходов в объеме деформируемого материала с параметрами сигналов АЭ.

В основе постановки настоящей работы лежит реализация эффекта Кайзера, заключающегося в отсутствии или существенном уменьшении АЭ при повторном нагружении образцов вплоть до того момента, когда нагрузка при последующем нагружении не достигнет максимального значения, зафиксированного в предыдущем цикле.

Для эксперимента была выбрана одна из распространенных конструкционных углеродистых

сталей СтЗсп. Образцы для испытаний на одноосное растяжение размером 223×37×3 мм вырезали из листового проката и выбирали из условий размещения на недеформируемых участках образцов АЭ датчиков.

Идентификация структурных особенностей накопления повреждений материалов по данным АЭ осуществлялась на основе анализа степени деформации образцов, полученной из испытаний на разрывной машине УМ5. В качестве контактного материала между преобразователями АЭ и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные датчики к акустико-эмиссионному прибору АФ15.

Используемая в эксперименте информационно-измерительная система обеспечивала индикацию, регистрацию и предобработку сигналов АЭ с дальнейшим ее сохранением в памяти персонального компьютера для последующей постобработки полученных данных и их визуализации в реальном масштабе времени с помощью запоминающего осциллографа (RIGOL DS1052E Digital oscilloscope).

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Измерение деформации образцов проводилось путем фиксации удлинения с помощью микрометрического электронного индикатора перемещения Micron digital indicator DT-7011.

В основе его работы используется емкостная матрица-кодер в виде двух последовательно соединенных конденсаторов, образующих цифровой нониус. Прибор одним концом через струбцину крепился к верхнему захвату разрывной машины, касаясь индикаторной стойки. Другой конец индикаторной стойки через струбцину крепился к нижнему захвату разрывной машины.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

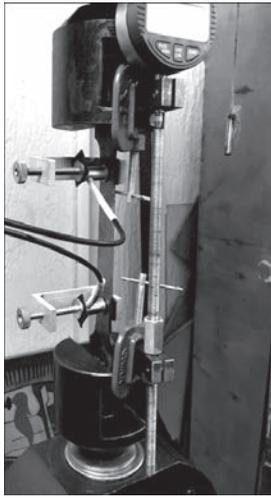


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

В отличие от одноосного первичного нагружения, характеризуемого дискретным возникновением актов АЭ, при повторном нагружении обнаруживается непрерывный характер акустической эмиссии.

При более детальном рассмотрении временных распределений амплитуд сигналов АЭ при возрастающих нагрузках можно заметить, что они объединяются в группы или участки, критериями принадлежности к которым являются изменения их плотности. По результатам акустических измерений установлено наличие трех участков с последовательно уменьшающейся плотностью АЭ сигнала (табл. 1).

Динамику физических процессов, сопровождающих излучение АЭ отражает амплитудно-временное распределение АЭ  $n(A,t)$ , т. е. функция, указывающая количество импульсов АЭ  $dN$ , за

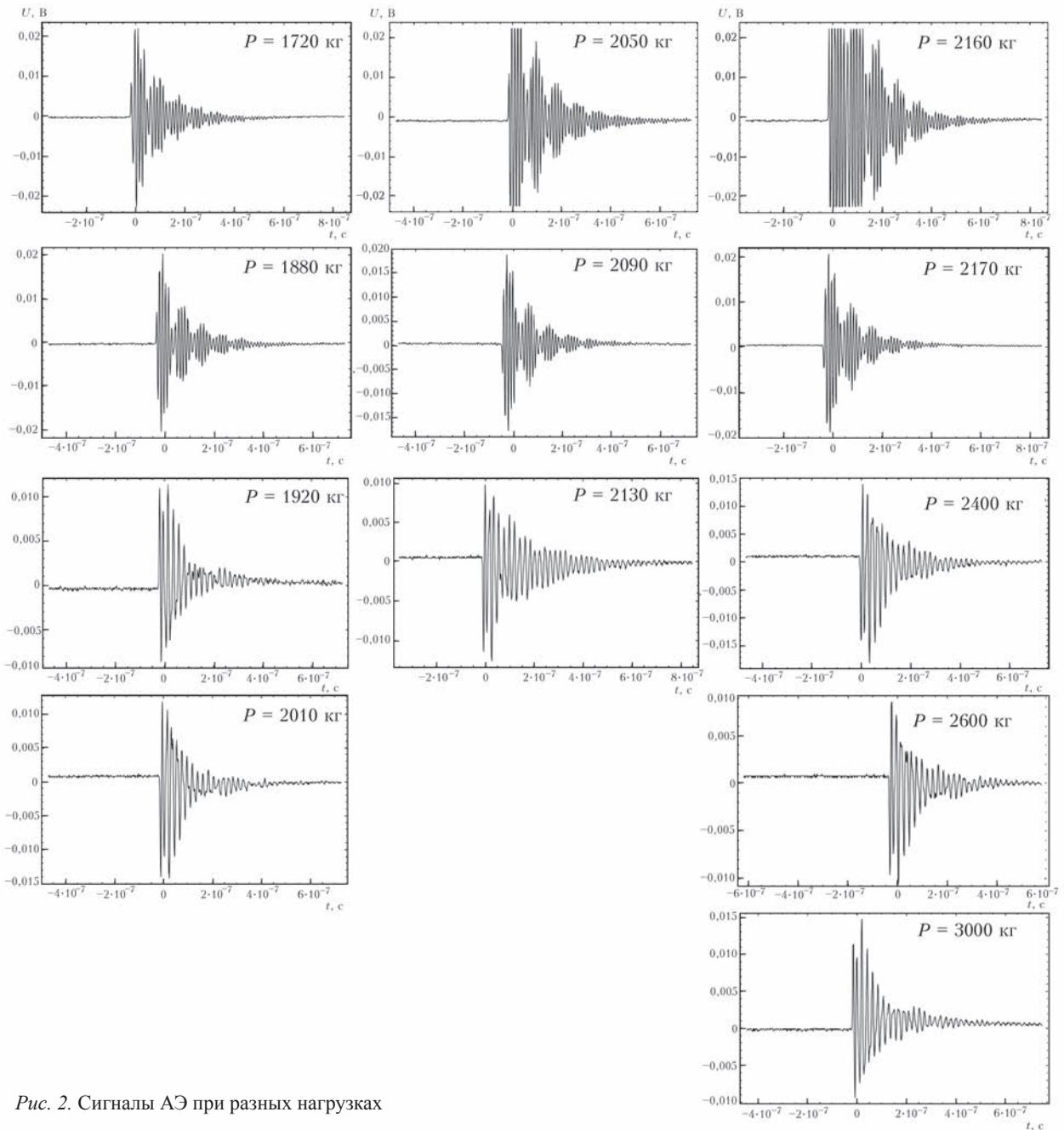


Рис. 2. Сигналы АЭ при разных нагрузках

Таблица 1. Участки уменьшения плотности АЭ сигналов при повышении нагрузки

Зоны уменьшения плотности АЭ сигнала при повышении нагрузки	Нагрузка $P$ , кг				
	1720	1880	1920	2010	—
1 участок	1720	1880	1920	2010	—
2 участок	2050	2090	2130	—	—
3 участок	2160	2170	2400	2600	3000

регистрируемых в промежутке времени от  $t$  до  $t + dt$ , амплитуда которой заключена в интервале от  $A$  до  $A + dA$ :

$$dN = n(A,t)dAdt.$$

Если полное время регистрации АЭ находится в интервале от 0 до  $T$ , то:

$$n(A) = \int_0^T n(A,t)dt \text{ и } N = \iint_0^T n(A,t)dtdA.$$

Согласно принципу неопределенности чем больше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размыта в частотной области. При изменении масштаба функции произведение плотности вероятности временных и частотных диапазонов остается постоянным [8].

Эффективным способом анализа непрерывных сигналов АЭ являются преобразования Фурье, в которых сигнал раскладывается на базис синусов и косинусов разных частот. Коэффициенты преобразования находятся путем вычисления скалярного произведения сигнала с комплексными экспонентами:

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\Omega t} dt,$$

где  $f(t)$  – сигнал;  $F(\Omega)$  – преобразование Фурье.

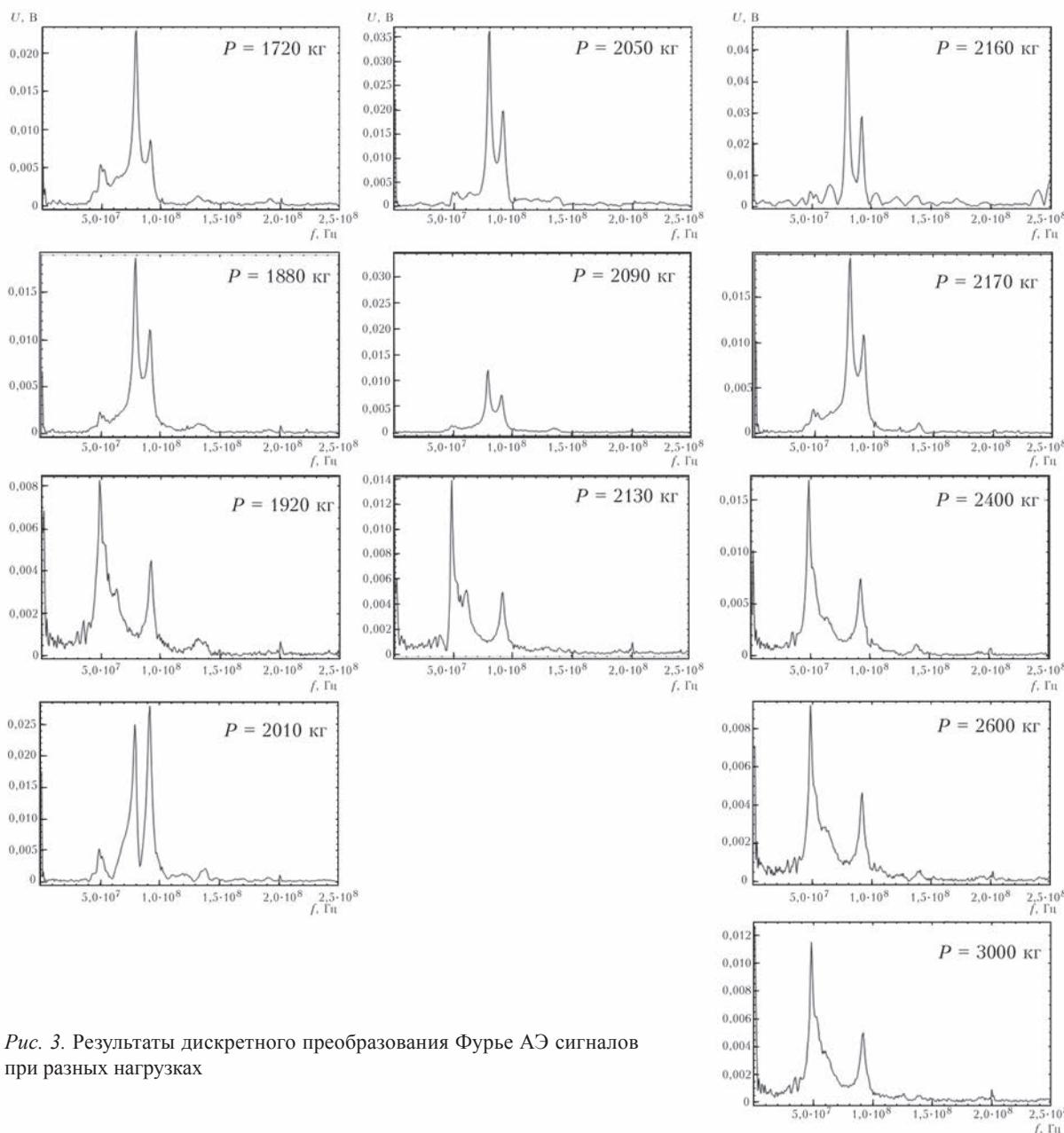


Рис. 3. Результаты дискретного преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках

Вместе с тем анализ сигналов АЭ с помощью преобразования Фурье имеет ряд недостатков, связанных с тем, что отдельные особенности сигналов вызывают незначительные изменения частотного образа и сглаживаются по всей частотной оси.

Частично проблема спектрального анализа и синтеза сигналов АЭ может быть решена с помощью оконного преобразования Фурье:

$$F(\Omega, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\omega(t-b)e^{-j\Omega t} dt$$

При этом используется операция умножения сигнала на окно  $(t-b)$ , которая представляет собой локальную функцию, перемещающуюся вдоль временной оси. Тогда преобразование становится зависимым от времени и получаем частотно-временное описание сигнала. Результаты такого преобразования Фурье представлены на рис. 3.

Анализ частотной зависимости АЭ сигнала позволил оценить смещение характерных пиков АЭ сигналов в зависимости от приложенной нагрузки.

Информативным параметром АЭ является общее число импульсов, или суммарный счет актов АЭ (total emission)  $N(\text{имп})$ , определяемый как число превышений импульсов АЭ над уровнем дискриминации за время наблюдения.

При обработке экспериментальных данных использовалась система компьютерной математики Mathematica 9.0 и алгоритмы работы с массивами числовых данных: нахождение максимальных (минимальных) элементов массива, сортировка данных массива по признаку, объединение данных, сплайновая интерполяция.

Распределение амплитуд акустических сигналов при увеличении приложенной нагрузки представлено на рис. 4.

Обработка сигналов АЭ от двух датчиков позволила оценить уровень дискриминации, выше которого фиксируется характер распределения амплитуд АЭ при увеличении приложенной нагрузки, который для первого датчика АЭ составил

0,01 В, для второго – 0,08 В. Последующее вычисление количества превышений точек  $N$  над уровнями дискриминации представлено на рис. 5.

В результатах измерений от обоих датчиков прослеживается общий характер изменения АЭ импульсов, что свидетельствует об идентичности используемых акустических датчиков для исследования акустико-эмиссионных эффектов стали СтЗсп.

Динамической характеристикой АЭ является скорость счета или интенсивность АЭ, определяемая делением общего числа импульсов  $N$  на наблюдаемый интервал времени, который для осциллографа RIGOL DS1052E Digital oscilloscope, являющегося частью АЭ системы, составлял 2 мкс.

Результаты определения этой величины для обоих датчиков представлены на рис. 6.

Максимальная скорость счета АЭ импульсов наблюдается вблизи нагрузки 2160 кг, что соответствует деформации образца 1,6 % для обоих датчиков и переходу к участку деформационного упрочнения для данной марки стали. Разница в численных значениях амплитуд обоих датчиков служит основанием для приоритетного использования информации, снятой с первого датчика.

Поскольку фиксируемое усилие на диаграмме растяжения относится непосредственно к измеряемому образцу, то для придания общности результатов исследуемому материалу, следует выражать его через значение механических напряжений, полученных делением прилагаемых усилий на площадь сечения образца.

Совмещенные кривые зависимостей напряжений и скорости счета АЭ от деформации приведены на рис. 7, где вертикальные пунктирные линии показывают границы зон уменьшения плотности АЭ сигнала при повышении нагрузки.

Как следует из рис. 7, при повторном нагружении образцов максимум скорости счета АЭ приходится на участок диаграммы нагружения, соответствующий завершению площадки текучести,

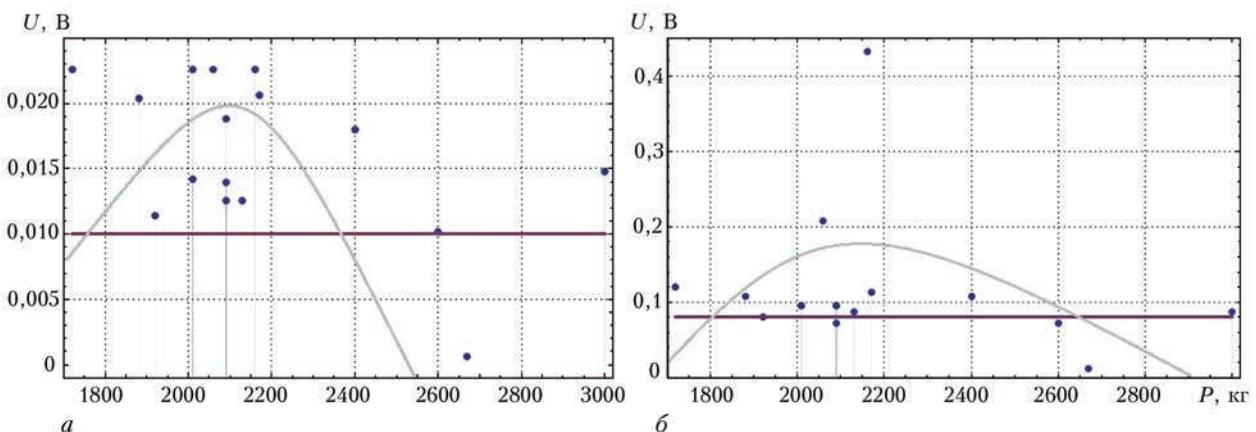


Рис. 4. Распределение амплитуд акустических сигналов при увеличении приложенной нагрузки: а – первый датчик ( $U = 0,01$  В); б – второй датчик ( $U = 0,08$  В)

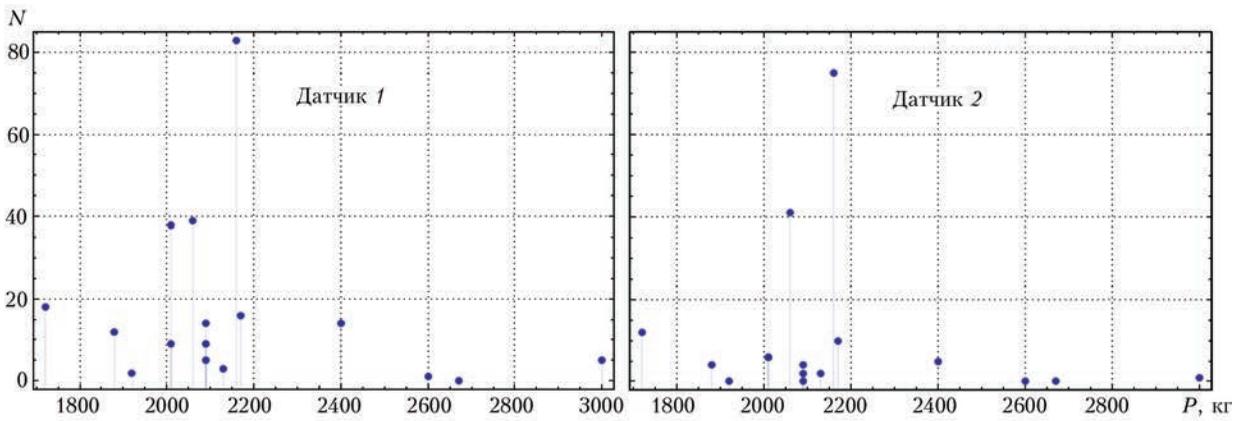


Рис. 5. Общее количество превышений амплитуд АЭ над уровнями дискриминации

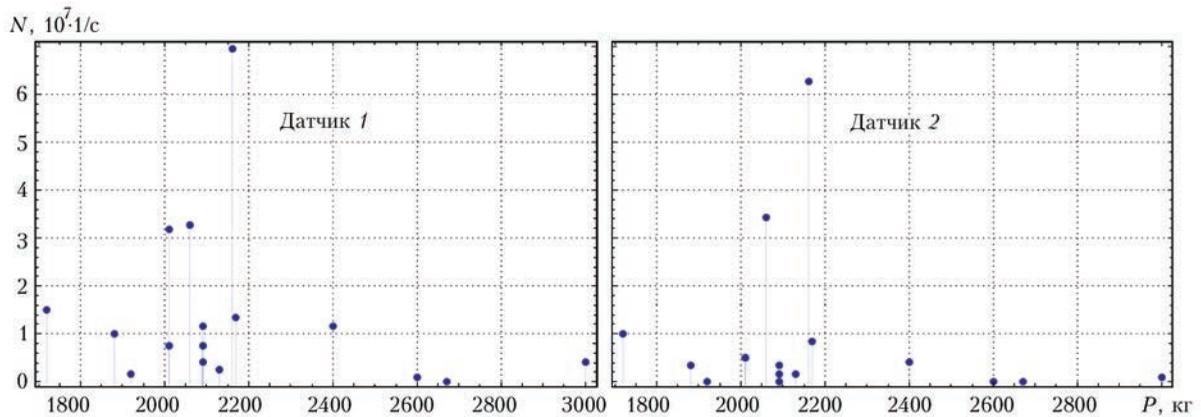


Рис. 6. Интенсивность сигналов акустической эмиссии при разных нагрузках

причем отмеченная закономерность характерна для информации, полученной от обоих датчиков.

Экспериментальные значения основных характеристик АЭ сигналов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп представлены в табл. 2.

Плотность распределения сигналов АЭ определялась путем вычисления отношения количества пересечений нулевого уровня формы АЭ сигнала ко времени его существования.

Возможный механизм возникновения сигнала АЭ твердых тел выглядит следующим образом. Для возникновения эффекта АЭ необходимо высвобождение энергии. Прорыв скоплений дислокаций освобождает упругую энергию их взаимодействия и вызывает излучение упругих волн. Источниками АЭ при деформации материалов являются процессы аннигиляции дислокаций при их выходе на свободную поверхность образца. При одновременном движении дислокаций, вызванных повторным нагружением образца, волны напряжений, накладываясь друг на друга, создают непрерывную акустическую эмиссию.

При использовании явления АЭ для неразрушающего контроля необходимо установить набор параметров АЭ, несущих

информацию о различных сторонах контролируемого процесса и выбрать из них наиболее оптимальные. Результаты исследования представлены в табл.3.

Исследования АЭ при нагружении материалов, могут быть полезными при изучении свойств полимерных композитных материалов. В них скорость распространения ультразвуковых колебаний зависит не только от плотности и упругих свойств, но и от вязкости, и степени структурной неоднородности материалов. Эти особенности являются причиной дисперсии, интерференции и рассеяния акустических волн в результате их отражения и преломления

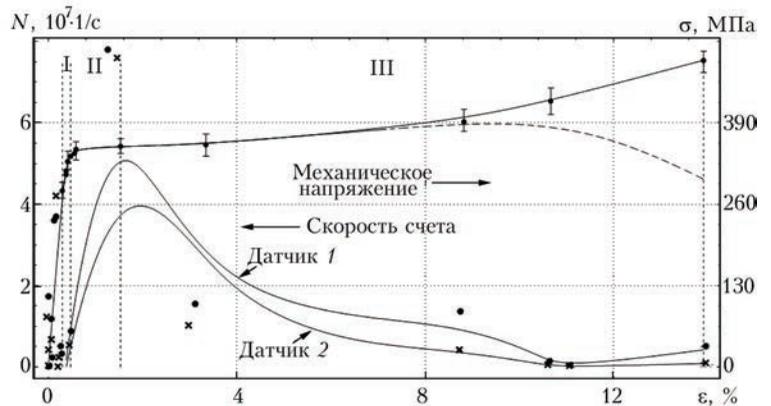


Рис. 7. Зависимости напряжений и интенсивности АЭ от деформации образца

Таблица 2. Экспериментальные значения основных характеристик АЭ сигналов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп

Участки деформационного упрочнения	Нагрузка $P$ , кг	Характеристики АЭ эффектов				Механическое напряжение $\sigma$ , МПа
		Пиковые амплитуды $U$ , В	Плотность сигналов $N'$ , $10^7$ 1/с	Общее число импульсов $N$ , имп	Интенсивность сигнала $N$ , $10^7$ имп/с	
I	1720	0,0226	4,69	18	1,507	281,1
	1880	0,0204	4,02	12	1,005	307,3
	1920	0,0114	1,93	2	0,167	313,8
	2010	0,0142	1,59	9	0,753	328,5
II	2050	0,0226	5,53	39	3,266	335,1
	2090	0,0126	4,10	5	0,418	341,6
	2130	0,0126	3,27	3	0,251	348,1
III	2160	0,0226	6,53	83	6,951	353,0
	2170	0,0206	4,44	16	1,340	354,7
	2400	0,0180	2,93	14	1,172	392,3
	2600	0,0102	2,51	5	0,418	424,9
	3000	0,0148	2,17	1	0,083	490,3

Таблица 3. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп

Параметры АЭ сигнала	Критерии	Операции	Характер проявления	Пригодность
Пиковая амплитуда	Абсолютная величина	Сравнение с предшественником	Стохастические изменения	–
Амплитудно-временное распределение	Плотность распределения амплитуд во времени	Группировка по участкам роста плотности амплитуд	Наращивание плотности амплитуд внутри групп	+ – качественный характер
Амплитудно-частотное распределение	Частотный диапазон	Преобразование Фурье	Смещение характерных пиков	+ – нет зависимости от времени
Общее число импульсов $N$ (имп)	Суммарный результат	Анализ отклонений	Превышение над уровнем дискриминации	+
Интенсивность (скорость счета) $N$ (имп/сек)	Динамические оценки	Учет временных интервалов	Различные скорости изменений	+

на границах неоднородностей, которые стимулированы не только механическими нагрузками, но и такими воздействиями, как микроволновое ультразвуковое излучение, магнитная обработка [9].

Проведенные исследования могут служить модельным представлением изменения свойств и прогнозирования остаточного ресурса реальных промышленных конструкций, подвергающихся воздействию сложных нагрузок.

**Выводы**

1. Обнаружен и количественно подтвержден эффект существенного уменьшения плотности распределения сигналов АЭ при возрастании нагрузки на разных стадиях деформационного упрочнения материалов.

2. Установлено наличие трех участков деформационного упрочнения, регистрируемых с помощью метода АЭ: первый участок при нагрузках 1720, 1780, 1920 и 2010 кг, соответствующих участку упругой деформации, второй при нагрузках, соответствующих области текучести – 2050, 2090, 2130 кг; третий при нагрузках, соответству-

ющих деформационному упрочнению – 2160, 2170, 2400, 2600 и 3000 кг. В зоне перехода от одного участка деформационного упрочнения к другому наблюдается четкое изменение характера АЭ.

3. Наблюдаемые закономерности изменения сигналов АЭ при переходе от одного участка деформационного упрочнения к другому, отражают различный вклад процессов деформации разрушения в формирование источников АЭ.

4. Использование инструментария АЭ дает возможность найти неизвестные ранее характеристики структуры материалов, проследить динамику их развития, устойчивость, целостность и обеспечить прогнозирование развития дефектов материала.

**Список литературы**

1. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева У. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
2. Скальський В. Р., Лясота І. М., Станкевич О. М. (2012) Акустико-емісійне діагностування втомного руйнування алюмінієвого сплаву 1201-Т. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 48, 5, 110–116.

3. Назарчук З. Т. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-технічний посібник.* Київ, Наукова думка.
4. Pollok A. (1989) Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook. Ninth Edition ASM International*, **17**, 278–294.
5. Болотин Ю. И., Дробот Ю. Б. (2003) *Акустическая эмиссия хрупких микроразрушений.* Москва, Машиностроение.
6. Lymarenko Y. A., Shamprovs kij A. D. (2003) Mathematical modeling of acoustic emission process. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 30–33.
7. Папилов И. И., Стоев П. И. (2014) Обнаружение и исследование акустоэмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле. *Доповіди Національної академії наук України*, **1**, сс. 81–89.
8. Marasanov V., Sharko A. (2016) Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. *International Frontier Science Letters. Switzerland*, **10**, 37–44.
9. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Бадишук В. І. (2004) Дослідження впливу ультрафіолетового випромінювання та магнітної природи наповнювачів на властивості епоксинаповнених матеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*, **3**, 101–104.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Kushnareva, U.S. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 9-13 [in Russian].
2. Skalsky, V.R., Lyasota, I.M., Stankevich, O.M. (2012) Acoustic emission diagnostics of fatigue fracture of aluminium alloy 1201-T. *Fiz.-Khimich. Mechanika Materialiv*, **48(5)**, 110-116 [in Ukrainian].
3. Nazarchuk, Z.T. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structure elements: Sci.-Techn. Handbook.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Pollok, A. (1989) Acoustic emission inspection. *Metals Handbook. 9th Ed. ASM International*, **17**, 278-294.
5. Bolotin, Yu.I., Drobot, Yu.B. (2003) *Acoustic emission of brittle microfractures: Monography.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Lymarenko, Y.A., Shamprovs kij, A.D. (2003) Mathematical modeling of acoustic emission process. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 30-33.
7. Papirov, I.I., Stoev, P.I. (2014) Detection and investigation of acoustic emission effects under plastic deformation of steels in magnetic field. *Dopovidi NANU*, **1**, 81-89 [in Russian].
8. Marasanov, V., Sharko, A. (2016) Mathematical models for interrelation of characteristics of the developing defects with parameters of acoustic emission signals. *Int. Fronter Sci. Letters. Switzerland*, **10**, 37-44.
9. Buketov, A.V., Stukhlyak, P.D., Badishchuk, V.I. (2004) Study of influence of ultraviolet radiation and magnetic

nature of fillers on properties of epoxy filled materials. *Voprosy Khimii i Khimich. Tekhnologii*, **3**, 101-104.

V. Л. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, А. О. ШАРКО<sup>2</sup>, С. А. СМЕТАНКІН<sup>1</sup>,  
Д. М. СТЕПАНЧИКОВ<sup>2</sup>, К. Ю. ЮРЕНІН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонська держ. морська акад. 73000, м. Херсон,  
пр-т Ушакова, 20, м E-mail:

<sup>2</sup>Херсонський нац. техн. ун-т. 73008, м. Херсон,  
Бериславське шосе, 24. E-mail:

ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ЕФЕКТІВ ПРИ  
ПОВТОРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ЗРАЗКІВ  
ІЗ СТАЛІ Ст3сп

Встановлено наявність трьох ділянок, де послідовно зменшується інтенсивність акустичної емісії при повторному одноосовому навантаженні, які відповідають зонам деформаційного зміцнення сталі Ст3сп. Виявлено ефект зменшення щільності сигналів акустичної емісії при зростанні навантаження. Дається пояснення цьому явищу, виходячи з уявлення енергії сигналів, що випромінюються. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: акустична емісія, ефекти, сталь, навантаження, сигнали, інформація, дислокації

DETECTION OF ACOUSTIC-EMISSION EFFECTS DURING  
RELOADING OF St3sp STEEL SPECIMENS

V. L. ALEKSEENKO<sup>1</sup>, A. A. SHARKO<sup>2</sup>, S. A. SMETANKIN<sup>1</sup>,  
D. M. STEPANCHIKOV<sup>2</sup>, K. Yu. YURENIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kherson State Marine Academy, 20 Ushakov ave., Kherson,  
73000, E-mail:ksma@ksma.ks.ua

<sup>2</sup> Kherson National Technical University, 24 Berislavskoe shosse  
str., Kherson, 73008. E-mail:kntu@kntu.net.ua

Presence of three zones with successively reducing intensity of acoustic emission at repeated single-axis loading was determined, which correspond to the strain hardening zones of St3sp (killed) steel. An effect of decrease of acoustic emission signal density at loading rise was found. An explanation of this effect is given following from the presentation of energy of signals being emitted. 9 Ref., 3 Tabl., 7 Fi

Keywords: acoustic emission, effects, steel, loading, signals, information, dislocations

Поступила в редакцію  
31.10.2017

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

В. В. Кныш, С. А. Соловей. **Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями.** – Киев, КПИ им. Игоря Сикорского, 2017. – 315 с. Твердый переплет, 150×225 мм.

Монография посвящена проблеме продления срока службы элементов сварных металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, на разных стадиях их поврежденности: от накопления усталостных повреждений до развития магистральных трещин. Исследовано влияние высокочастотной механической проковки на повышение циклической долговечности сварных соединений как на стадии изготовления, так и после длительной эксплуатации. Предложены подходы к расчетному определению кинетики усталостных трещин в полях остаточных напряжений растяжения и сжатия. Рассмотрены конструктивные и технологические способы торможения усталостных трещин.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями в области усталости элементов сварных металлоконструкций длительной эксплуатации, расчетными методами определения и продления их ресурса. Может быть полезна студентам и аспирантам высших учебных заведений технических специальностей.

