

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**В.Л. Алексенко<sup>1</sup>, А.А. Шарко<sup>2</sup>, А.В. Шарко<sup>1</sup>, Д.М. Степанчиков<sup>2</sup>, К.Ю. Юренин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Херсонская государственная морская академия. 73000, г. Херсон, просп. Ушакова, 20. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

<sup>2</sup>Херсонский национальный технический университет. 73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24. E-mail: kntu@kntu.net.ua

Приводятся результаты исследования и методика обработки спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии при испытаниях образцов из стали СтЗсп на четырехточечный изгиб с целью оценки возможности их использования для решения задач диагностики. Выявлены существенные различия в изменениях спектральных характеристик и моментах возникновения сигналов акустической эмиссии при различных стадиях нагружения образцов. Обнаружен упреждающий эффект фиксации дискретных изменений структуры материала методом акустической эмиссии при изгибе. Библиогр. 11, табл. 2, рис. 5.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, сталь, четырехточечный изгиб, деформация

Структурное состояние материала при прочих равных условиях может оказаться важным фактором, влияющим на его свойства и долговечность. Одним из методов наблюдения за изменениями внутренней структуры материала при его деформировании является метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и обработке волн напряжений, возникающих в результате формирования и разрушения структур материалов. Одним из наиболее востребованных направлений применения метода АЭ является проведение испытаний с целью диагностики структурной целостности промышленных объектов, позволяющее осуществлять непрерывный эксплуатационный контроль.

Прогнозирование структурных состояний материалов на основе установления связи между эволюцией дефектной структуры и кинетикой накопления повреждений, регистрируемых методом АЭ, на разных стадиях деформирования материалов представляет не только научную, но и техническую задачу.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что корреляцию информативных параметров АЭ с развитием дефектов определяют экспериментальным путем для каждого конкретного материала [1–6]. Наиболее сложным этапом в изучении и исследовании структурных особенностей механизмов деформирования методом акустической эмиссии является регистрация и интерпретация АЭ сигналов [7–9]. Хотя к настоящему времени имеется обширная информация об исследовании кинетических особенностей и закономерностях деформации конструкционных материалов, но глубокое понима-

ние природы, происходящих при этом процессов, все еще не достигнуто.

Целью работы является изучение характеристик акустико-эмиссионных сигналов при двух видах деформации структуры – простом сжатии и сжатии с изгибом.

Для эксперимента была выбрана одна из распространенных конструкционных углеродистых сталей СтЗсп. Образцы для испытаний на четырехточечный изгиб вырезались из листового проката размером 300×20×4 мм. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования по данным АЭ осуществлялась при деформации образцов на четырехточечный изгиб на установке, сконструированной на базе машины для испытания пружин МИП-10, работающей по принципу заданного деформирования. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

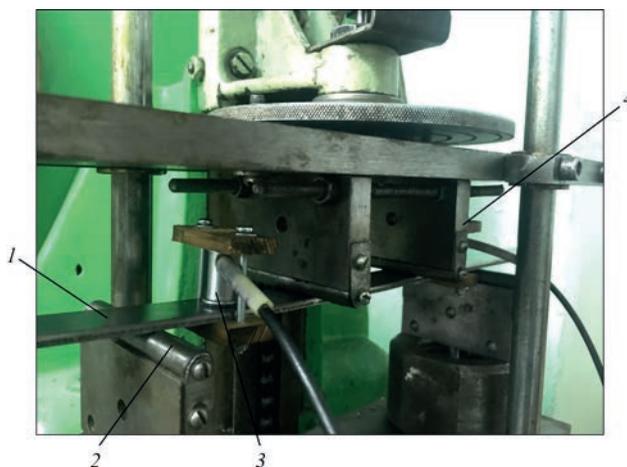


Рис. 1. Экспериментальная реализация четырехточечного изгиба на базе установки МИП-10: 1 – исследуемый образец; 2 – опора; 3 – датчик АЭ; 4 – индентор нагружающего устройства

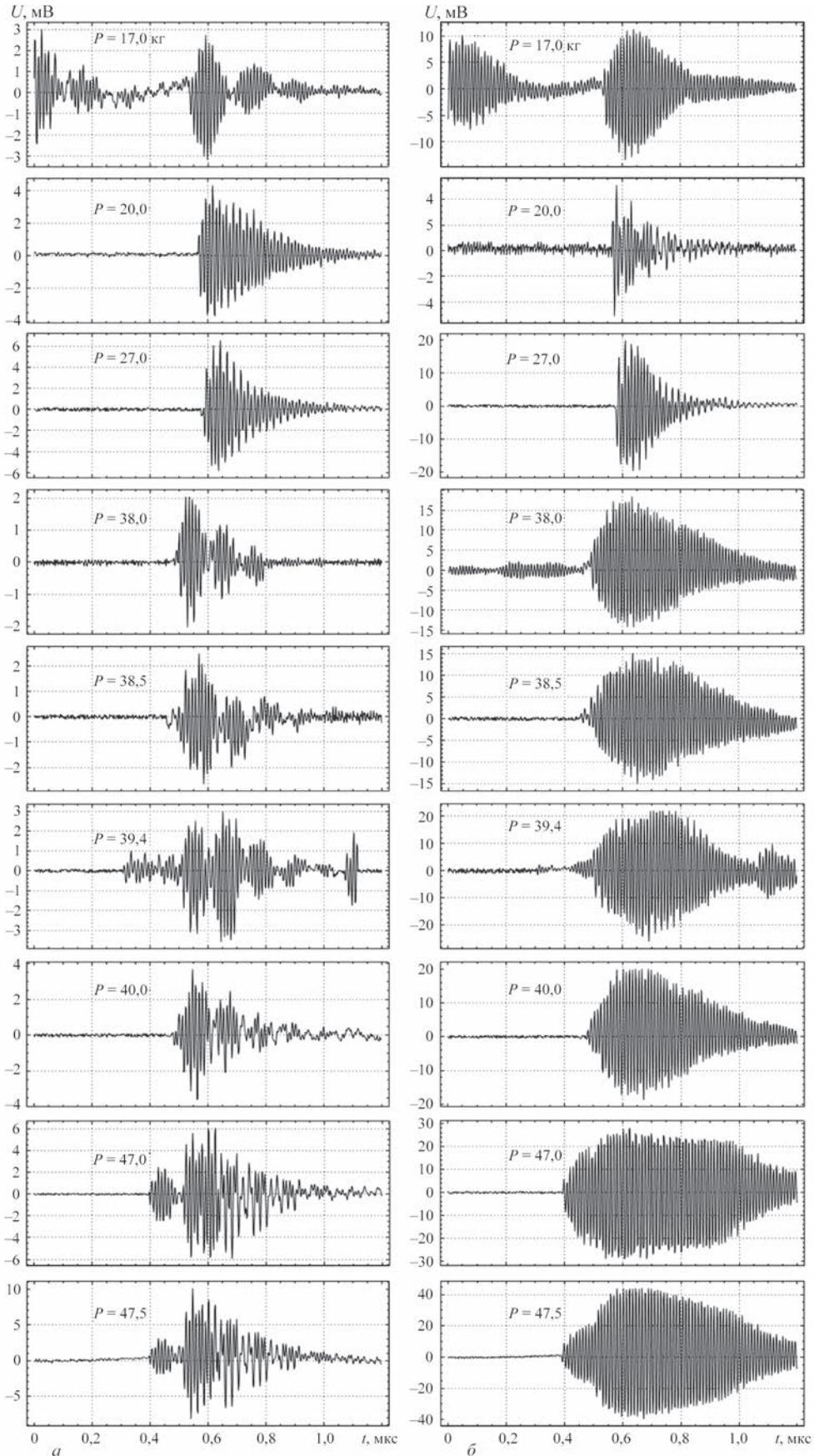


Рис. 2. Сигналы АЭ при разных нагрузках:  $a$  – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц;  $b$  – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Конструктивно установка содержит два основных механизма: механизм деформирования и механизм силоизмерителя. Механизм деформирования включает: двигатель, червячный редуктор, нагружающий винт, каретку с верхней тарелью и винтом отключения компенсационной пружины. На тарели закреплен нониус. Механизм силоизмерителя включает: нижнюю тарель и передаточный механизм рычажного типа, расположенный внутри корпуса. Для реализации четырехточечного изгиба в установке дополнительно были установ-

лены пуансоны в виде индентора нагружающего устройства и опоры. Опоры закреплялись неподвижно, чтобы позволять точно центрировать образец. При этом продольная ось образца располагалась параллельно боковой поверхности траверсы, а центр симметрии образца совпадал с осью приложенной нагрузки. Крепление датчиков АЭ к образцу осуществлялось с помощью струбцин. Испытания проводились с регистрацией нагрузки и соответствующего прогиба образца с одновременной фиксацией моментов возникновения сигналов АЭ.

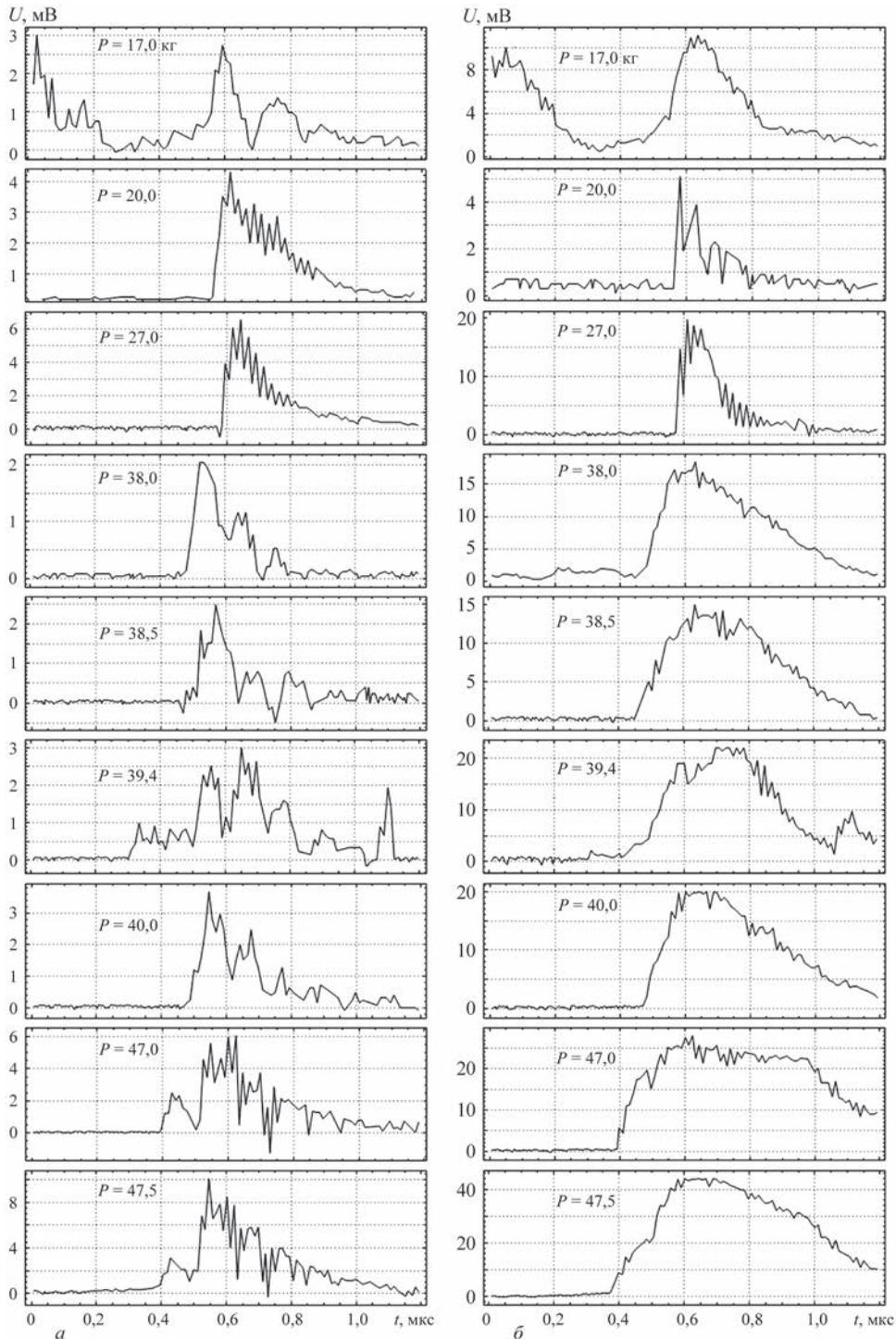


Рис. 3. Огибающая сигналов АЭ при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

В качестве контактного материала между преобразователями АЭ и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные датчики к АЭ прибору АФ15 с полосой пропускания 0,2...0,5 и 0,2...2,0 МГц. Используемая в эксперименте информационно-измерительная система обеспечивала индикацию, регистрацию и предобработку сигналов АЭ с дальнейшим ее сохранением в памяти компьютера с помощью запоминающего осциллографа (RIGOL DS1052E Digital oscilloscope). Результаты АЭ измерений для обоих датчиков с одновременной фиксацией нагрузки и прогиба образца представлены на рис. 2.

Для датчика с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц обнаружен монотонный рост амплитуд АЭ сигналов в пределах участков деформационного упрочнения [10]: зона упругой деформации соответствующая значениям нагрузок  $P = 17; 20; 27$  кг, зона пластической деформации, соответствующая нагрузкам 38; 38,5; 39,4; 40 кг и зона достижения предела текучести  $P = 47; 47,5$  кг. Для датчика с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц в зонах упругой и пластической деформаций наблюдаются некоторые колебания максимальных амплитуд сигналов АЭ, хотя общая тенденция их возрастания с увеличением нагрузки также прослеживается.

В характере представленных АЭ сигналов можно выделить высокочастотную составляющую, связанную с осцилляциями, т. е. заполнением электрическим сигналом и низкочастотную, харак-

теризующую огибающую сигнала АЭ. Поскольку огибающая АЭ сигнала непосредственно связана с его энергетическим спектром, результаты экспериментальных исследований моментов возникновения сигналов АЭ при различных нагрузках представлены в виде такой информативной характеристики, как огибающая сигнала АЭ (рис. 3), содержащая характерные для данного сигнала локальные экстремумы. Как правило, под огибающей сигнала АЭ понимается его верхняя часть, которая строится по локальным максимумам. В массив значений огибающей сигнала АЭ записываются последовательно значения всех точек, для которых выполняется условие локального максимума в окрестности трех последовательных точек  $U_{i-1}, U_i, U_{i+1}$ , выбранных из массива значений  $U_i = U(t_i)$ :

$$(U_{i-1} < U_i) \wedge (U_i > U_{i+1}),$$

где  $U_i$  – электрическое напряжение, определяемое дискретными показаниями осциллографа. Размерность этого массива будет меньше размерности массива значений сигнала  $U_i$ , так как в массив значений огибающей записываются только локальные максимумы. Для формирования массива значений огибающей во всех равноотстоящих точках отсчета времени  $t_i$  используется линейная интерполяция. При линейной интерполяции огибающей между двумя соседними максимумами  $U_1 = U(t_1)$  и  $U_2 = U(t_2)$  используется формула:

$$U(t) = U_1 + \frac{(U_2 - U_1)(t - t_1)}{t_2 - t_1},$$

Таблица 1. Зоны возникновения АЭ сигналов и экспериментальные значения основных характеристик при четырехточечном изгибе образцов из стали СтЗсп

Зоны возникновения АЭ сигналов	Механические характеристики			Характеристики АЭ эффектов*)		
	Нагрузка $P$ , кг	Прогиб $\Delta l$ , мм	Напряжение $\sigma$ , МПа	Пиковые амплитуды $U_{max}$ , $10^{-3}$ В	Площадь под огибающей $S$ , $10^{-10}$ В·с	Плотность сигналов $N$ , $10^8$ с $^{-1}$
I	17	6,511	93,80	3,18	3,09	1,39
				13,40	48,86	1,68
	20	6,815	110,36	4,32	5,06	1,02
				5,10	9,45	2,00
	27	8,011	148,99	6,56	6,03	1,37
				19,80	29,33	1,23
II	38	14,011	209,69	2,05	7,26	1,92
				18,40	69,85	1,72
	38,5	14,312	212,45	2,64	7,45	1,88
				15,00	56,90	1,24
	39,4	14,823	217,41	3,56	10,81	1,86
				26,00	91,34	1,68
40	15,418	218,72	3,68	8,99	1,54	
			20,05	81,38	1,31	
III	47	23,901	234,52	6,08	17,72	1,66
				28,92	157,09	2,08
	47,5	24,030	235,27	10,10	21,68	1,73
				44,00	237,34	1,59

\*) Для каждой нагрузки первая строка цифр – для датчика с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; вторая – для датчика с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц.

где  $U_1, U_2$  – значения огибающей в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно,  $t_1 < t < t_2$ .

Для вычисления площади под огибающей использован метод численного интегрирования – метод трапеций:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{U_i + U_{i+1}}{2} \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации;  $n$  – количество значений в массиве.

Для осциллографа RIGOL DS1052E Digital oscilloscope являющегося частью АЭ системы, шаг дискретизации равен  $0,02 \cdot 10^{-7}$  с. Количество значений в массиве равно 600.

Также определены пиковые амплитуды  $U_{max}$  и плотности АЭ сигналов  $N$ . Пиковые амплитуды соответствуют абсолютному максимуму сигнала АЭ. Плотность сигнала АЭ определялась путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на время наблюдения сигнала. Пороговый уровень принимался равным

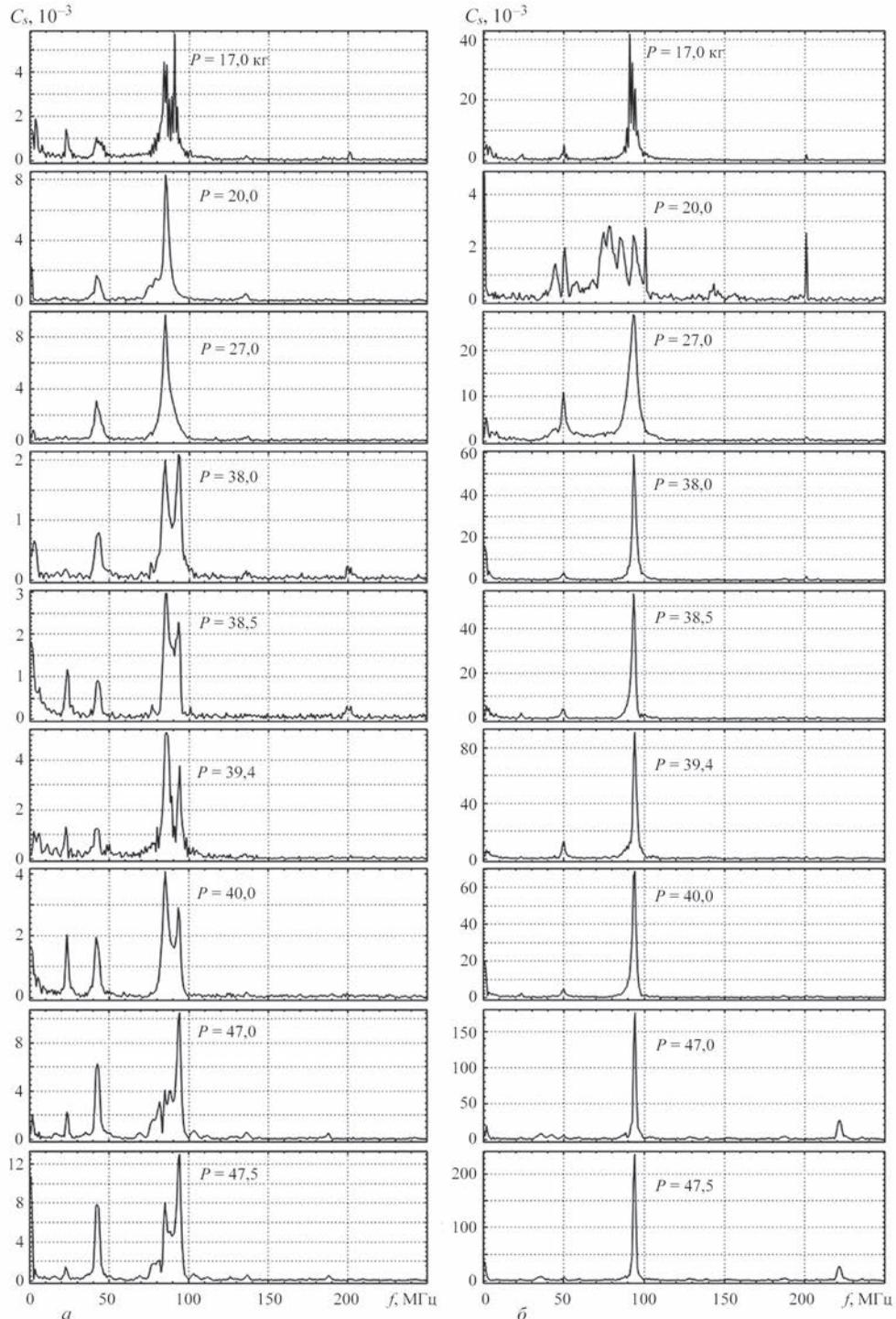


Рис. 4. Преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

$0,05U_{max}$  для каждого сигнала. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Обнаружено наличие трех зон возникновения АЭ сигналов, первая из которых соответствует линейному участку диаграммы, где выполняется закон Гука, вторая группа – отклонению от линейной зависимости, наступлению предела пропорциональности и третья – достижению предела текучести материала (табл. 1). Отмечен рост пиковых амплитуд и площадей под огибающей АЭ сигнала в пределах каждой зоны возникновения АЭ сигналов. Плотность АЭ сигналов преимущественно демонстрирует тенденцию к уменьшению в направлении от начала к концу каждой зоны. Между зонами отличия в значениях плотности АЭ сигналов незначительные.

Спектральные методики обработки сигналов АЭ с помощью Фурье преобразований позволяют охарактеризовать сигнал одновременно в амплитудно-временном и амплитудно-частотном взаимно обратных пространствах. Когда исходная функция является функцией времени и представляет физический сигнал, преобразование Фурье имеет стандартную интерпретацию как спектр сигнала. Абсолютная величина получающейся в результате комплексной функции представляет амплитуды соответствующих частот (рис. 4).

Анализ рис. 4 показал явное увеличение амплитуд преобразования Фурье с ростом нагрузки на образец внутри участков деформационного упрочнения и изменение очертания сигналов, характеризующих их гармонические составляющие. Следует отметить что, несмотря на общий характер изменения параметров АЭ сигналов для обоих датчиков, масштаб оси ординат отличается, что свидетельствует о большей чувствительности второго датчика, верхняя граница частотного диапазона которого лежит в области более высоких частот. Это положение находится в соответствии с тем, что амплитуда и частота отфильтрованного датчиком сигнала АЭ зависит от амплитудно-частотной характеристики датчика [11]. Если регистрация АЭ проводится преобразователем с узкой полосой пропускания, которой обладает датчик более высокой чувствительности, то частота АЭ сигнала определяется главным образом частотой преобразователя, что объясняет наличие пика амплитудных преобразований Фурье, соответствующих основной частоте.

При использования явления АЭ для неразрушающего контроля необходимо установить набор параметров АЭ, несущих информацию о различных сторонах контролируемого процесса и выбрать из них наиболее оптимальные. Результаты такого исследования представлены в табл. 2.

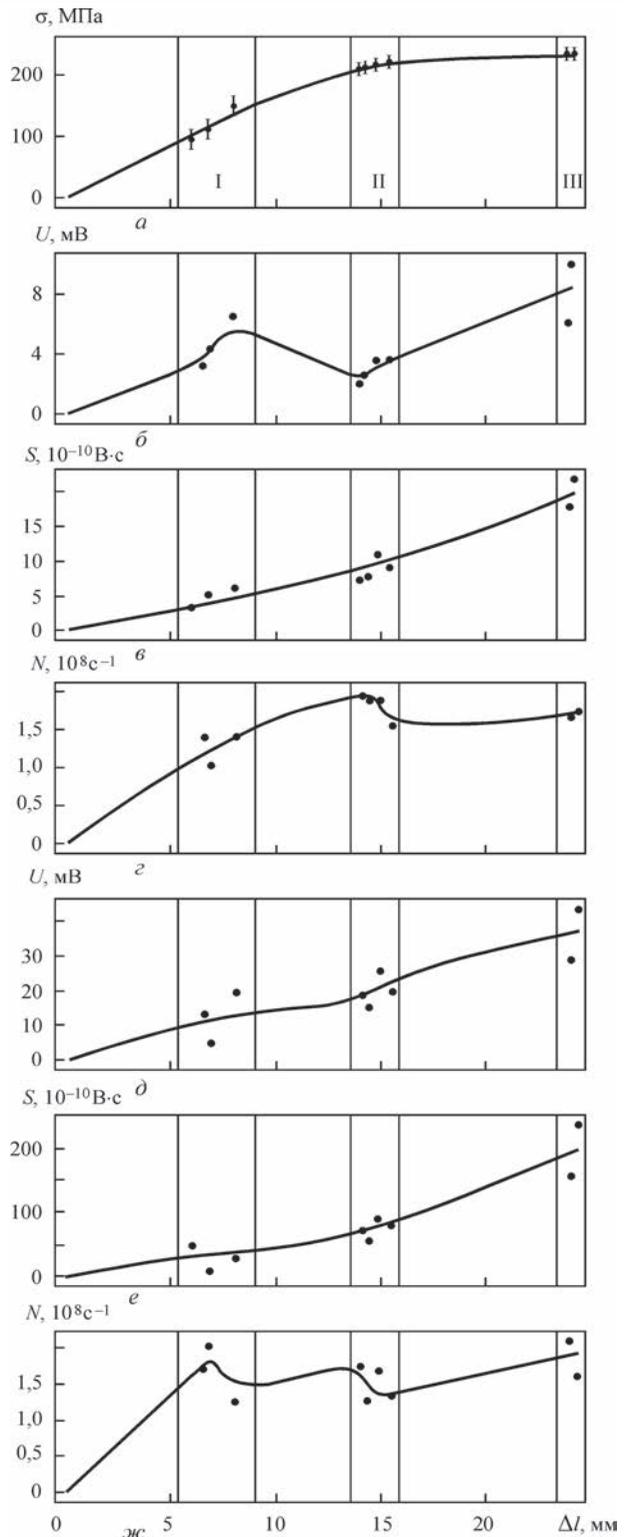


Рис. 5. Результаты комплексных измерений механического напряжения и моментов возникновения АЭ сигналов (а), пиковых амплитуд (б, д), площадей под огибающей АЭ сигналов (в, е) и плотности АЭ сигналов (г, ж); б-г – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; д-ж – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Для получения общих выводов из представленной информации результаты измерений отображены в виде зависимостей механического напряжения от прогиба  $\sigma = f(\Delta l)$

Таблица 2. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию при четырехточечном изгибе образцов из стали СтЗсп

Параметры АЭ сигнала	Критерии	Операции	Характер проявления	Пригодность
Пиковая амплитуда	Абсолютная величина	Сравнение с предшественником	Рост на характерных участках деформационного упрочнения	+
Амплитудно-временное распределение	Плотность распределения амплитуд во времени	Визуальное сопровождение	Изменение характера сигнала	± Неоднозначность результатов
Амплитудно-частотное распределение	Частотный диапазон	Преобразование Фурье	Изменение частотного образа сигнала	± Нечеткость зависимости от нагрузки
Энергетический спектр	Форма огибающей АЭ сигнала	Линейная интерполяция	Осцилляции локальных экстремумов	+
Плотность сигналов	Анализ отклонений	Сравнение с предшественником	Заполняемость огибающей энергетического спектра	± Качественные оценки

(рис. 5, а) и основных рассмотренных характеристик АЭ сигналов – пиковых амплитуд, площади под огибающей и плотности АЭ сигналов – от прогиба (рис. 5, б–ж), на которых точками обозначены моменты возникновения АЭ сигналов.

Сравнение диапазонов моментов возникновения сигналов АЭ с табличными значениями деформационных характеристик [10] показало, что фиксация деформационных переходов методами АЭ наступает раньше, чем это следует из механических испытаний.

Завершение зоны упругой деформации при четырехточечном изгибе, характеризуемое значением 150 МПа, по данным АЭ измерений приходится на значение 148,99 МПа, наступление предела пропорциональности  $\sigma = 220$  МПа по данным АЭ измерений происходит при значениях 218,72 МПа, достижение предела текучести равного 240 МПа по данным АЭ измерений приходится на значение  $\sigma = 235,27$  МПа. Тем самым показано, что метод АЭ позволяет зафиксировать наступление характерных точек деформационного процесса ранее, чем это следует из механических испытаний, что может быть использовано при диагностике и прогнозировании эксплуатационных свойств материалов.

### Выводы

В процессе возрастающего силового воздействия с повышением внутренних напряжений происходит локальная динамическая перестройка материала, сопровождающаяся АЭ.

Обнаружен дискретный характер возникновения акустической эмиссии при четырехточечном изгибе стали СтЗсп. В зоне перехода от участка деформирования при упругом сжатии к изгибу наблюдается четкое изменение параметров АЭ.

Наблюдаемые закономерности изменения сигналов АЭ отражают различный вклад процессов деформации в формирование источников АЭ. Установлено взаимно однозначное соответствие между спектральными характеристиками дискретной структуры материалов и характеристиками распространения АЭ сигналов.

Накопление повреждений в нагруженных материалах и их регистрация с помощью АЭ открывает широкие перспективы для неразрушающего контроля и диагностики материалов и изделий, дает возможность проследить динамику развития дефектов и обеспечить прогнозирование эксплуатационных характеристик материалов.

### Список литературы

1. Hase A., Wada M., Koga T., Michina H. (2014) The relationship between acoustic emission via piezoelectric actuator wave control. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **70**, 947–955.
2. Srickij V., Bogdevicius M., Junevicius R. (2016) Diagnostic features for the condition monitoring of hypoid gear utilizing the wavelet transform. *Applied Acoustics*, **106**, 51–62.
3. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. (2015) General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*, **92**, 1441.
4. Li C., Sanchez R.V., Zurita G. et al. (2016) Gearbox fault diagnosis based on deep random forest fusion of acoustic and vibratory signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **76/77**, 283–293.
5. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Юренин К.Ю. и др. (2017) Влияние степени деформации на параметры сигналов акустической эмиссии стали СтЗсп. *Науковi нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк, **60**, сс. 8–21.
6. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А. и др. (2017) Обнаружение акустико-эмиссионных эффектов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 25–31.
7. Марасанов В.В., Шарко А.А. (2017) Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии в сложных средах. *Журнал нано- та електронної фізики*, **2**, **4**, 04024-204024-5.
8. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. (2010) Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМг6. *ФТТ*, **52**, **11**, 2223–2231.

9. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. (2001) Акустическая эмиссия при деформации пористого железа. *ПЖТФ*, 27, 22, 14–18.
10. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. (1988) *Справочник по сопротивлению материала*. Киев, Наукова думка.
11. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2017) Влияние характеристик АЭ датчика на регистрируемые спектры волн. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 3–6.
5. Aleksenko, V.L., Sharko, A.A., Yurenin, K.Yu. et al. (2017) Influence of the degree of strain on AE signal parameters of St3sp steel. *Scientific notes. Interuniversity collection. Lutsk*, 60, 8-21 [in Russian].
6. Aleksenko, V.L., Sharko, A.A., Smetankin, S.A. et al. (2017) Detection of acoustic-emission effects during reloading of St3sp steel specimens. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 25–31 [in Russian].
7. Marasanov, V.V., Sharko, A.A. (2017) Energy spectrum of AE signals in complex media. *Zh. Nano- ta Elektronnoi Fizyky*, 2(4), 04024-204024-5 [in Russian].
8. Shibkov, A.A., Zolotov, A.E., Zheltov, M.A. (2010) Acoustic precursor of unstable plastic deformation of aluminium-magnesium alloy AMg6. *FTT*, 52(11), 2223–2231 [in Russian].
9. Polyakov, V.V., Egorov, A.V., Svistun, I.N. (2001) Acoustic emission at deformation of porous iron. *PZhTF*, 27(22), 14–18 [in Russian].
10. Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., Matveev, V.V. (1988) *Reference book on the strength of materials*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
11. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2017) Effect of characteristics of AE transducer on registered wave spectra. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 3-6 [in Russian].

References

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЗМІВ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ВИГІНІ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В.Л. Алексенко<sup>1</sup>, А.А. Шарко<sup>2</sup>, А.В. Шарко<sup>1</sup>, Д.М. Степанчиков<sup>2</sup>, К.Ю. Юренін<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія. 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

<sup>2</sup>Херсонський національний технічний університет. 73008, м. Херсон, Бериславське шосе, 24. E-mail: kntu@kntu.net.ua

Наведено результати дослідження і методика обробки спектральних характеристик сигналів акустичної емісії при випробуваннях зразків зі сталі Ст3сп на чотирьохточковий вигин з метою оцінки можливості їх використання для вирішення завдань діагностики. Виявлено суттєві відмінності в змінах спектральних характеристик і моменти виникнення сигналів акустичної емісії при різних стадіях навантаження зразків. Виявлено попереджуючий ефект фіксації дискретних змін структури матеріалу методом акустичної емісії при вигині. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: акустична емісія, сталь, чотирьохточковий вигин, деформація

IDENTIFICATION BY AE METHOD OF STRUCTURAL FEATURES OF DEFORMATION MECHANISMS AT BENDING

V.L. Aleksenko<sup>1</sup>, A.A. Sharko<sup>2</sup>, A.V. Sharko<sup>1</sup>, D.M. Stepanchikov<sup>2</sup>, K.Yu. Yurenin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kherson State Maritime Academy. 20 Ushakov Prosp., 73000, Kherson. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

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

The paper gives the results of investigation and procedure of processing the spectral characteristics of acoustic emission signals at testing samples from St3sp(killed) steel by four-point bending, in order to assess the possibility of their application to solve diagnostics problems. Essential differences have been found in the changes of spectral characteristics and moments of emergence of acoustic emission signals at different stages of sample loading. The preemptive effect of recording the discrete changes in the material structure by acoustic emission method at bending was established. 11 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: acoustic emission, steel, four-point bending, deformation

Поступила в редакцію  
10.02.2019

Новая книга

Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений / Под ред. проф. В.А. Троицкого. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2018. – 196 с.

Сборник содержит 11 ранее опубликованных статей сотрудников отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона, а также рекламные материалы различных методов неразрушающего контроля.

