

# ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ К ПРОЦЕССАМ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ

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 государственная морская академия. 73000, г. Херсон, просп. Ушакова, 20, г. E-mail: ksma@ksma.ks.ua

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

Приведены результаты исследования заисимости акустической эмиссии, возникающей при деформации образцов из эпоксидной смолы ЭД-20, с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса, отражающие эволюцию физических механизмов деформации при нагружении образцов. Установлены закономерности формирования акустико-эмиссионных и тензометрических диагностических сигналов в процессе деформации при четырехточечном изгибе. Регистрируемые сигналы обработаны в реальном масштабе времени. Акустическая эмиссия описывалась с помощью информативных параметров сигнала отражающих его энергетические и частотные особенности. Определены напряжения, при которых начинается разрушение материала, согласованные по уровню силового воздействия. Полученные результаты и закономерности могут быть использованы при акустико-эмиссионном исследовании стадийности пластической деформации в композиционных материалах на основе эпоксидной матрицы. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, тензометрия, эпоксидная матрица, четырехточечный изгиб

Актуальность темы. Резервы оптимизации конструктивных материалов состоят в модификации матричных материалов, среди которых одними из наиболее перспективных являются эпоксидные смолы разного назначения. Это делает композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы важными модельными объектами для изучения деформационных процессов механики сплошных сред. Эпоксидные смолы широко используются в промышленности в качестве связующих для формирования композитов, заливочных и защитных покрытий. Необходимость изучения процессов их упрочнения и структурообразования связана с тем, что они имеют высокую адгезионную прочность к металлам, минимальную усадку, малые остаточные напряжения, технологичность при нанесении их на сложные поверхности. Комплекс основных свойств эпоксидной смолы ЭД-20 исследован довольно подробно [1]. В то же время информация о деструктивных процессах, таких как моменты их возникновения, скорость и направление распространения дефектов в современной научной литературе отражены недостаточно.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что в процессе нагружения происходит изменение информативных характеристик акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов, отражающих физические механизмы деформации. Требования к характеристикам аппаратуры регистрации сигналов акустической эмиссии, а также к алгоритмам анализа сигналов определяются в зависи-

мости от характера исследуемого материала [2–4]. Большой практический интерес представляет анализ акустической эмиссии в процессах структурообразования полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы.

Достижение технической адекватности результатов неразрушающего контроля возможно при оптимальном использовании комбинаций различных методов испытаний. Благодаря тому, что акустическая эмиссия резко отличается по своим возможностям от традиционных методов неразрушающего контроля, на практике стараются совмещать АЭ с другими методами. В настоящей работе такое совмещение АЭ метода выполнено с тензометрическим контролем.

Совершенствование технической диагностики композиционных материалов направлено на создание автоматизированных систем и комплексов, позволяющих не только обнаруживать дефекты и устанавливать степень их опасности, но и оценивать напряженно-деформированное состояние материала под нагрузкой [4]. В этих условиях перспективно использование АЭ и тензометрического метода, так как их диагностические сигналы содержат информацию о динамике происходящих процессов. Основное преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля, всего объекта за один цикл нагружения.

Целью работы является исследование особенностей совместных измерений акустической эмиссии и

тензометрии при диагностике пластической деформации композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы при четырехточечном изгибе.

**Материалы и методы исследования.** Эпоксидные смолы представляют собой олигомеры, содержащие в молекуле не менее двух глицидиловых групп, способных под действием отвердителя образовывать сшитые полимеры. Наибольшее применение в промышленности нашли эпоксидо-диановые смолы, представляющие собой олигомерные продукты конденсации дифенилпропана с эпихлоргидрином.

Механизм отверждения эпоксидно-диановых смол заключается как во взаимодействии их функциональных групп с группами отвердителя, так и между собой, что приводит к удлинению молекул и образованию поперечных связей. В результате получают твердые прочные полимеры. Основное свойство эпоксидных смол – способность к полимеризации до твердого состояния в присутствии отвердителя. Отвержденные смолы характеризуются высокой адгезией к металлу, к стеклу и бетону.

В качестве матричного материала выбрана диановая смола ЭД-20 отверждаемая полиэтиленполиамином (ПЭПА). Химические формулы и пространственные структуры матрицы и отвердителя представлены на рис. 1, 2. Отвердитель эпоксидной смолы ЭД-20 ПЭПА не выделяет никаких вредных веществ. Образцы, предназначенные для измерений, имели размеры: 10×15×120 мм. Отверждение матричного материала происходило в течение 24 ч при комнатной температуре. Готовые образцы были подвергнуты тепловой обработке при температуре 80 °С в течение пяти часов.

Эпоксидные смолы после введения отвердителя преобразуются в сетчатые полимеры, которые содержат различные узлы сшивки: химические, физические и топологические. Химические узлы, определяемые связями химической природы, не растворимы в щелочах и кислотах; физические, образованные за счет электростатических, ван-дер-ваальсовских и водородных связей, вследствие низкой прочности физических

узлов сшивки могут переходить в вязкотекучее состояние. Топологические узлы сшивки, образованные механическим переплетением макромолекул, представляют собой узлы, продетые один сквозь другой как звенья одной цепи [1]. Они могут связывать между собой сетки разной химической природы.

Свойства эпоксидной смолы ЭД-20 холодного отверждения с отвердителем ПЭПА представлены ниже.

**Физико-механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20**

Теплостойкость, °С .....	95
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа .....	50
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа .....	113
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа .....	115
Ударная вязкость, кгс·см/см <sup>2</sup> .....	11
Относительное удлинение при разрыве, % .....	2,0
Диэлектрическая проницаемость .....	3,75
Тангенс угла диэлектрических потерь .....	0,1
Плотность при 25 °С, г/см <sup>3</sup> .....	1,2
Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup> .....	3000...4500
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup> .....	80

В полимерных композиционных материалах скорость распространения акустических волн зависит не только от плотности и упругих свойств, но также и от вязкости, пластичности и степени структурной неоднородности материалов.

Для оценки механических свойств материалов в хрупком или малопластичном состоянии используются испытания на изгиб. Особое значение такие испытания имеют для полимерных материалов, так как для них при практическом использовании преобладают изгибающие напряжения. Наибольшее распространение получили схемы трехточечного и четырехточечного изгиба [5, 6].

Результаты испытаний представляются в виде диаграмм  $P(\Delta L)$  или  $\sigma(\Delta L)$ , где  $P$  – изгибающая нагрузка;  $\sigma$  – механическое напряжение;  $\Delta L$  – стрела прогиба образца. При четырехточечном изгибе напряжение вычисляют по формуле:

$$\sigma = \frac{3Pl}{bh^2},$$

где  $l$  – длина образца между призмами;  $b$  – высота;  $h$  – ширина образца.

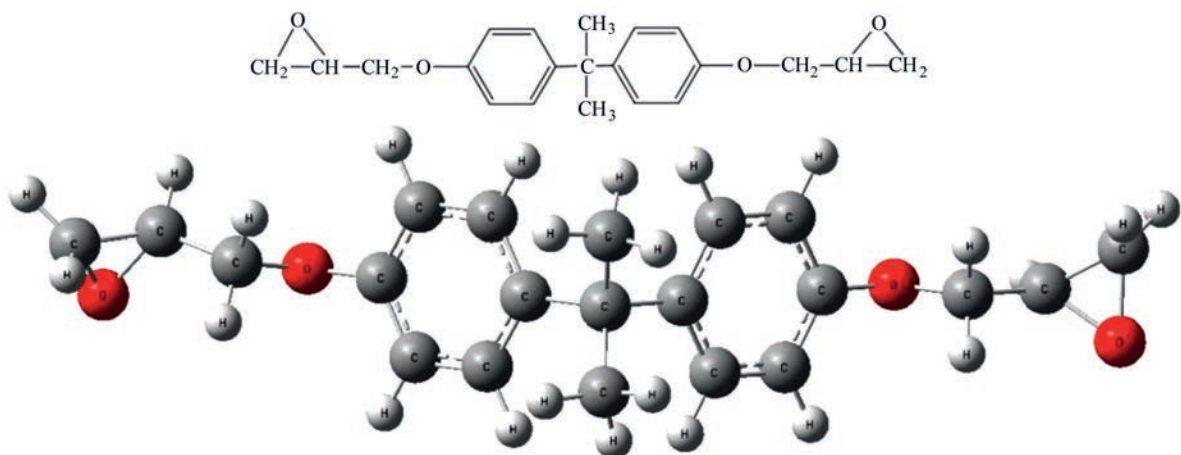


Рис. 1. Химическая формула и пространственная структура эпоксидной смолы ЭД-20

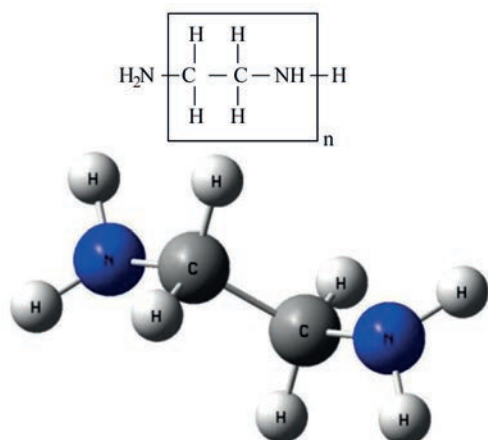


Рис. 2. Химическая формула и фрагмент пространственной структуры отвердителя ПЭПА

Последняя точка диаграммы соответствует разрушению образца. При такой схеме испытаний достигается однородное напряженное состояние по всей длине рабочей части образца, вследствие чего четырехточечная схема нагружения при определении модулей упругостей считается более надежной, чем трехточечная.

Согласно работам [5, 6] испытания на изгиб проводятся на установках, работающих по принципу заданного деформирования. Такие установки содержат два основных механизма: механизм деформирования и механизм силоизмерителя. Механизм деформирования состоит из двигателя, червячного редуктора, винта нагружения, верхней тарели и винта для отключения компенсационной пружины. На тарели закреплен нониус. Механизм силоизмерителя состоит из нижней тарели и передаточного механизма рычажного типа. Нагружение осуществляется вручную рукояткой механизма демпфирования или автоматически через двигатель или редуктор. Скорость нагружения определяется скоростью движения активной траверсы испытательной машины от момента запуска приводного устройства до момента разрушения образца и выбирается постоянной. Для измерения прогиба применяют датчики перемещения или датчики деформации, обеспечивающие измерение деформации с погрешностью не более 1%. Отсчет нагрузки производят по круговой шкале силоизмерителя.

Для повышения точности измерений при динамических испытаниях на изгиб установка дополнена системой синхронизации нагружения с регистрацией сигнала АЭ сопряженных с персональным компьютером. При акустических измерениях использовали широкополосные датчики к АЭ прибору АФ-15 с полосой пропускания 0,2...0,5 и 0,2...2,0 МГц. Конструктивно установка содержит систему управления нагружением, систему тензометрии, систему АЭ измерений. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.

Процесс испытаний осуществляется комбинировано как путем механических, так и АЭ изме-

рений. При этом процесс регистрации нагрузки, прогиба и измерения времени, а так же фиксации сигналов АЭ полностью автоматизированы посредством синхронизации обработки полученных данных с момента приведения в действие установки.

Таким образом, на компьютер одновременно поступает информация от параметров нагружающего устройства, прогиба и моментов возникновения сигналов АЭ в функции времени. При проведении испытаний информация о деформации и напряжении образца и амплитуд сигналов АЭ записывается в файл с заданной периодичностью.

**Результаты и обсуждение.** Акустическая эмиссия описывается с помощью информативных параметров сигнала, отражающих его энергетические и частотные особенности. Согласно принципу неопределенности, чем больше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размыта в частотной области. При изменении масштаба функции произведения плотности вероятности временных и частотных диапазонов остаются постоянными. Поэтому результаты измерений представляются в виде временных (огигающая АЭ сигнала) и частотных (Фурье-преобразование АЭ сигнала) зависимостей сигналов под нагрузкой. Соответствующие результаты АЭ измерений для обоих датчиков с одновременной фиксацией нагрузки и прогиба образца представлены на рис. 4, 5.

В характере представленных временных зависимостей АЭ сигналов можно выделить высокочастотную составляющую, связанную с осцилляциями внутри сигнала и низкочастотную характеризующую огибающую [7]. Огибающая АЭ сигнала содержит локальные экстремумы. Площадь  $S$  под огибающей АЭ сигнала может быть соотнесена с энергией АЭ процесса.

При обработке экспериментальных данных использовалась система компьютерной математики Mathematica 9.0 и алгоритмы работы с массивами

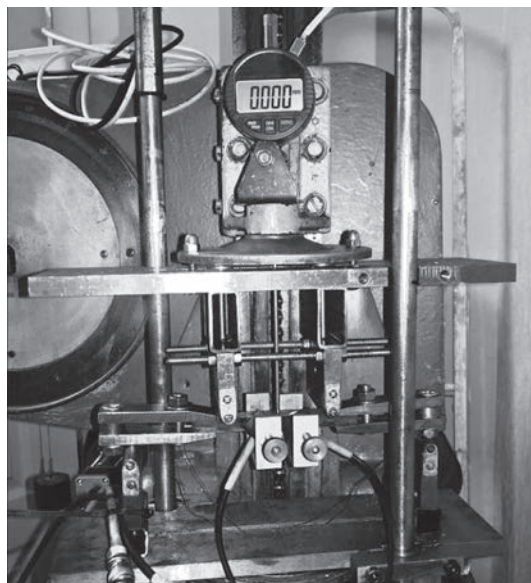


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

числовых данных: нахождение максимальных элементов массива, сортировка данных массива по признаку, объединение и интерполяция данных.

Также определены пиковые амплитуды  $U$  и плотности АЭ сигналов  $N$ . Пиковые амплитуды соответствуют абсолютному максимуму сигнала АЭ. Плотность АЭ сигнала определялась

путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на время наблюдения сигнала. Пороговый уровень принимался равным  $0,2U_{\max}$  для каждого сигнала, где  $U_{\max}$  – максимальная амплитуда АЭ сигнала для каждого датчика, равная 7,16 и 23,50 мВ, соответственно.

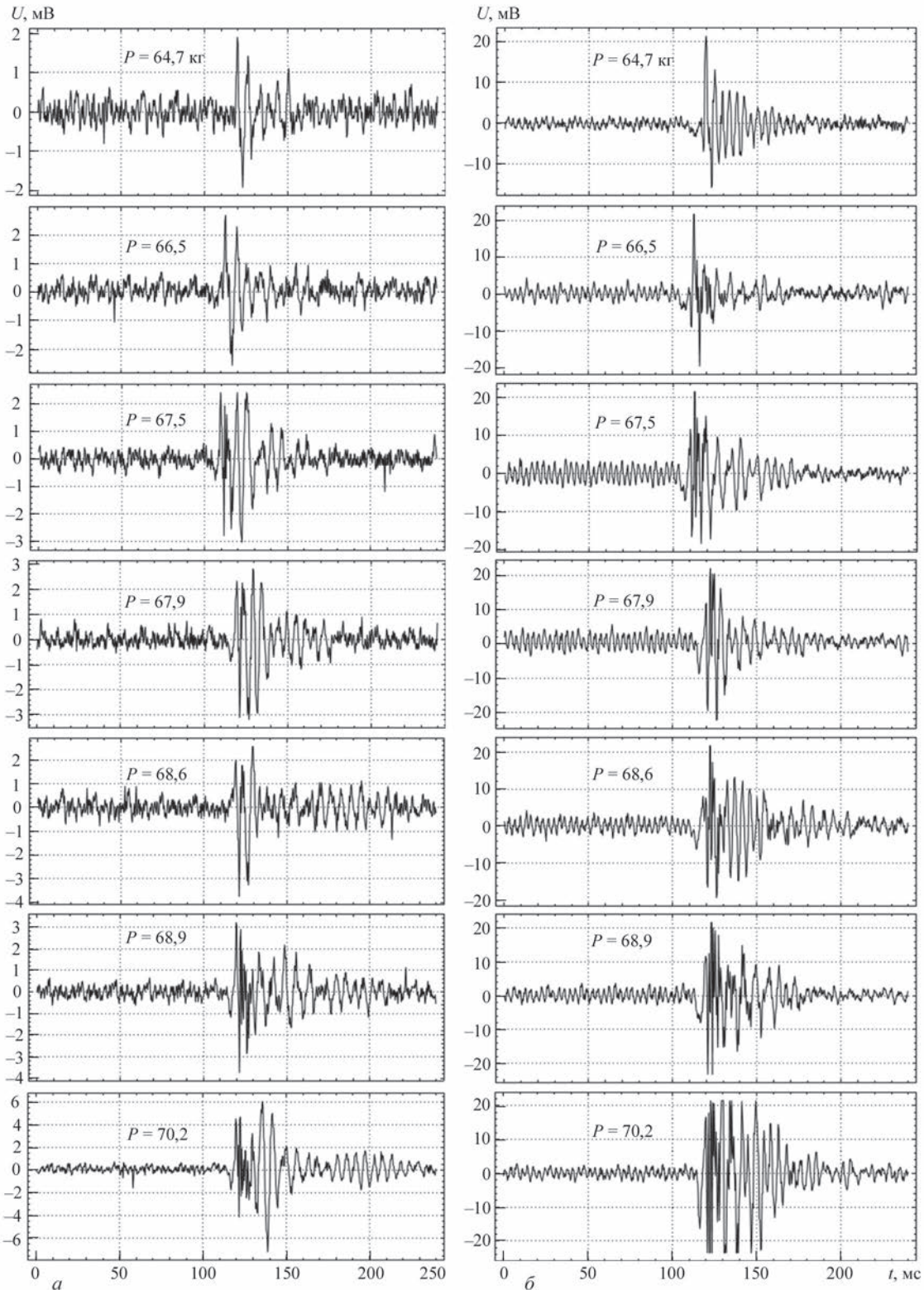


Рис. 4. Сигналы АЭ при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Аналогично для частотных зависимостей АЭ сигналов определены пиковые амплитуды  $C_s$  и плотности АЭ сигналов  $N_f$ . Пиковые амплитуды  $C_s$  соответствуют абсолютному максимуму частотного АЭ сигнала (преобразования Фурье). Плотность  $N_f$  частотного АЭ сигнала определялась путем подсчета количества пересечений порогового уровня сигнала, деленного на частотный

диапазон сигнала. Пороговый уровень принимался равным  $0,2C_{smax}$  для каждого сигнала, где  $C_{smax}$  – максимальная амплитуда преобразования Фурье АЭ сигнала для каждого датчика, равная 6,29 и 22,50, соответственно.

Выбор величины порогового уровня АЭ сигнала в пределах 20 % максимальных амплитуд при проведении комплексных измерений временных и

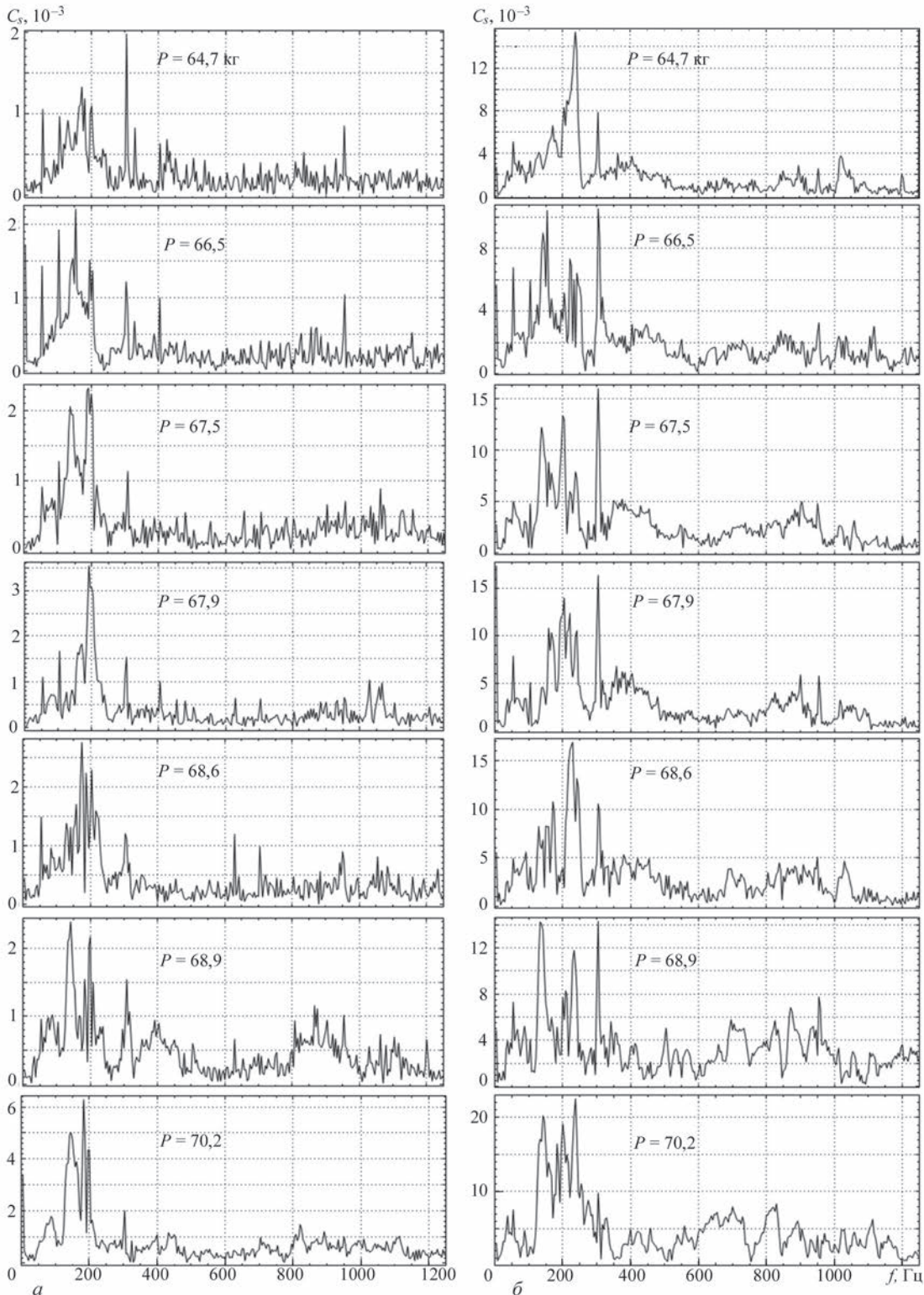


Рис. 5. Преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках: а – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; б – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

частотных характеристик обусловлен значительной зашумленностью АЭ сигналов.

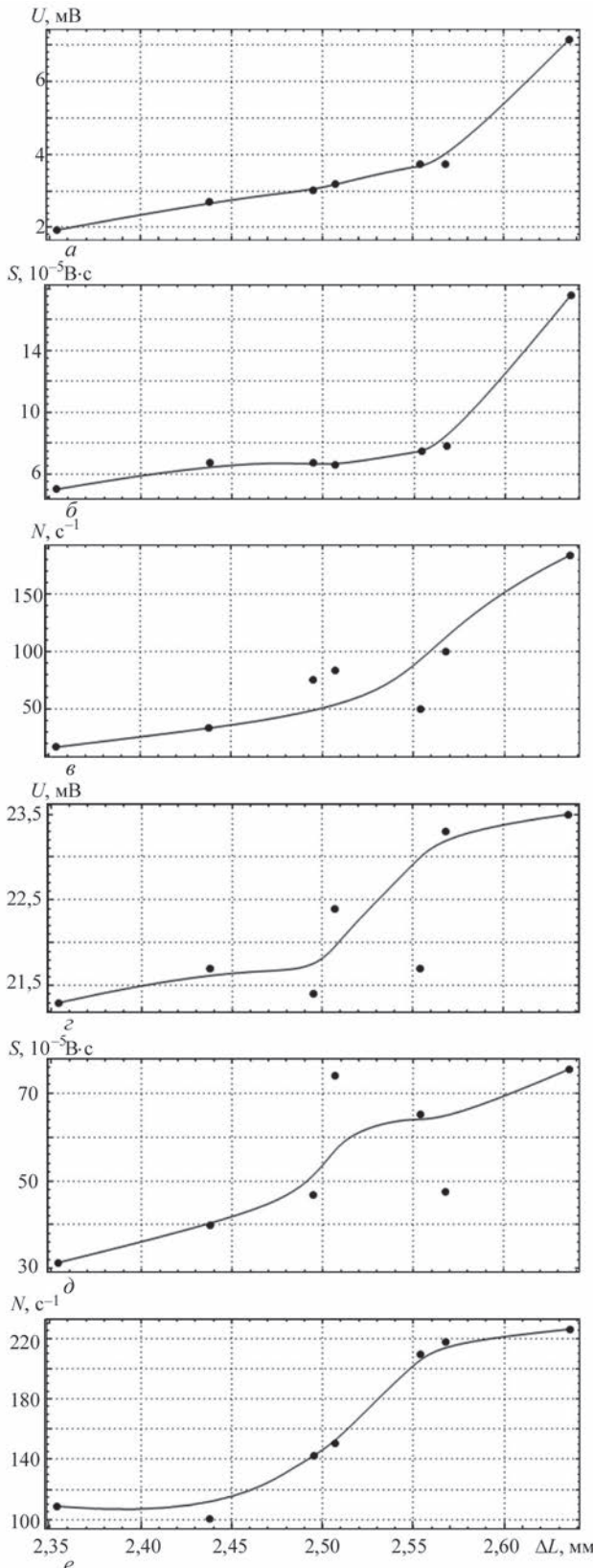


Рис. 6. Результаты комплексных измерений характеристик временных зависимостей АЭ сигналов: пиковые амплитуды (а, з), площади под огибающей (б, д) и плотности АЭ сигналов (в, е); а-в – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; з-е – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Результаты комплексных измерений характеристик временных и частотных зависимостей АЭ сигналов представлены на рис. 6, 7 и в табл. 1. Точки на рис. 6, 7 соответствуют моментам возникновения АЭ сигналов в исследуемом образце.

Все представленные на рис. 6, 7 характеристики имеют тенденцию к возрастанию с увеличением деформации. Следует, однако, отметить наличие определенных осцилляций значений характеристик, особенно проявляющихся для широкополосного (0,2...2,0 МГц) датчика АЭ. Тем не менее, можно однозначно констатировать увеличение энергии АЭ сигналов по мере приближения к зоне необратимых изменений и разрушения полимерной матрицы (рис. 8, зона III), что служит индикатором предкритического состояния исследуемого образца.

В связи со сложностью деформационных процессов в полимерных композиционных мате-

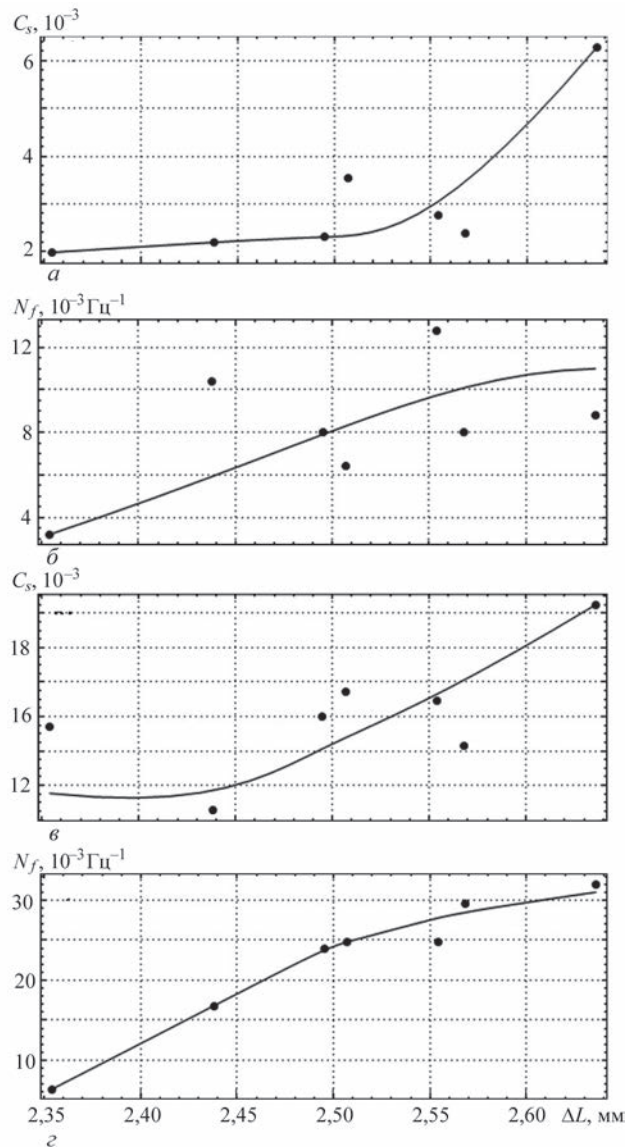


Рис. 7. Результаты комплексных измерений характеристик частотных зависимостей АЭ сигналов: пиковые амплитуды (а, в) и плотности АЭ сигналов (б, з); а, б – датчик с полосой пропускания 0,2...0,5 МГц; в, з – датчик с полосой пропускания 0,2...2,0 МГц

Таблица 1. Результаты комплексных измерений характеристик временных и частотных зависимостей АЭ сигналов для эпоксидной смолы ЭД-20 при четырехточечном изгибе

Механические характеристики			Характеристики АЭ эффектов*				
			Временная зависимость			Частотная зависимость	
Нагрузка $P$ , кг	Напряжение $\sigma$ , МПа	Прогиб $\Delta L$ , мм	Пиковые амплитуды $U$ , мВ	Площадь под огибающей $S$ , $10^{-5}$ В $\times$ с	Плотность сигналов $N$ , с $^{-1}$	Пиковые амплитуды $C_s$	Плотность сигналов $N_p$ , $10^{-3}$ Гц $^{-1}$
64,71	101,53	2,35	1,93	5,02	16,75	1,98	3,20
			21,30	31,37	108,88	15,40	6,40
66,57	104,45	2,44	2,71	6,73	33,50	2,20	10,40
			21,70	39,94	100,50	10,55	16,80
67,54	105,97	2,49	3,02	6,71	75,38	2,32	8,00
			21,40	46,78	142,38	15,97	24,00
67,96	106,63	2,51	3,18	6,57	83,75	3,55	6,40
			22,40	73,97	150,75	17,44	24,80
68,67	107,75	2,55	3,74	7,48	50,25	2,75	12,80
			21,70	65,13	209,38	16,93	24,80
68,93	108,16	2,57	3,74	7,79	100,50	2,39	8,00
			23,30	47,42	217,75	14,30	29,60
70,26	110,24	2,64	7,16	17,59	184,25	6,29	8,80
			23,50	75,50	226,13	22,50	32,00

\*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.

риалах физическая интерпретация экспериментальных данных затруднена. Эпоксидная смола является довольно хрупким полимерным материалом. При изгибе разрушения инициируются локализацией напряжений на поверхности образца. Акты разрушения являются каналами диссипации упруго запасенной энергии.

Помимо хрупкого разрушения в эпоксидной смоле присутствуют локальные зоны течения материала с низкой плотностью сшивок олигомеров эпоксидных групп между собой, в результате чего эти зоны обладают большой пластичностью.

Числовые характеристики временных и частотных зависимостей АЭ сигналов эпоксидной смолы при четырехточечном изгибе представлены в табл. 1.

Для выделения стадий деформационного упрочнения вычислялся коэффициент деформационного упрочнения  $K = d\sigma/dL$  [8]. Результаты механических испытаний и АЭ измерений представлены на рис. 8 в виде деформационной кривой  $\sigma(\Delta L)$  и зависимости  $K(\Delta L)$ . Как следует из рис. 8, по изменению коэффициента деформационного упрочнения можно выделить четыре стадии деформационного упрочнения. Практически линейный участок  $\sigma(\Delta L)$  в зоне I соответствует чисто упругой деформации, описываемой законом Гука и характеризуется нелинейным уменьшением коэффициента деформационного упрочнения  $K(\Delta L)$ . В зоне II происходит незначительное уменьшение наклона кривой  $\sigma(\Delta L)$ , а зависимость коэффициента деформационного упрочнения  $K(\Delta L)$  выходит на горизонтальное плато, что свидетельствует об изменении механизма деформации. Надо полагать, это связано с протекающими в полимерной матрице процессами перестройки ее

внутримолекулярной структуры и последовательным выключением некоторых механизмов деформации. В зоне III наблюдается еще незначительное уменьшение наклона кривой  $\sigma(\Delta L)$ , а зависимость коэффициента деформационного упрочнения  $K(\Delta L)$  имеет характерную ступеньку на горизонтальном плато. Соответствующее этому переходу механическое напряжение играет роль «спускового механизма» – преодолевается некоторый потенциальный барьер и происходит достаточно быстрая перестройка структуры. Молекулы перестраиваются таким образом, что исчезают «стопоры», существовавшие в исходном материале, сегменты макромолекул полимера приобретают определенную подвижность, следствием чего является ориентация макромолекул вдоль направления деформации [9]. В зоне IV наблюдается значительное изменение наклона кривой  $\sigma(\Delta L)$ , заканчивающееся практически горизонтальным участком, после которого наступает разрушение образца. Непосредственно перед разрушением коэффициент

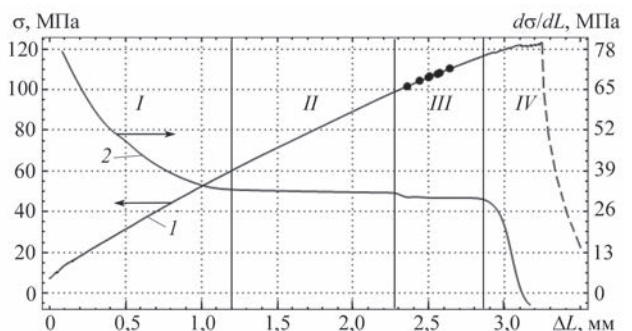


Рис. 8. Деформационное упрочнение эпоксидной смолы ЭД-20. Кривая 1 – механическое напряжение; кривая 2 – коэффициент деформационного упрочнения; I–IV – стадии деформационного упрочнения, точками обозначены моменты возникновения АЭ сигналов

Таблица 2. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию для диагностики пластической деформации композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы при четырехточечном изгибе

Характеристика распределения	Информационный параметр	Характер определения	Характер проявления	Пригодность
Амплитудно-временное распределение	Пиковые амплитуды	Абсолютный максимум временного АЭ сигнала	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Затруднения в идентификации для широкополосных АЭ датчиков ±
	Площадь под огибающей	Интегрирование массива локальных максимумов АЭ сигнала по времени	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие значительных осцилляций для широкополосных АЭ датчиков ±
	Плотность АЭ сигнала	Количество пересечений порогового уровня сигнала на единицу временного диапазона	Рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	+
Амплитудно-частотное распределение	Пиковые амплитуды	Абсолютный максимум частотного АЭ сигнала	Рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие незначительных осцилляций +
	Плотность частотного сигнала	Количество пересечений порогового уровня сигнала на единицу частотного диапазона	Преимущественный рост на предкритическом участке деформационного упрочнения	Наличие значительных осцилляций для узкополосных АЭ датчиков ±

деформационного упрочнения  $K(\Delta L)$  резко уменьшается. Скорее всего, это обусловлено появлением дефектов типа микротрещин.

Согласно данным эксперимента (рис. 8) все сигналы АЭ при изгибе располагаются в зоне III, которая характеризует предкритическое состояние образца, что значительно меньше значения разрушающего напряжения при изгибе, установленного по данным механических испытаний  $\sigma = 120$  МПа. Таким образом, появление сигналов АЭ может служить предвестником необратимых изменений структуры полимерной матрицы.

В процессе нагружения наблюдается значительное изменение информативных характеристик АЭ сигналов, отражающее эволюцию физических механизмов деформации и смену доминирующих источников акустического излучения. 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. 2.

Причиной установленных закономерностей изменения АЭ сигналов при изгибе является различная скорость напряжений в образце. В начальный момент разрушения скорость нарастания напряжений в локализованных дефектах структуры велика. По мере распространения разрушающих напряжений скорость падает, и материал по-другому начинает реагировать на нагрузку.

Механизм упрочнения весьма сложен, но главная роль отводится торможению вытягивания полимерной матрицы и ее формированию вследствие полимеризации олигомеров, а также сшивке сфор-

мированных полимерных цепей, путем образования поперечных связей между линейными и разветвленными молекулами [1, 10]. Увеличение плотности сетки химических связей приводит к снижению диссипативных свойств эпоксидной матрицы и ее способности противостоять хрупкому разрушению.

## Выводы

1. Метод акустической эмиссии позволяет выявлять закономерности развития зоны поврежденности предкритического состояния материала под нагрузкой. Исследования сигналов акустической эмиссии, возникающих при механическом нагружении материала позволяют получить важную информацию о физических механизмах пластической деформации и разрушения.

2. Использование инструментария акустической эмиссии дает возможность проследить динамику структуры материала, ее развитие и обеспечить прогнозирование образования дефектов материала.

3. По данным АЭ процессы, протекающие в зоне разрушения, начинаются задолго до результатов механических измерений.

4. Методами акустической эмиссии определяются предвестники начала изменения структуры материала, в то время как механические испытания фиксируют его установившуюся стадию.

## Список литературы

1. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В. и др. (2014) Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении. *Физическая мезомеханика*, 17, 2, 65–83.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2014) Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при



- контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–11.
- Филоненко С.В. (2011) Влияние неравномерности процесса разрушения композиционного материала на сигналы акустической эмиссии. *Технологические системы*, 1 (54), 24–31.
  - Недосека А.Я., Недосека С.А., Шевцова М.А. и др. (2018) Акустическая эмиссия при испытании композитных материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 36–40.
  - ГОСТ 28840-90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования.*
  - ГОСТ 33519-2015 *Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температуре.*
  - Алексенко В.Л., Шарко А.В., Шарко А.А. и др. (2019) Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 32–38.
  - Салита Д.С., Поляков В.В. (2018) Применение методов главных компонент исследованию акустической эмиссии при пластической деформации свинцовых сплавов. *Известия АлтГУ Физика*, 4(102), 26–30.
  - Yudin V.A., Ivlev V.I., Fomin N.E., Sigachyov A.F. (2017) Mechanical Testing of CFRP with Epoxy Matrix. *Materials Physics and Mechanics*, 30, 53–60.
  - Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Панин А.В. и др. (2004) Мезоскопические структурные уровни деформации в поверхностных слоях и характер усталостного разрушения поликристаллов при знакопеременном изгибе. *Физическая мезомеханика*, 7, 2, 5–17.

## References

- Stukhlyak, P.D., Buketov, A.V., Panin, S.V. et al. (2014) Structural levels of fracture of epoxy composite materials under shock loading. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 17(2), 65–83 [in Russian].
- Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 3–11 [in Russian].
- Filonenko, S.V. (2011) Influence of nonuniformity of fracture process of composite materials on acoustic emission signals. *Tekhnol. Sistemy*, 1 (54), 24–31 [in Russian].
- Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Shevtsova, M.A. et al. (2018) Acoustic emission at composite material testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 36–40 [in Russian].
- GOST 28840-90: *Machines for tensile, compression and bending tests of materials. General specifications* [in Russian].
- GOST 33519-2015: *Polymer composites. Compression test method at normal, higher and lower temperature* [in Russian].
- Aleksenko, V.L., Sharko, A.V., Sharko, A.A. et al. (2019) Identification by AE method of structural features of deformation mechanisms at bending. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 32–38 [in Russian].
- Salita, D.S., Polyakov, V.V. (2018) Application of main component methods for studying acoustic emission at plastic deformation of lead alloys. *Izv. AltGU Fizika*, 4(102), 26–30 [in Russian].
- Yudin, V.A., Ivlev, V.I., Fomin, N.E., Sigachyov, A.F. (2017) Mechanical testing of CFRP with epoxy matrix. *Materials Physics and Mechanics*, 30, 53–60.
- Panin, V.E., Elsuikova, T.F., Panin, A.V. et al. (2004) Mesoscopic structural levels of deformation in near-surface layers and nature of fatigue fracture of polycrystals under alternating bending. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 7(2), 5–17.

## ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ТА ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ВИМІРІВ ДО ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ

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. Юренін<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія. 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, м. 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 залежності акустичної емісії, що виникає при деформації зразків із епоксидної смоли ЕД-20, з використанням розробленого апаратно-програмного комплексу, що відображають еволюцію фізичних механізмів деформації при навантаженні зразків. Встановлено закономірності формування акустико-емісійних та тензометричних діагностичних сигналів у процесі деформації при чотирьохточковому вигині. Реєстровані сигнали оброблено в реальному масштабі часу. Акустичну емісію було описано за допомогою інформативних параметрів сигналу, що відображають його енергетичні та частотні особливості. Визначено напруги, при яких починається руйнування матеріалу, узгоджені за рівнем силового впливу. Отримані результати і закономірності можуть бути використані при акустико-емісійному дослідженні стадійності пластичної деформації в композиційних матеріалах на основі епоксидної матриці. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* акустична емісія, тензометрія, епоксидна матриця, чотирьохточковий вигин

## APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION AND STRAIN GAUGE MEASUREMENTS TO PROCESSES OF DIAGNOSTICS OF STRAIN HARDENING OF EPOXY MATRIX COMPOSITES

V.L. Aleksenko<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 Maritime Academy. 20 Ushakova Ave., 73000, Kherson, Ukraine. E-mail: ksma@ksma.kh.ua

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

The paper gives the results of studying the dependence of acoustic emission arising at deformation of samples of epoxy resin ED-20, using the developed hardware-software complex, reflecting the evolution of physical deformation mechanisms at sample loading. Regularities of formation of acoustic emission and strain gauge diagnostic signals during deformation at four-point bending were established. Recorded signals were processed in real time. Acoustic emission was described using signal informative parameters, reflecting its energy and frequency features. Stresses at which material fracture begins were determined, which were matched by the level of force impact. Derived results and regularities can be applied at acoustic emission studies of the stages of plastic deformation in epoxy matrix composites. 10 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

*Keywords:* acoustic emission, strain gauge measurement, epoxy matrix, four-point bending

Поступила в редакцію  
21.08.2019