



УДК 620.179.16

© В. Н. Овчарук, 2008

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Овчарук В. Н. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматика и системотехника»,
e-mail: ovcharuk@ais.khstu.ru (ТОГУ)

В работе приводятся результаты исследования и методика обработки спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии, полученных при испытании образцов керамических материалов из нитрида кремния, алюминоборонитрида, корундового огнеупора и электрофарфора на четырехточечный изгиб. Проведен подробный анализ сигналов акустической эмиссии до и после разрушения образцов из неупругодеформирующегося электрофарфора. Выявлены существенные различия статистических параметров нормированных спектральных функций.

The investigation results and the processing technique of the spectral characteristics for acoustic emission signals are given obtained when samples of ceramic materials from silicon nitride, electroporcelain, and some other ceramics were tested for the four-point bend. A detailed analysis of the acoustic emission signals before and after sample destructions from nonelastically deformed electroporcelain has been made. Essential distinctions of statistical parameters of the normalized spectral functions are found.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, спектральный анализ, керамические материалы, амплитудно-частотная характеристика, механические испытания.

Постановка задачи

Испытания керамических материалов с регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) и их использование при оценке прочностных свойств неметаллических материалов проводились и ранее. В работе [8] показано, что уровень напряжений, соответствующий моменту появления сигналов АЭ, связан с пределом прочности керамики. Это позволяет оценивать прочностные свойства материала образца, не доводя его до разрушения. При этом остро встает проблема помехоустойчивости приборов АЭ.

В настоящей работе приводятся результаты исследования спектральных характеристик сигналов АЭ с целью оценки возможности их использования для решения задач диагностики. Сигналы АЭ регистрировались в процессе

испытания на четырёхточечный изгиб образцов керамических материалов с различной структурой и разной степенью поврежденности. Исследования проводились на образцах из нитрида кремния (НКН), алюмоборонитрида (АБН), корундового огнеупора (СЗ) и электрофарфора (ЭФ). Часть образцов из нитрида кремния была подвергнута термической обработке при различном перепаде температур. Это позволяло получить сетку микротрещин на поверхности образца, тем самым резко изменив его прочностные характеристики. С целью предварительной диагностики проводился рентгеноструктурный и фрактографический анализ образцов на предмет обнаружения дефектов типа пор, включений и поверхностных микротрещин.

В процессе испытаний на изгиб неупругодеформирующегося электрофарфора был установлен эффект наличия сигналов АЭ после разрушения образцов (разделения на части). Процесс излучения сигналов АЭ после разрушения образцов наблюдался в течение периода от нескольких секунд до нескольких десятков минут. Регистрируемая при этом скорость счета АЭ (ГОСТ 25.002-80) убывала во времени по закону, близкому к степенному. Это позволило для характеристики получаемых временных зависимостей скорости счета АЭ использовать безразмерный параметр N_t , определяемый экспериментально по тангенсу угла их наклона к оси абсцисс в логарифмических координатах и соответствующий показателю степени аппроксимирующих экспериментальные зависимости степенных функций.

Аналогичный эффект наблюдался также в случае, если образцы электрофарфора предварительно нагружались до появления устойчивых сигналов АЭ и быстро разгружались. При этом величина показателя N_t зависела от уровня механических напряжений, действующих в образце.

Повышение величин механических напряжений, достигнутых при предварительном нагружении образцов, приводило к уменьшению (по абсолютной величине) показателя N_t . Это обстоятельство позволяет использовать данные об АЭ, регистрируемой после снятия нагрузки, для оценки величин максимальных механических напряжений, действующих в образцах или изделиях из неупругодеформирующегося электрофарфора. Это представляет интерес в тех случаях, когда другие способы оценки этих напряжений трудно реализуемы (например, при воздействии высоких температур или агрессивных сред).

Необходимо отметить, что увеличение скорости деформирования при предварительном нагружении образцов с 0,15 мм/мин до 4,1 мм/мин приводило к тому, что наблюдаемая после снятия нагрузки АЭ была незначительной по интенсивности и кратковременной, либо отсутствовала вовсе. Эти и другие эксперименты позволили сделать вывод, что АЭ, регистрируемая после разрушения или снятия нагрузки в образцах из неупругодеформирующегося электрофарфора, связана с медленным закрытием большого числа микротрещин, образование или развитие которых было вызвано предваритель-



ным медленным нагружением образцов и зависит от скорости приложения нагрузки.

Структурная схема установки

Анализ сигналов проводился на установке, базовым элементом которой являлся анализатор спектра одновременного действия, описанный в работе [2]. Он позволяет анализировать спектр акустических сигналов в 100 дискретных точках в диапазоне частот 0,02–2,0 МГц. Полоса анализа в каждой дискретной точке по частоте составляет 2,0 кГц.

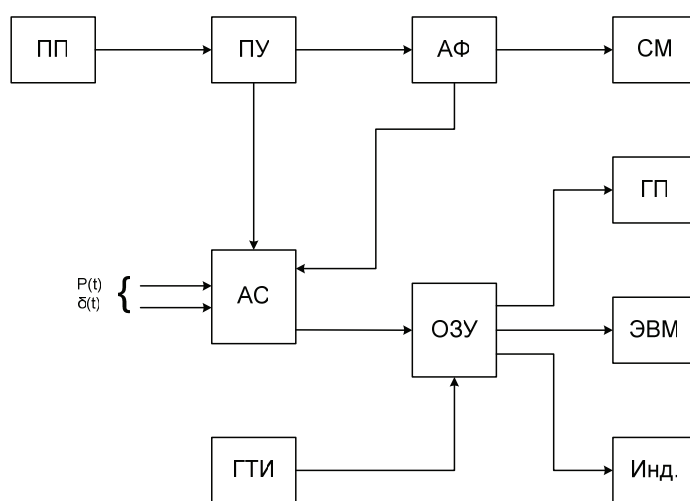


Рис. 1. Структурная схема установки

Структурная схема установки приведена на рис.1. Учитывая то обстоятельство, что большой поток информации трудно обрабатывать в реальном масштабе времени, в состав установки включен генератор тактовых импульсов (ГТИ), который обеспечивал случайную выборку при анализе входного сигнала на заданном интервале времени (0,1–0,5 с). Одновременно со спектром входного сигнала регистрировалась величина нагружающего усилия $P(t)$ и деформация $\delta(t)$. Вся полученная информация через ОЗУ поступала в вычислительный комплекс для обработки. Обработка поступающей информации проводилась поэтапно. Первый этап включал в себя аппаратную селекцию (блок АФ), связанную с формированием блоков данных для дальнейшей обработки. Блоком АФ исключались спектрограммы, зарегистрированные с искажениями, а также сигналы шумов и помех, идентифицированные по результатам предварительных исследований [5, 6].

Методика обработки спектральных функций

Как известно, распространяющийся в образце акустический сигнал в значительной степени искажается под действием амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы «объект-преобразователь». Поэтому следующий этап обработки заключался в корректировке, сглаживании и нормализации полученных спектрограмм согласно рекомендациям, предложенным в работе [3]. При этом следует отметить некоторые особенности, связанные с испытанием на четырехточечный изгиб.

Как отмечалось в работе [5], при локализованном источнике излучения вносимая АЧХ погрешность будет носить систематический характер, и ее влияние можно ослабить путем корректировки и сглаживания. Однако при испытаниях на четырехточечный изгиб, предполагаемые источники акустического излучения могут находиться в области, составляющей около 50 % общего объема. В таких условиях невозможно восстановление истинного спектра входного сигнала путем корректировки по АЧХ. Такая корректировка внесет лишь дополнительную погрешность. Поэтому при дальнейшей обработке использовались спектрограммы, скорректированные лишь по АЧХ приемного преобразователя. Учитывая то обстоятельство, что в исследованиях анализировались спектры колебательной скорости сдвиговой волны, в качестве приемного использовался преобразователь с квазиравномерной АЧХ по колебательной скорости, изготовленный по методике, описанной в работе [4]. Анализ спектра колебательной скорости $A(f)$ удобен еще и потому, что связан с энергетическим спектром $W(f)$ простым соотношением:

$$W(f) = \alpha \cdot A^2(f) , \quad (1)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Исследования АЧХ образца, проведенные по методике, предложенной в работе [3], показали, что для ослабления ее влияния на флуктуации спектра регистрируемого сигнала необходимо ввести усреднение в полосе частот $\Delta f \geq 60$ кГц. Однако такое сглаживание не позволяет анализировать изменения в тонкой структуре спектральной функции, что являлось основной целью эксперимента. Поэтому сглаживание по частоте проводилось только при нормализации спектров в соответствии с выражением:

$$S(f) = A(f) / \overline{A(f)}_{\max} , \quad (2)$$

где $\overline{A(f)}_{\max}$ – максимальное значение сглаженной спектральной функции.

Для оценки широкополосности сигналов АЭ и неравномерности их спектров использовались вторичные параметры от спектральной функции:

$$E_i = \alpha \cdot \sum_{j=1}^k [S_i(j)]^2 , \quad (3)$$



где E_i – энергия нормированного по спектру i -го сигнала, $j = 1 \div 100$ – номер канала анализа анализатора спектра; M_i – интервал между экстремумами спектральной функции i -го сигнала.

Эффективность использования вторичных параметров подтверждается в работе [7].

Полученные в процессе эксперимента спектрограммы объединялись в блоки данных по временному признаку. Номер блока соответствовал номеру выборки, формируемом ГТИ. Для каждого блока данных определялись статистические характеристики:

$$S_{cp}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(j) \quad , \quad (4)$$

где $S_{cp}(j)$ – среднее значение амплитуд спектральных составляющих,
 n – число спектрограмм в блоке данных;

$$G_s(j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |S_i(i, j) - S_{cp}(j)|^2 \quad , \quad (5)$$

где $G_s(j)$ – дисперсия амплитуд спектральных составляющих;

$$\Delta S(j) = t_\alpha(n) \sqrt{\frac{G_s(j)}{n}} \quad , \quad (6)$$

где $\Delta S(j)$ – доверительный интервал, $t_\alpha(n)$ – коэффициент Стьюдента (для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$).

Статистические характеристики вторичных параметров E_i и M_i определялись аналогичным образом:

$$E_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad ; \quad G_E = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |E_i - E_{cp}|^2 \quad ; \quad \Delta_E = t_\alpha(n) \sqrt{\frac{G_E}{n}} \quad , \quad (7)$$

где E_{cp} , G_E , Δ_E – соответственно среднее значение, дисперсия и доверительный интервал для E_i .

$$M_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad ; \quad G_M = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |M_i - M_{cp}|^2 \quad ; \quad \Delta_M = t_\alpha(n) \sqrt{\frac{G_M}{n}} \quad , \quad (8)$$

где M_{cp} , G_M , Δ_M – соответственно среднее значение, дисперсия и доверительный интервал для M_i .

Результаты экспериментальных исследований СХ

По приведенной выше методике были проведены испытания образцов различных керамических материалов, а полученные СХ обработаны на ЭВМ.

Программы обработки, их описания и алгоритмы приведены в приложении. В результате статической обработки мы имеем возможность провести сравнительный анализ СХ сигналов АЭ, полученных при испытании образцов различных материалов с разной степенью поврежденности.

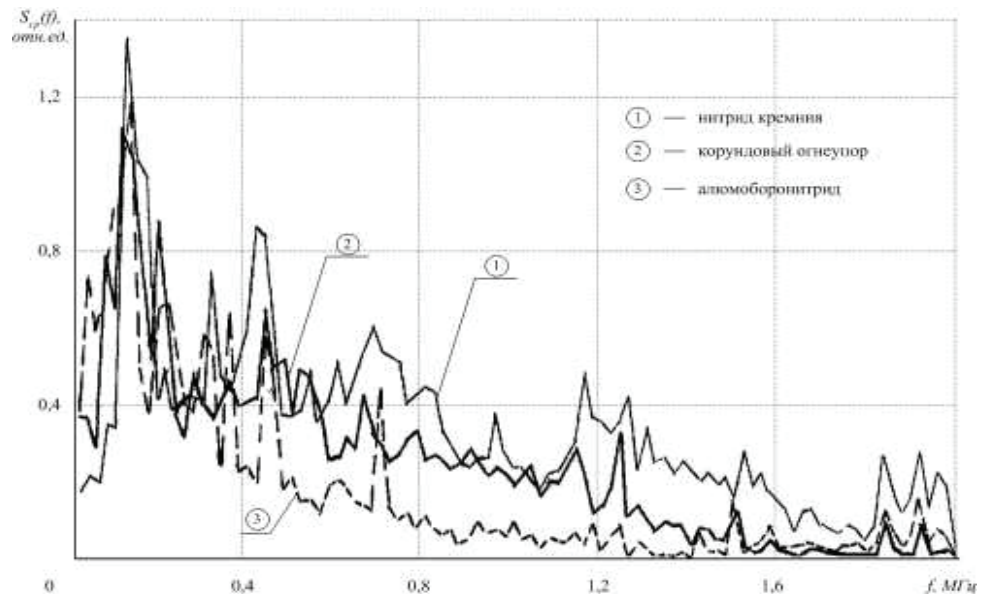


Рис. 2. Усредненные спектральные функции $S_{cp}(f)$

На рис. 2 приведены спектральные характеристики $S_{cp}(f)$ сигналов АЭ, полученные при испытании образцов различных материалов и усредненные по результатам нескольких измерений. Приведенные графики показывают, что спектр сигнала АЭ сильно зависит от структуры материала. Иными словами, акустико-эмиссионная способность, а именно – широкополосность и неравномерность спектральной функции сигналов АЭ – отражают индивидуальные свойства материала.

На рис. 3 приведены графики средних значений $S_{cp}(f)$ и области допустимых граничных значений СХ сигналов АЭ, полученных непосредственно перед разрушением на образцах различных материалов. Полученные результаты подтверждают вывод о высокой нестационарности процесса излучения сигналов АЭ и больших флуктуациях спектральных составляющих [5]. Этот вывод справедлив для всех типов исследуемых керамических материалов.

Проведенный анализ АЧХ образцов показал, что по частотным свойствам фарфор и нитрид кремния (НКН) близки друг другу, а CZ близок АБН. При этом CZ и АБН характеризуются значительно более высоким затуханием ВЧ-составляющих, что позволяет отнести их к классу низкочастотных мате-



риалов. Сравнительный анализ СХ показывает, что механизмы генерации АЭ для материалов CZ и НКН можно считать одинаковыми. Имеющиеся различия функций $S_{cp}(f)$ для образцов этих материалов объясняются частотными свойствами. В то же время для СХ сигналов АЭ образцов из АБН характерно резкое снижение уровня спектральных составляющих в области высоких частот (рис 3, в). Такое снижение нельзя объяснить одними лишь частотными свойствами материала. Оно, безусловно, вызвано также и особенностями формирования сигналов АЭ.

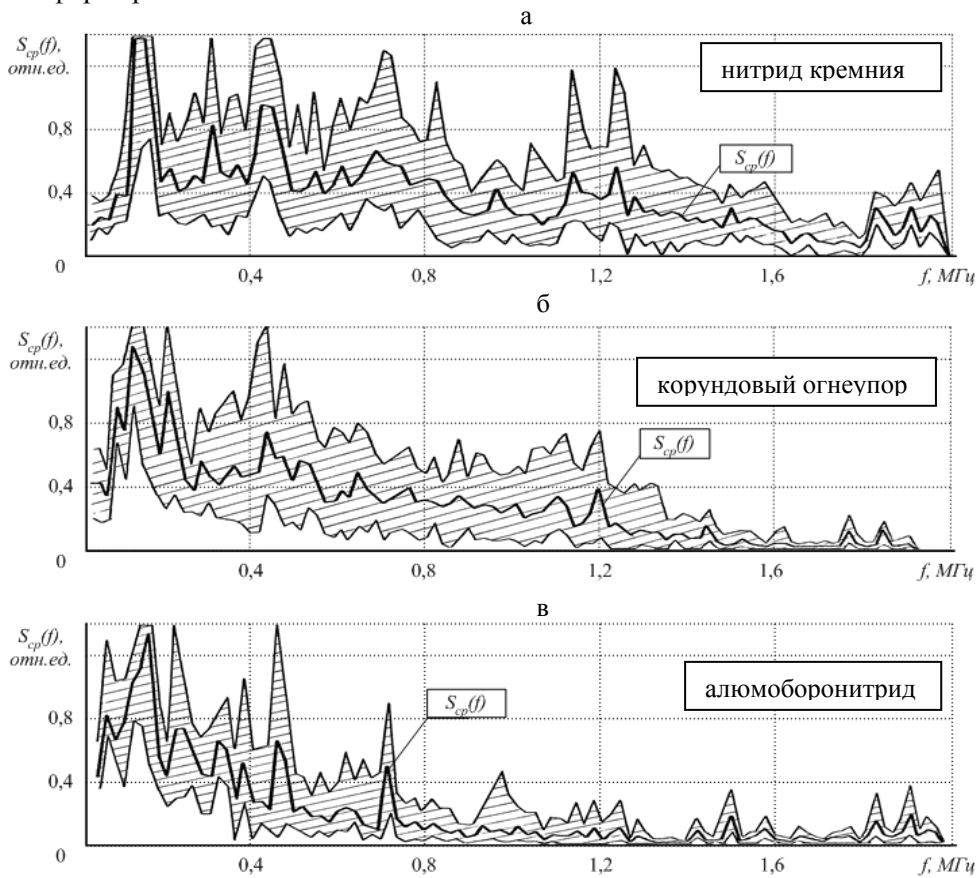


Рис. 3. Усредненные спектральные функции $S_{cp}(f)$ и области допустимых граничных значений

Анализ зависимости СХ от степени поврежденности проводился для образцов из НКН. При этом контроль дефектности осуществлялся рентгенографическим методом, который позволял выявить дефекты материала в виде пор, раковин и включений. Эти дефекты можно также обнаружить после разрушения образца, анализируя излом. Часть образцов была подвергнута термической обработке при температуре $\Delta T = 450\text{--}550^\circ\text{C}$. После такой обра-

ботки, в результате резкого охлаждения, на поверхности образца образуются микротрещины, что сильно влияет на его прочностные свойства. Микротрещины такого рода легко обнаружить методом фрактографии.

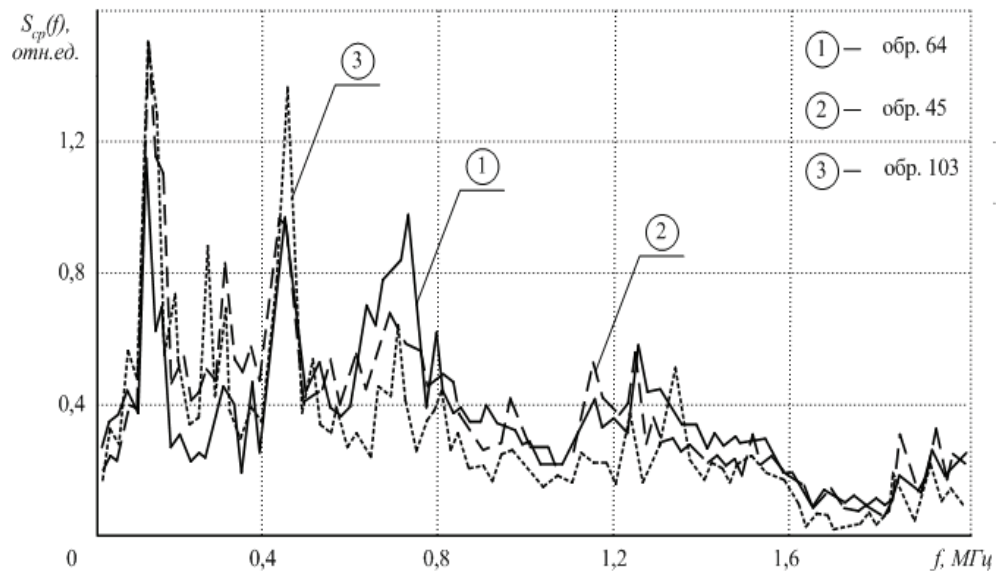


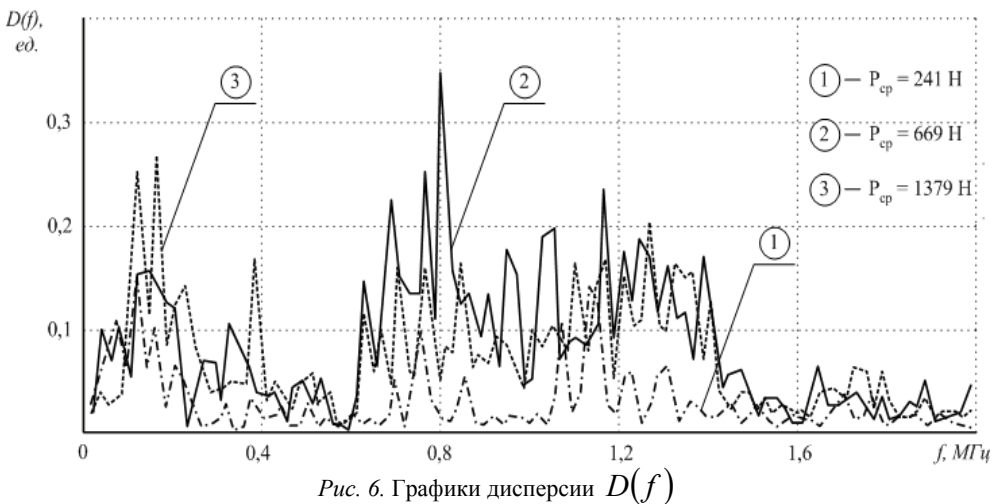
Рис. 4. Усредненные спектральные функции $S_{cp}(f)$

На рис. 4 (кривая 1) приведен график среднего значения амплитуд спектральных составляющих по ансамблю $S_{CP}(f)$ для блока СХ сигналов АЭ, полученных непосредственно перед разрушением неповрежденного образца. Ниже приведены аналогичные графики для поврежденных образцов.

Образец с дефектами в виде раковин и инородных включений (кривая 2) по приведенным СХ мало чем отличается от неповрежденного образца. Различия спектральных функций $S_{CP}(f)$ для этих образцов можно считать не существенными, в особенности, если учитывать высокую неравномерность их АЧХ. В то же время СХ $S_{CP}(f)$ для образца с дефектами в виде поверхностных микротрещин (кривая 3) характеризуются более низким уровнем ВЧ-составляющих. Эти различия также могут быть вызваны влиянием АЧХ (наличие поверхностных микротрещин обуславливает увеличение затухания ВЧ-составляющих). Таким образом, анализ функции $S_{CP}(f)$ СХ сигналов АЭ показывает, что, несмотря на их различие, выделить устойчивые критерии поврежденности материала не представляется возможным. Возникает необходимость рассмотреть процесс разрушения образца в динамике его развития.



На рис. 5 приведены графики функции $S_{cp}(f)$ для блоков данных, полученных на разных стадиях функции нагружения. СХ были зарегистрированы при испытании неповрежденного образца из НКН (обр. 79) при установке ПП на торцевую поверхность. Значения функции $S_{cp}(f)$, полученные в начальной стадии эксперимента, существенно отличаются от СХ, зарегистрированных непосредственно перед разрушением. Это позволяет сделать вывод, что усредненные по ансамблю СХ регистрируемых акустических сигналов изменяются в процессе эксперимента. С увеличением нагрузки отмечается рост уровня ВЧ-составляющих функции $S_{cp}(f)$. Эти изменения не связаны с изменением АЧХ и могут объясняться лишь изменением физической природы источников.



Анализируя графики дисперсии $D(f)$ для тех же блоков данных (рис. 6), можно определить, на каком участке функции нагружения и на каких частотах происходят наибольшие изменения. Начальная стадия эксперимента отличается относительно не высокими значениями $D(f)$ ($P_{cp} = 241$ Н), что свидетельствует о стационарности процесса. Наибольшие изменения амплитуд спектральных составляющих происходят в диапазоне частот 0,02–0,2 МГц. Максимальные значения $D(f)$ не превышают 0,15 ед. При $P(t) \approx 0,5P(t)_{\max}$ ($P_{cp} = 669$ Н) в спектре сигналов наблюдаются наибольшие изменения. Они охватывают диапазон частот 0,02–0,4 и 0,6–1,4 МГц (т. е. практически весь частотный диапазон АС), а отдельные значения $D(f) > 0,3$. Для СХ, полученных непосредственно перед разрушением образца ($P_{cp} = 1378$ Н), значения функции $D(f)$ увеличиваются в области низких частот и снижаются в диапазоне частот 0,6–1,4 МГц. Анализ функции $D(f)$ на разных стадиях нагружения позволяет охарактеризовать изменения СХ регистрируемых акустических сигналов и может быть полезен при решении задач диагностики и прогнозирования.

Изучение свойств электрофарфора

С целью уточнения физической природы акустических сигналов, регистрируемых при статических испытаниях неупругодеформирующегося электрофарфора, были проанализированы спектральные характеристики сигналов АЭ до и после разрушения образцов. Усреднение и предварительная обработка сигналов проводилась по ранее приведенной методике.

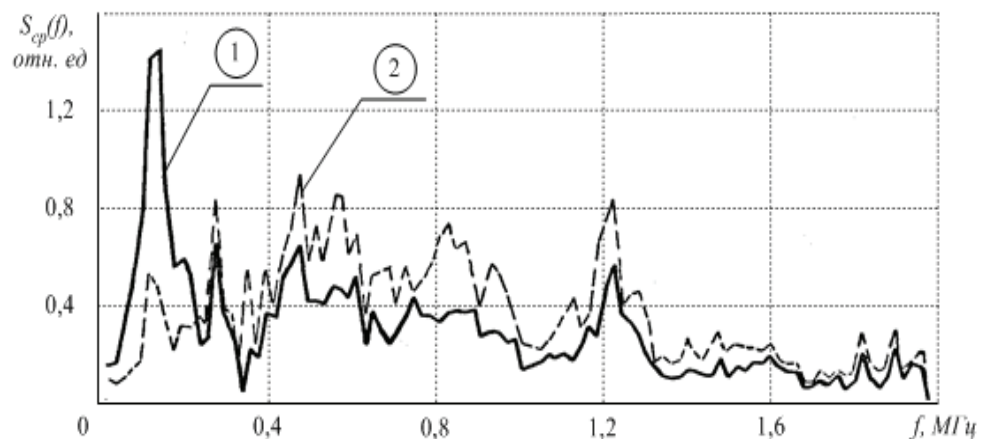


Рис. 7. Усредненные спектральные функции $S_{cp}(f)$



На рис. 7 приведены графики функций $S_{cp}(f)$ для блоков спектрограмм, зарегистрированных до разрушения образца (кривая 1) и после разрушения (кривая 2). Видно, что в спектре сигнала АЭ после разрушения образца уровень НЧ-составляющих значительно ниже. В остальном же диапазоне частот функции $S_{cp}(f)$ в обоих случаях отличаются незначительно. Снижение уровня НЧ-составляющих после разрушения можно объяснить отсутствием акустических шумов нагружающего устройства, спектр которых, как показали предварительные исследования, сосредоточен в области частот до 200 кГц.

Таким образом, усредненные по ансамблю спектральные характеристики сигналов АЭ до и после разрушения образца, на первый взгляд, существенных различий не имеют. В то же время график дисперсии амплитуд спектральных составляющих сигналов АЭ (рис. 8) показывает, что после разрушения образца резко увеличилась неравномерность функций $S_{cp}(f)$. Дисперсия $G_S(f)$ для большинства спектральных составляющих после разрушения образца увеличилась более чем в два раза. Увеличилось также число экстремумов на графике функции $G_S(f)$.

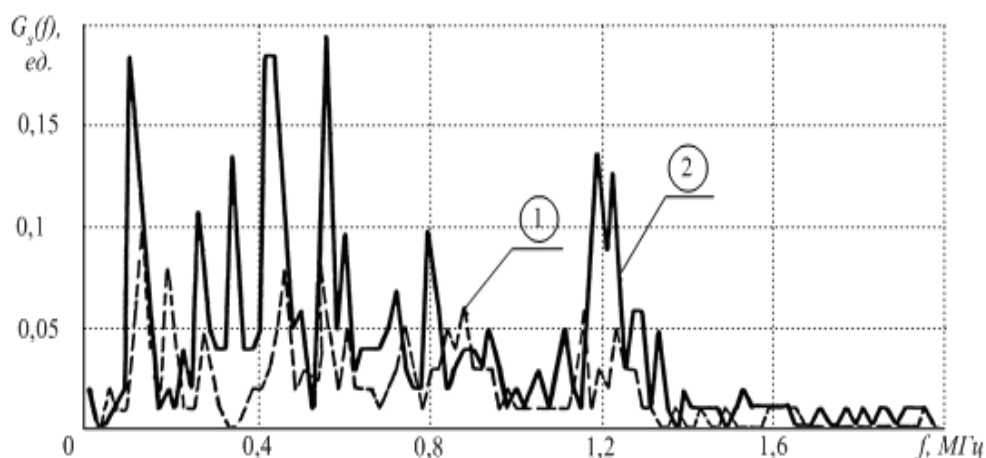


Рис. 8. Дисперсия амплитуд спектральных составляющих $G_S(f)$

Если учесть, что выбросы этой функции соответствуют участкам спектра с неустойчивыми экстремумами, то можно сделать вывод, что число экстремумов спектральной функции и их амплитуды увеличилось после разрушения. Это можно объяснить как изменением геометрии образца, так и особенностями формирования сигналов АЭ.

Результаты статистической обработки вторичных параметров

№ блока	P_{cp}	E_{cp}	G_E	Δ_E	M_{cp}	G_M	Δ_M	Примечание
	Н	отн.ед.			кан.			
0	161	10,3	29,5	5,40	7,35	13,60	11,70	До разрушения
1	218	14,4	33,3	3,83	4,43	6,90	1,75	
2	251	14,3	22,8	3,36	3,58	1,36	0,82	
3	284	16,1	43,8	4,67	3,84	1,52	0,87	
4	313	16,1	12,8	2,53	3,17	0,70	0,59	
5	337	13,0	12,1	2,45	3,58	2,60	1,14	
6	353	18,5	15,1	2,74	2,95	0,80	0,63	
7	378	15,2	15,5	2,78	3,63	2,33	1,08	
8	407	15,1	29,8	3,85	3,74	1,26	0,79	
9	428	15,7	22,2	3,12	3,73	2,23	0,99	
10	-	21,4	16,7	3,33	2,5	0,26	0,414	После разрушения

В таблице приведены результаты статистической обработки вторичных параметров E_i и M_i для всего эксперимента, что позволяет рассмотреть в динамике изменение характеристик широкополосности и неравномерности спектральных функций сигналов АЭ. Из таблицы следует, что среднее значение энергии нормированного спектра E_{cp} за время эксперимента существенно изменяется. О высокой изменчивости энергии нормированного спектра свидетельствует дисперсия G_E , которая сохраняет высокие значения вплоть до разрушения образца. После разрушения образца E_{cp} увеличивается в среднем в 1,5 раза, а G_E – снижается в 1,5 раза. Это свидетельствует о том, что сигналы АЭ после разрушения образца имеют более широкий спектр, а их «повторяемость» выше.

Что касается характеристик неравномерности $S(f)$ то из таблицы следует, что периодическая структура АЧХ образца проявляется на ранней стадии эксперимента при невысоких значениях P_{cp} . Параметр M_{cp} стабилизируется на значении трех-четырех каналов при $P_{cp} < 0,5P_{max}$, причем дисперсия G_M свидетельствует о том, что параметр M_i изменяется в меньших пределах, чем E_i . Так, например, после разрушения образца значение M_{cp} снижается в среднем в 1,5 раза, а G_M – почти в 8 раз, т.е. функция $S(f)$ становится после разрушения более неравномерной, и эта неравномерность очень стабильна.

Более высокую неравномерность функции $S(f)$ можно объяснить изменением геометрии образца, т. к. после разрушения его линейный размер уменьшается примерно в два раза. Однако неравномерность $S(f)$ связана не



только с АЧХ образца. Сигналы АЭ, вызванные процессом образования и развития микро- и макротрещин могут иметь различную физическую природу. Число источников сигналов АЭ и их распределение по пространству образца также могут быть различными. Все это, безусловно, влияет на эффективную ширину и неравномерность функции $S(f)$. Поэтому вполне допустимо предположить, что высокая стабильность параметра M_i связана именно с уменьшением числа источников АЭ и их локализацией по пространству.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование спектральных характеристик регистрируемых сигналов позволяет не только обнаружить дефекты, но и идентифицировать их с параметрами дефекта. Это требует проведения дальнейших работ по поиску критериев идентификации, и создает предпосылки для использования спектральных характеристик сигналов АЭ при решении задач диагностики и прогнозирования.

Акустические сигналы после разрушения ранее не изучались. Считалось, что это есть сигналы шумов и помех. Использование информационно-измерительного комплекса на базе анализатора спектра позволило не только обнаружить эффект присутствия сигналов АЭ после разрушения образца из неупругодеформирующегося электрофарфора, но и установить их взаимосвязь с процессами, протекающими до разрушения.

Анализ спектральных характеристик сигналов АЭ показал, что процесс, протекающий в материале образца после его разрушения, является частью процессов, связанных с образованием и развитием микро- и макротрещин, либо имеет схожую с ними физическую природу. Это позволяет использовать сигналы, полученные после разрушения, для оценки величин максимальных механических напряжений и других механических параметров при испытаниях образцов и конструкций из неупругодеформирующегося электрофарфора.

Библиографические ссылки

1. А. с. № 1075145 СССР / *Лыков Ю. И., Горбунов А. И., Овчарук В. Н.* Устройство для измерения спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии. 1984. Бюллетень ОИПОТЗ. № 7.
2. Установка «Спектр» для анализа спектральных характеристик акустической эмиссии / *Ю. И. Лыков, А. И. Горбунов, В. Н. Овчарук, А. С. Острицкий.* // Дефектоскопия 1988. № 1.



3. Горбунов А. И., Лыков Ю. И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта на спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1986. № 9.
4. А. с. № 534624 СССР / Колмогоров В. Н., Пащенко Г. Ф. Способ изготовления пьезоэлектрических преобразователей. 1976. Бюллетень ОИПОТЗ № 43.
5. Лыков Ю. И., Овчарук В. Н. Анализ спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии от усталостной трещины // Дефектоскопия. 1986. № 8.
6. А. с. №1527577 СССР / Лыков Ю. И., Овчарук В. Н. Способ обнаружения развивающихся трещин. 1989. Бюллетень ОИПОТЗ № 45.
7. Методика идентификации механических характеристик материалов по сигналам акустической эмиссии / В. Г. Гришко и др. // Проблемы прочности 1984. № 1.
8. Исследование прочности конструкционных неметаллических материалов / Г. А. Гогоци, С. В. Гришаков, А. Н. Неговский, В. Н. Нероденко // Заводская лаборатория 1981. № 4.