



ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ АЭ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ КОНСОЛЬНОМ ИЗГИБЕ ОБРАЗЦОВ

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, д-р техн. наук (Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины), **Д. В. ГАЛАНЕНКО**, инж. (ООО «Промприлад»), **Л. О. ТЕСЛЕНКО**, инж. (Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины)

Проведен анализ особенностей использования системы для исследования и контроля методом акустической эмиссии процесса накопления многоциклового усталостной поврежденности материала при высокоскоростном циклическом консольном изгибе образцов. Описаны принципы оптимизации и экспериментально получены параметры акустического тракта системы с целью повышения его помехоустойчивости и информативности. Показано, что параметры сигналов АЭ хорошо отображают процессы скорости развития и накопления усталостных повреждений как в металлических, так и в композитных материалах. Исследованы закономерности появления сигналов АЭ и изменение их спектрального состава, обусловленные режимом нагружения и стадией разрушения образца, а также выявлены особенности этих закономерностей для материалов Д16Т, Ст3, стеклотекстолита, отражающие не-изменность процесса усталостной поврежденности.

Analysis of the features of system application for investigation and monitoring by acoustic emission method of the process of high-cycle fatigue damage accumulation in the material at high-speed cyclic bending of samples supported in cantilever was performed. Principles of optimization were described, and parameters of system acoustic circuit were experimentally retrofitted in order to improve its noise resistance and informativity. It is shown that parameters of AE signals accurately represent the process of development and accumulation of fatigue damage both in metallic and in composite materials. Regularities of emergence of AE signals and variation of their spectral composition, which were due to the loading mode and stage of sample failure, were studied, and special features of these regularities were established for such materials as D16T, St3, and glass fiber plastic, which reveal the non-uniformity of fatigue damage process.

Одно из направлений расширения области применения метода АЭ связано с развитием способов выделения сигналов АЭ в условиях шумовых помех [1]. В этом плане заслуживает внимания проблема контроля состояния материала при усталостных испытаниях на высоких частотах нагружения [2].

Высокочастотные испытания дают единственную возможность получить характеристики усталости материала на больших базах нагружения в реальном масштабе времени [3]. При многоциклового усталости материала накопление в нем повреждений начинается задолго до появления макротрещины [4]. Процесс накопления усталостной поврежденности имеет общие закономерности, однако в силу микронеоднородностей структуры даже для одинаковых материалов он индивидуален для каждого образца [5]. Поэтому имеет большой научный и практический интерес создание и развитие методов получения информации о разрушении материала начиная с ранних стадий зарождения усталостной поврежденности непосредственно в процессе деформирования образца с последующим использованием этой информации для диагностики состояния реальных конструкций по результатам НК изделия.

Поскольку каждый акт усталостного повреждения связан с микропластической деформацией элементарного объема материала, он сопровождается сигналами АЭ [6]. Поэтому метод АЭ может быть использован для получения информации об

усталостном разрушении при условии выделения сигналов АЭ на фоне неинформативных шумов [7]. Проблема заключается в том, что циклические испытания образцов на высоких частотах нагружения проводят в резонансном режиме колебаний, когда в образце создают мощное акустическое поле, являющееся источником шумовой помехи [2].

Первые попытки решения сформулированной проблемы были предприняты в 1980-х гг. прошлого столетия [8–10]. Ее сложность, а также несовершенство АЭ аппаратуры [11] и недостаточный уровень понимания взаимосвязи параметров АЭ с кинетикой микроразрушения твердых тел [12] не позволили разработать методики надежного выявления сигналов АЭ на ранних стадиях поврежденности материала и, тем более, методов ее диагностики.

Развитие АЭ-техники позволило вернуться к этой проблеме на новом уровне. В последнее время нами был проделан цикл работ [13–15] по исследованию возможности надежного обнаружения сигналов АЭ, начиная с ранних стадий усталостной поврежденности, в процессе высокоскоростного циклического деформирования в мощном акустическом поле консольно закрепленных образцов листовых материалов. В результате предложена система для выявления сигналов АЭ при резонансном нагружении консольно закрепленного образца из листового материала [16] и показаны возможности использования этой системы для получения сигналов АЭ у материалов,

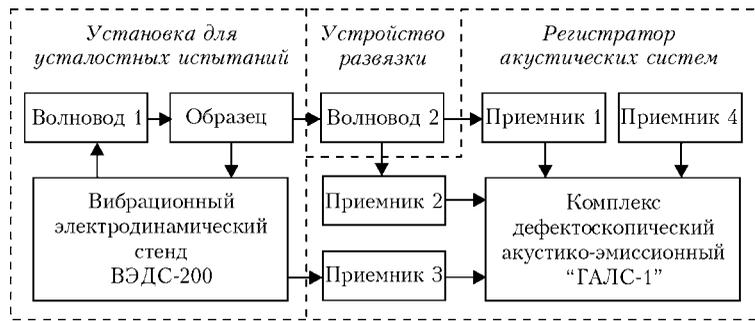


Рис. 1. Структурная схема системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов

имеющих характерные особенности накопления усталостной поврежденности [17].

Целью настоящей работы является развитие предыдущих работ по возможностям применения метода АЭ для исследований и контроля накопления усталостной поврежденности консолюно закрепленных образцов листовых материалов при их резонансном нагружении. Основное внимание уделено оптимизации акустического тракта системы для повышения его помехоустойчивости и информативности, а также исследованию закономерностей появления сигналов АЭ и изменения их спектрального состава, обусловленных режимом нагружения и стадией разрушения образца, в материалах с характерными особенностями развития усталостной поврежденности.

Описание системы, ее настроек и принципов оптимизации акустического тракта. Структурная схема используемого в настоящей работе варианта системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов показана на рис. 1, а внешний вид акустического тракта — на рис. 2.

Усталостные испытания проводят в режиме вынужденных симметричных изгибных резонансных колебаний образца материала по методикам, описанным в работе [3]. Так, с помощью вибрационного электродинамического стенда (ВЭДС) возбуждают продольные упругие колебания, частоту и амплитуду которых можно менять и измерять в широких пределах. *Волновод 1* служит для увеличения амплитуды этих колебаний и трансформации их в изгибные колебания образца на одной из частот резонанса. Консолюно закрепленный образец испытывали используя первую или вторую собственную форму изгибных колебаний. При этом зона высоких напряжений, в которой локализуется накопление усталостных повреждений материала, мала по сравнению с размером образца, причем, при использовании второй формы колебаний объем этой зоны почти на порядок меньше, чем на первой. В жестко закрепленном образце постоянного сечения она находится вблизи заделки образца на первой форме колебаний, и на относительно расстоянии от за-

делки, равном 0,53 от длины образца, — на второй. В рабочий резонансный режим образец вводят путем подстройки частоты и выбора необходимой амплитуды колебаний. В процессе испытаний поддерживают постоянной амплитуду колебаний образца и, при необходимости, подстраивают частоту резонанса.

Волновод 2 предназначен для передачи от образца к датчикам сигналов АЭ, не нарушая условий усталостных испытаний и не пропуская на эти дат-

чики мощное испытательное акустическое поле. Развязка регистратора АЭ сигналов и установки для усталостных испытаний осуществляется путем выбора гибкости волновода и массы струбицины для крепления к нему датчиков таким образом, чтобы снизить резонансную частоту этой конструкции по сравнению с частотой резонанса образца [14]. Выбор волновода с учетом указанных требований исследован в настоящей работе экспериментально. Проведенный нами теоретический анализ [13] показал, что в зависимости от особенностей источника АЭ изменяются спектральные и временные характеристики сигналов, прошедших через волноводный слой. Этот вопрос также исследован в настоящей работе экспериментально.

Регистратор акустических сигналов построен на основе многоканального дефектоскопического акустико-эмиссионного комплекса «ГАЛС-1». К четырем его каналам подключены пьезоэлектрические преобразователи, предназначенные для приема и преобразования акустических сигналов. На *Приемники 1* и *2* поступают сигналы с *Волновода 2*. Анализ состава поступающих с волновода сигналов [15] показал, что, в зависимости

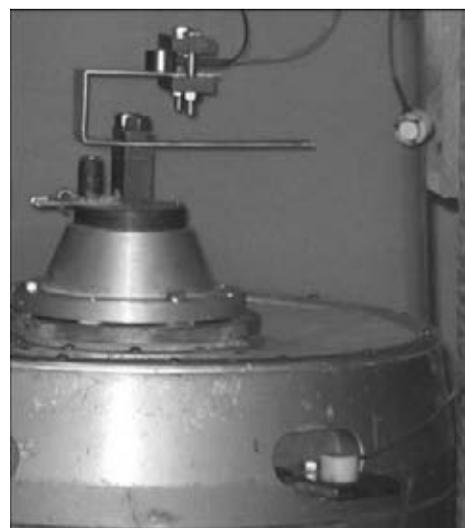


Рис. 2. Внешний вид акустического тракта системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов



от режима работы испытательной установки они могут содержать информативные сигналы АЭ, генерируемые при развитии усталостных повреждений в материале образца, и шумовые помехи различного происхождения. Для исследований особенностей спектра частот информативных сигналов АЭ выбраны два преобразователя с различными полосами пропускания: 1 — 100...800, 2 — 80...500 кГц.

Шумовые помехи можно разделить на следующие виды: в результате трения в местах сочленения элементов конструкции акустического тракта; создаваемые подвижными частями вибростенда в установленном режиме испытаний; генерируемые высшими гармониками собственных форм колебаний образца при его нагружении; возникающие при переключении или подстройке режимов испытаний; электромагнитные помехи различного происхождения. Первую помеху устраняют традиционной [3] настройкой систем крепления сочленяемых элементов, которую проводят для обеспечения высокого КПД передачи акустической энергии от вибростенда через волновод в образец. Вторые два вида шумовых помех можно устранить выбором настроек комплекса «ГАЛС-1» [18]. Настройки параметров комплекса выбирают экспериментально для установленного режима испытаний образца таким образом, чтобы во всех приемных каналах были подавлены шумовые составляющие второго и третьего вида. Используемые в настоящей работе настройки комплекса «ГАЛС-1» приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры настроек каналов комплекса «ГАЛС-1»

Параметр	Номер канала			
	1	2	3	4
Цвет отображения				
Тип преобразователя	GT300	GT200	GT200	GT300
Активность	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.
Коэффициент основного усиления, дБ	45,0	45,0	45,0	45,0
Уровень дискриминации (порог), дБ	21,0	21,0	21,0	21,0
Режим порога	Фикс.	Фикс.	Фикс.	Фикс.
Превышение плавающего порога, дБ	20,0	20,0	20,0	20,0
Время усреднения шумов, мкс	1638	1638	1638	1638
Максимальное время нарастания, мкс	1000	1000	1000	1000
Время ожидания продолжения, мкс	100	100	100	100
Максимальная длительность, мкс	5000	5000	5000	5000
Мертвое время, мкс	5000	5000	5000	5000
Превышение, дБ	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
Нижняя частота фильтра, кГц	80	275	350	350
Верхняя частота фильтра, кГц	375	500	700	700

Для выявления и идентификации шумов переключения и подстройки введен преобразователь, закрепленный на корпусе электродинамического вибратора, а для выявления электромагнитных помех — преобразователь, расположенный на воздухе в месте, близком к элементам вибростенда, в которых возбуждается электромагнитное поле. Сигналы, поступающие с преобразователей на входы каналов комплекса, регистрируют в нем с возможностью последующей программной обработки. В процессе такой обработки идентифицируют и отсеивают шумовые помехи, а в информативном сигнале определяют параметры АЭ.

Отметим, что в местах контакта образца с волноводами возникают явления коррозии и электрического взаимодействия контактирующих поверхностей, которые искажают естественный процесс усталостного разрушения материала, а известные способы борьбы с ними трудоемки [3] или существенно ослабляют информативные сигналы АЭ. В то же время при больших уровнях нагружения указанные явления сопровождаются генерацией паразитных сигналов АЭ [15]. Устранение паразитной АЭ было достигнуто путем введения в образец концентратора напряжений в месте их наибольших значений. При использовании первой формы колебаний концентратор выполняли в виде двустороннего паза по ширине образца в месте окончания заделки, а на второй форме — такого же паза на расстоянии 0,53 длины образца от заделки или сквозного сверления по толщине в этом же месте.

Постановка эксперимента, его результаты и их анализ. Экспериментальная проверка, отработка и оптимизация параметров системы была проведена на образцах, представленных в табл. 2.

Для оптимизации характеристик акустической системы по критерию наиболее эффективного коэффициента передачи сигналов АЭ от образца к преобразователю были изготовлены волноводы из стали и дюралюминия различной толщины. Анализ пропускающей способности волноводов исследовали по обоим каналам с использованием имитатора Су-Нильсена. Для каждого из них проведены по пять сломов грифеля: на образце в предполагаемом месте излома, на волноводе ря-

Таблица 2. Характеристики образцов

Номер образца	Материал	Размеры образца, мм			Размеры паза, мм	
		длина	ширина	толщина	глубина	диаметр
1...6	Д16Т	100	10,0	1,0	0,2	—
7	Д16Т	121	10,9	1,4	0,3	—
8	Ст3	101	11,8	1,5	0,4	—
9	Стекло-текстолит	95	11,5	1,5	0,5	—
10	Д16Т	100	10,0	1,0	—	2,0

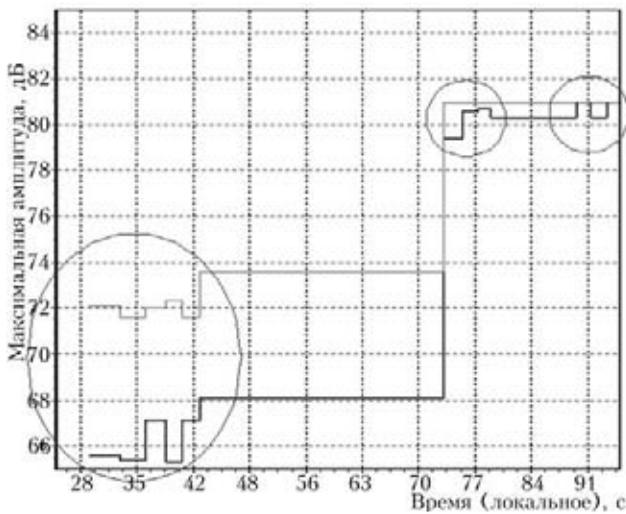


Рис. 3. Характеристики акустических трактов 1 и 2 каналов (здесь и далее на рисунках интенсивность ч/б изображения соответствует интенсивности цвета каналов в табл. 1)

дом с заделкой образца, на волноводе рядом с датчиками. Все волноводы дали хорошие результаты по передаче сигналов АЭ. На рис. 3 приведены таковые для волновода из дюралюминия толщиной 1 мм. Из рисунка видно, что чувствительность преобразователей каналов 1 и 2 приблизительно одинакова (последняя серия сигналов); затухание сигналов в волноводе пренебрежимо мало (сравнение 2- и 3-й групп сигналов); затухание, вносимое переходом сигнала из образца в волновод, составляет для канала 1 величину порядка 13...15 дБ, а для канала 2 — 8...10 дБ.

Усталостные испытания образцов проводили, используя первую (образцы 1–4) или вторую (5, 6) форму собственных колебаний образцов. В процессе испытаний амплитуду колебаний образца ступенчато увеличивали до разрушающего уровня с соответствующей подстройкой частоты резонанса. При этом регистрировали сигналы, поступающие на вход каждого преобразователя. Появление макротрещины в образце фиксировали традиционным [3] методом — по снижению амплитуды колебаний, обусловленному уменьшением резонансной частоты. Затем путем многократной подстройки резонансной частоты образец доводили до полного разрушения.

В процессе испытаний опробованы различные волноводы и установлено, что для используемых режимов нагружения дюралюминиевый волновод толщиной 1 мм обеспечивает лучшую по сравнению с другими развязку регистратора акустических сигналов и установки для усталостных испытаний не нарушая условий усталостных испытаний и не допуская влияния на эти датчики мощного испытательного акустического поля.

Для оптимизации акустического тракта системы относительно спектра сигналов АЭ в различных экспериментах были исследованы следующие полосы частот фильтров каналов 1 и 2: 80...300;

80...375; 100...400; 100...700; 250...500; 275...500; 350...500; 450...700 кГц. В результате как наиболее чувствительные к наличию сигналов АЭ на разных стадиях разрушения материала были выбраны для канала 1 полоса 80...375, для канала 2 — 275...500 кГц.

В каналах 3 и 4 уровень сигналов во время всех испытаний оставался около 0.

Образцы 7–10 (см. табл. 2) были использованы для исследования закономерностей появления сигналов АЭ, обусловленных нагружением материалов, имеющих характерные особенности усталостного разрушения. Испытания проводили, используя первую (образцы 7–9) и вторую (10) форму собственных колебаний при неизменном волноводе (дюралюминий толщиной 1 мм), настройках ГАЛС (см. табл. 1) и методике нагружения (как для образцов 1–6).

В результате обработки сигналов, поступивших в процессе испытаний по каналам 1 и 2, были рассчитаны как функция времени параметры АЭ, отображающие скорость развития (активность, скорость счета) и процесс накопления (количество сигналов, суммарный счет) повреждений в исследуемых материалах при их резонансном деформировании, а также длительность, время до достижения максимального значения, энергия, максимальная амплитуда и различные комбинации этих параметров. На рис. 4, а–7, а для каждого исследованного образца представлены зависимости скорости счета и суммарного счета 4, б–7, б от времени нагружения, которые наиболее ярко отображают процессы соответственно скорости развития и накопления поврежденности материала. Информация для обоих параметров на каждый рисунок приведена по всем каналам. Динамический диапазон изменения этих параметров в процессе испытания настолько велик, что не позволяет отобразить одновременно закономерности их изменения на всех этапах испытания. Поэтому масштаб представления выбран таким, чтобы хорошо были отображены средние значения. Крайние значения описаны словесно. Для анализа закономерностей появления сигналов АЭ, обусловленных режимом нагружения, на рис. 4, в–7, в приведены значения частоты резонанса и размаха колебаний образца.

Из рис. 4 видно, что в образце из сплава Д16Т при нагружении на первой форме собственных колебаний сигналы АЭ в канале 2 появились при установлении размаха колебаний 5 мм. В этом режиме скорость счета АЭ возросла до максимума, а затем уменьшилась. При повышении размаха до 8,5 мм наблюдался всплеск скорости счета в обоих каналах. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (8,5 мм) в канале 2 ход изменения для скорости счета повторился, как на предыдущем уровне, но для больших значений,



с последующим уменьшением ее значения до приблизительно стабильной величины. В канале 1 в установившемся разрушающем режиме колебаний скорость счета возрастала дольше и достигла значительно больших значений, чем в канале 2, а затем так же долго спадала. Этот спад завершился на 720 с появлением макротрещины и нарушением установившегося режима колебаний. Начиная с 770 с образец доводили до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения в резонансный режим колебаний. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины и появлением соответствующих всплесков скорости счета, уровень которых существенно уступает полученным на стадии накопления микротрещин. На зависимости суммарного счета от времени нагружения (б) видно, что количество сигналов АЭ сначала было больше в канале 1, а затем, в процессе нагружения в установившемся разрушающем режиме, — в канале 2.

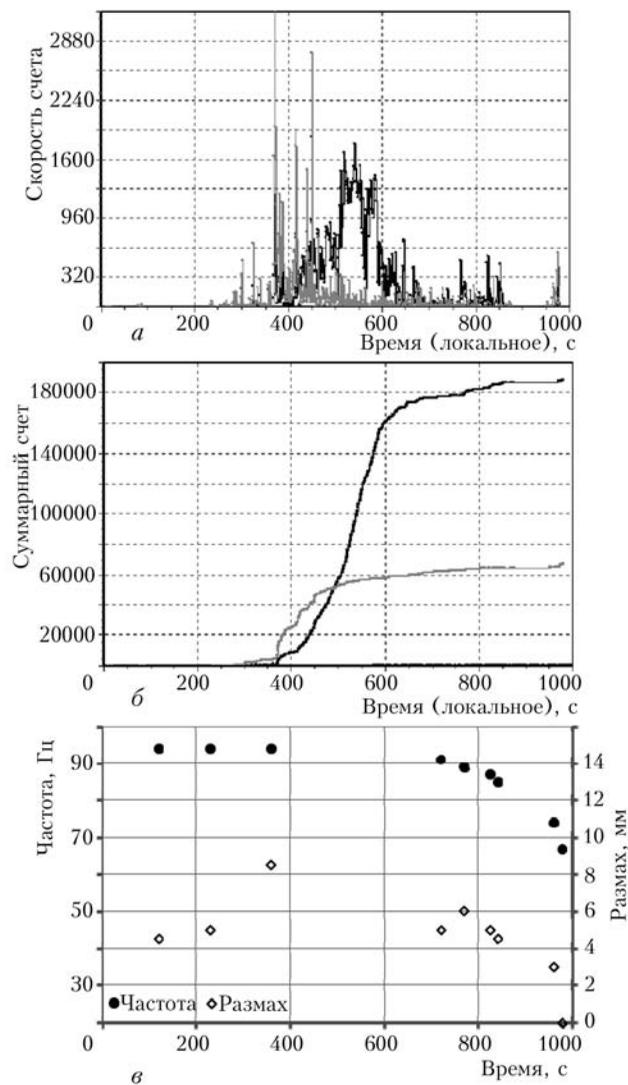


Рис. 4. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из сплава Д16Т (в) от времени испытания

Из рис. 5 видно, что в образце из сплава Ст3 одиночные сигналы АЭ появились и в канале 1, и в канале 2 при установлении размаха колебаний 3,75 мм. При повышении размаха до 4,75 мм сначала наблюдался всплеск скорости счета в канале 2, который не сопровождался заметным увеличением количества сигналов АЭ, затем в канале 1 появилось небольшое количество сигналов. После снятия нагрузки и повторного установления размаха 4,75 мм сначала наблюдался всплеск скорости счета и суммарного счета в канале 1, затем в канале 2 появились сигналы АЭ. При повышении размаха до 5 мм в обоих каналах картина повторилась, но для больших значений параметров АЭ. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (5 мм) в обоих каналах регистрировали сигналы АЭ, однако, в канале 1 на фоне постоянного уровня скорости счета наблюдались отдельные всплески с соответствующими скачками суммарного счета, а в канале 2 процесс был более равномерным, а самый большой всплеск параметров наблюдался незадолго до появления макротрещины. Отметим, что повышение быст-

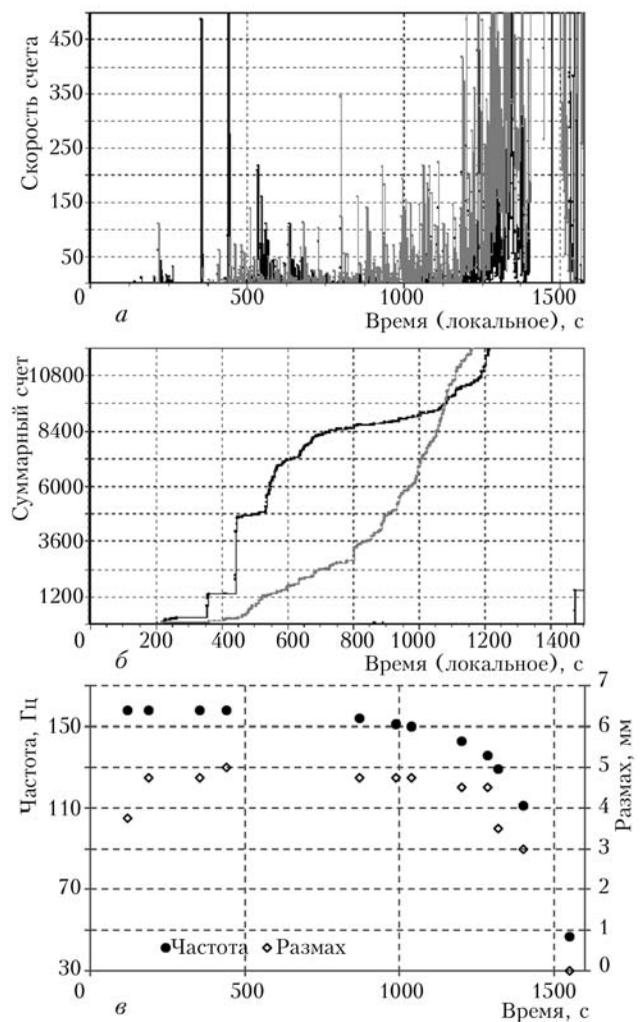


Рис. 5. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из стали Ст3 (в) от времени испытания



роты изменения во времени скорости счета и, соответственно, суммарного счета в одном канале соответствовала уменьшению в другом. При этом в канале 1 суммарный счет все время был в несколько раз больше, чем в канале 2. К 870 с появилась макротрещина и нарушился установившийся режим колебаний. Начиная с 990 с образец довели до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины и значительным увеличением скорости счета и быстроты изменения суммарного счета, уровень которых соизмерим до 1200 с с полученным на стадии накопления микротрещин. Начиная с 1200 с после введения образца в очередной резонанс, скорость счета резко возросла и продолжала при последующем долоте возрастать вплоть до изменения на порядок. Это возрастание, очевидно, обусловлено трением берегов макротрещины. Зависимость суммарного счета от времени нагружения соответствует зависимости скорости счета.

Видно, что в образце из стеклотекстолита при малых уровнях нагрузки наблюдалось небольшое число сигналов АЭ в канале 1 (рис. 6). При установлении размаха колебаний 8,5 мм в канале 1 появилось значительное число сигналов АЭ. При этом сначала наблюдался всплеск скорости счета, затем скорость счета АЭ возросла до максимума и уменьшилась. Такое возрастание и убывание, но при более низких значениях скорости счета, наблюдалось еще раз. При повышении размаха до 11,5 мм в канале 1 наблюдалась та же картина, но при больших значениях скорости счета. В канале 2 сразу после установления этой амплитуды появилось небольшое количество сигналов АЭ. При повышении размаха до 14 мм в канале 1 наблюдалась та же картина, но без переходного всплеска и при еще больших значениях скорости счета. Повышение размаха до 15 мм привело к резкому увеличению числа сигналов АЭ: в канале 1 наблюдалась та же картина, что и на предыдущем уровне, но при больших примерно в два раза значениях скорости счета. В канале 2 изменения скорости счета во времени повторили изменения в канале 1, но на уровне примерно в два раза меньшем. При увеличении размаха до 16 мм в обоих каналах повторилась та же картина, что и на предыдущем уровне, но на меньших примерно в два раза значениях скорости счета. При увеличении размаха до 18,5 мм снова повторялась в обоих каналах та же картина, что и на предыдущем уровне, но на больших значениях скорости счета. Каждый раз скорость счета после увеличения падала практически до 0. Зависимость суммарного счета от времени нагружения соответствует зависимости скорости счета.

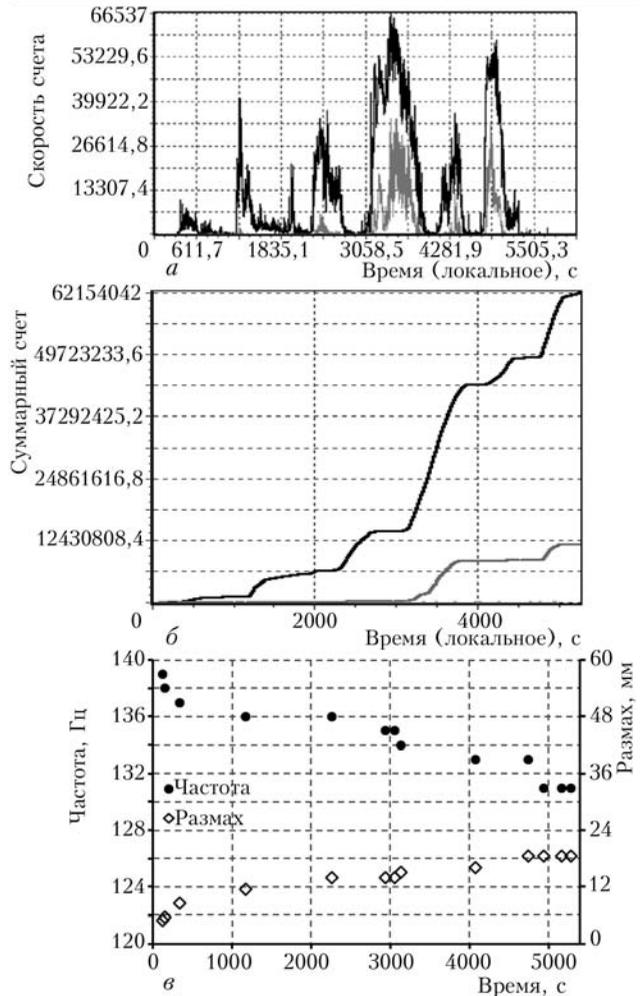


Рис. 6. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из стеклотекстолита (в) от времени испытания

Из рис. 7 видно, что в образце из сплава Д16Т при нагружении на второй форме собственных колебаний одиночные сигналы АЭ появились и в канале 1, и в канале 2 при установлении размаха колебаний 0,5 мм. Количество этих сигналов нарастало примерно с одинаковой скоростью и постепенным увеличением размаха до 2,15 мм на 940 с. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (2,15 мм), когда частота оставалась постоянной, а амплитуда падала (что свидетельствовало о развитии поврежденности материала) в обоих каналах количество сигналов АЭ возрастало, причем в канале 2 намного быстрее. В районе 1400 с скорость счета в канале 2 стала резко возрастать вплоть до нескольких порядков при наличии отдельных мощных выбросов, затем немного уменьшилась и стала примерно постоянной вплоть до подстройки резонансной частоты на 2340 с. Соответствующим образом в канале 2 возрастал суммарный счет. В канале 1 при этом продолжало постепенно возрастать количество сигналов АЭ. В момент 2340 с образец снова был введен в резонанс, но уже на более

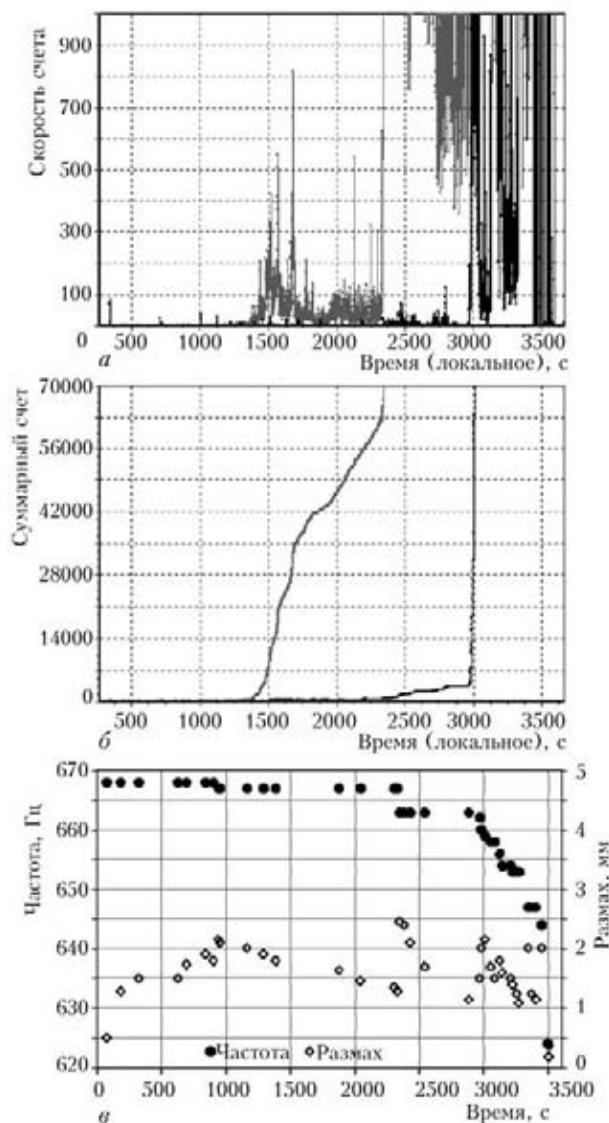


Рис. 7. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а) (един/с), их суммарного счета (б) (един) и режимов второй формы собственных колебаний образца из сплава Д16Т (в) от времени испытания (с)

низкой частоте колебаний, и установлен разрушающий размах колебаний 2,45 мм. При этом скорость счета во втором канале катастрофически возросла и достигла примерно 15000 один/с, а суммарный счет также стал быстро нарастать и вскоре превысил 10^6 один/с. В канале 1 скорость счета заметно увеличилась, два раза постепенно возросла до 100 один/с с последующим убыванием. Начиная с 2970 с образец доводили до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины, что подтверждает падение частоты резонанса, а так же значительным увеличением скорости счета и быстроты изменения суммарного счета в обоих каналах, уровни которых на несколько порядков превышали предыдущие значения. Как и для других металлических образцов, это возрастание, очевидно,

обусловлено трением берегов макротрещины, что подтверждается анализом фрактограммы излома образца.

Анализ разницы времен прихода поступивших сигналов АЭ показал, что для всех испытанных образцов они появляются с частотой нагрузки образца.

Фотографии участков образцов в зоне концентраторов напряжений после испытаний показаны на рис. 8. Виден характер разрушения каждого материала после испытаний. Для Ст3 результирующая макротрещина аналогична показанной на рис. 8, а. Трещина на рис. 8, б имеет классический [3] для высокоскоростного многоциклового усталостного разрушения вид. Для стеклотекстолита (рис. 8, в) характерна ячеистая структура и наличие каркасных волокон, часть из которых не разрушилась в результате испытаний.

Анализ рис. 4–8 позволяет выделить закономерности появления сигналов АЭ и изменения их спектрального состава, обусловленные режимом нагружения и стадией разрушения образца, а также выявить особенности этих закономерностей для материалов Д16Т, Ст3, стеклотекстолита, отражающие неодинаковость процесса усталостной поврежденности и сопоставить эти закономерности с традиционными представлениями о процессе многоциклового усталостного разрушения материала.

1. Для стальных материалов независимо от формы колебания образца процесс появления сигналов АЭ можно разбить на три характерные стадии. Первая стадия (накопление микрповреждений) связана с появлением одиночных сигналов при неразрушающих на макроуровне нагрузках или сразу после установления разрушающей нагрузки (сигналы обусловлены микроразрушениями материала). Вторая стадия (развитие макрповреждения) связана с резким увеличением скорости появления и количества сигналов АЭ при постоянном режиме наружения, что обусловлено зарождением и развитием макротрещины в материале. Третья стадия (долом), как правило, характеризуется лавинообразным увеличением скорости появления и количества сигналов АЭ, сопровождающимся постоянными срывами резонансных колебаний образца. Эта стадия обусловлена трением берегов развитой макротрещины, а в отсутствие трения уровень сигналов может быть значительно ниже, чем на предыдущей стадии. В процессе разрушения материала при постоянном разрушающем режиме часто наблюдалось циклическое изменения, скорости счета (неоднократное увеличение с последующим спадом). Уровень сигналов АЭ на разных стадиях отличается, как правило, на порядки.

2. Для стеклотекстолита сигналы АЭ фиксировали с самого начала нагружения (постоянное накопление разрушения, начиная с малых уровней

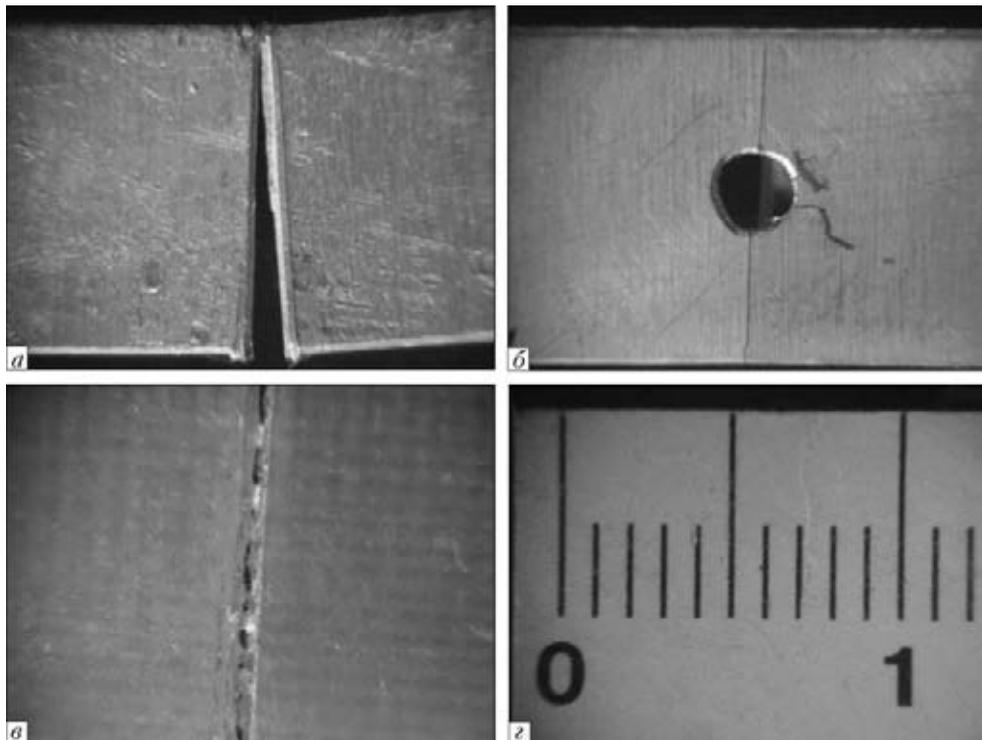


Рис. 8. Образцы после испытаний: а — Д16Т (применена первая собственная форма изгибных колебаний); б — Д16Т (вторая форма); в — стеклотекстолит (первая форма); г — масштабная линейка

нагрузки, характерно для композиционных материалов), а их уровень изменялся циклически (для параметров АЭ, отображающих скорость развития) или ступенчато (для параметров АЭ, отображающих накопление повреждений) в соответствие времени разрушения каждой ячейки материала. Таким образом, стадии появления сигналов АЭ здесь связаны с разрушением отдельных ячеек материала, а уровни нагрузки являются вторичными факторами, влияющими на степень разрушения, но не закономерности разрушения материала.

3. Принципиальных отличий в закономерностях появления сигналов АЭ при нагружении на первой и второй формах колебаний образцов из Д16Т не обнаружено, однако уменьшение объема локализации высоких напряжений при второй форме нагружения образцов приводит к соответствующему уменьшению области накопления усталостных повреждений. В результате значительно уменьшается количество сигналов, поступающих на каналы 1 и 2 на стадии накопления микроповреждений. Стадии, связанные с зарождением и развитием макротрещины, для обоих этих видов нагружения аналогичны.

4. В процессе испытаний наблюдалась неоднократная смена чувствительности каналов 1 и 2 к процессу накопления повреждений в материале, что свидетельствует об изменении спектра частот в процессе разрушения материала. В отдельные моменты чувствительность одного из каналов падала до 0, тогда как на втором активно появлялись сигналы АЭ. Обнаруженный эффект требует даль-

нейших исследований. Возможно, он связан с особенностями колебаний источника АЭ, исследованных нами в работе [13].

5. Сигналы АЭ для всех исследованных материалов появлялись синхронно с частотой возбуждения образца, что подтверждает их природу, обусловленную режимом нагружения.

Выводы

Учет особенностей, в первую очередь для акустического тракта, эксплуатации системы регистрации сигналов АЭ в процессе высокоскоростного циклического консольного изгиба образцов позволяет эффективно ее использовать для выявления сигналов АЭ, сопутствующих разрушению материала при многоциклового усталости.

Параметры АЭ хорошо отражают известные особенности разрушения металлических и композиционных материалов на всех стадиях усталости начиная с микропластического деформирования и заканчивая доломом образца.

Установлено, что для всех исследованных материалов появление сигналов АЭ при высокоскоростном циклическом консольном изгибе образцов независимо от формы колебаний носит периодический характер с периодом, соответствующим частоте нагружения образца.

Выявлено, что спектр сигналов АЭ изменяется в зависимости от стадии разрушения, что необходимо учитывать при обработке принимаемого сигнала для повышения эффективности контроля.

Показано, что уровень сигналов АЭ существенно зависит от стадии разрушения, а также час-



тотного диапазона и может изменяться на шесть и более порядков. При этом наименьший уровень сигналов характерен для стадий накопления повреждений до зарождения макротрещины, на стадии стационарного развития макротрещины уровень сигналов имеет среднюю величину и достигает максимальных значений на стадии долома образца. Это требует обеспечения соответствующего динамического диапазона аппаратуры регистрации и отображения информации.

При установленном режиме нагружения практически во всех испытаниях наблюдалась некоторая цикличность появления сигналов АЭ, заключающаяся в их неоднократном нарастании и спаде при наличии отдельных всплесков активности.

Развитие работ в этом направлении может быть связано с накоплением экспериментальных данных для построения статистически обоснованных корреляционных зависимостей между поврежденностью материала и параметрами АЭ с последующей разработкой на их основе методов оценки состояния материала по результатам измерения параметров АЭ, а также с изучением природы изменения спектра и проявления цикличности при появлении сигналов АЭ.

1. *Неразрушающий контроль*: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. — М.: Машиностроение, 2005. — 829 с.
2. *Безьянный Ю. Г.* Ультразвуковые технологии в материаловедении // Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. — Т. 2. Кн. 2. Материалы и технологии. — Киев: Наук. думка, 2008. — С. 574–584.
3. *Усталостные* испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко // В. А. Кузьменко, Л. Е. Матошно, Г. Г. Писаренко и др. — Киев: Наук. думка, 1979. — 336 с.
4. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
5. *Афанасьев Н. Н.* Статистическая теория усталостной прочности металлов. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 128 с.
6. *Акустическая эмиссия и ее применение в ядерной энергетике* / Под ред. К. Б. Вакара // В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.

7. *Грешников В. А., Дробот Ю. Б.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
8. *Гришаков С. В., Кузьменко В. А., Писаренко Г. Г.* Использование акустической эмиссии для исследования усталости пьезоэлектрической керамики // Докл. II Всесоюз. семинара «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения». — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 458–460.
9. *Долбин Н. А., Довгялло И. Г., Борд В. И.* Влияние внутреннего давления на долговечность и акустическую эмиссию трубок при высокочастотном нагружении // Докл. III Всесоюз. семинара «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения». — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 71–76.
10. *Исследование* процесса высокочастотной усталости конструкционной керамики методом акустической эмиссии / Ю. Г. Безьянный, С. В. Гришаков, В. С. Дробинский, А. Д. Шевчук // Там же. — С. 76–79.
11. *Вакар К. Б.* Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций (1-я Всесоюз. конф.). Ч. 1 — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1989. — С. 106–114.
12. *Буйло С. И.* О связи параметров акустической эмиссии с особенностями кинетики деформации и микроразрушения твердых тел // Там же. — С. 125–132.
13. *Галаненко В. Б., Галаненко Д. В.* К расчету поля локального источника в упругом изотропном слое // Акустический симпозиум «Консонанс-2003» / Зб. праць. — Київ, 2007. — С. 43–48.
14. *Безьянный Ю. Г., Галаненко Д. В.* Развитие акустико-эмиссионного метода для исследования процесса многоциклового усталости материалов // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. — Зб. наук. праць, 2008. — С. 100–106.
15. *Безьянный Ю. Г., Галаненко Д. В.* Адаптация метода акустической эмиссии к усталостным испытаниям материалов на высоких частотах нагружения // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Вип. 14: Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій, 2009. — С. 29–35.
16. *Безьянный Ю. Г., Галаненко Д. В., Колесников А. Н.* Система для выявления сигналов акустической эмиссии в процессе резонансного нагружения образца // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП» / Зб. наук. праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». — 2012. — № 40. — С. 87–96.
17. *Использование* метода акустической эмиссии для исследования усталости материалов в процессе высокоскоростного циклического деформирования / Ю. Г. Безьянный, Д. В. Галаненко, К. А. Комаров, О. В. Талько // Вісн. укр. матеріалознав. тов-ва. — 2012. — Вип. 5. — С. 63–71.
18. *Комплекс* дефектоскопический акустико-эмиссионный «ГАЛС-1». Руководство по эксплуатации «ГАЛС-1». 32828482.001.07РЭ. ЗАО «УкрНИИ НК». Киев, 2007.

Поступила в редакцию
29.10.2012