

УДК 53.08.004, 53.087/.088

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, КАРТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

Панин Сергей Викторович,

д-р. техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение в Машиностроении» Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; зав. лаб. «Механики полимерных композиционных материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Бяков Антон Викторович,

канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: bjakov@ispms.tsc.ru

Любутин Павел Степанович,

канд. техн. наук, мл. науч. сотр. лаб. механики полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4. E-mail: psl@sibmail.com

Сундер Рамасубу,

канд. техн. наук, технический директор Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd (BiSS), Индия, 560094, г. Бангалор, Cross AECS, 41a. E-mail: rs@biss.in

Гренке Виктор Валерьевич,

канд. техн. наук, инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: victor.grenke@gmail.com

Шакиров Игорь Вазирянович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: igor.shakirov@gmail.com

Башков Олег Викторович,

д-р. техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: bashkov_ov@mail.ru

На базе серийной сервогидравлической испытательной машины разработан лабораторный стенд для изучения поведения образцов конструкционных материалов при циклических испытаниях, включающий in situ регистрацию данных тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустической эмиссии. С учетом специфики циклического приложения нагрузки предложены алгоритмы регистрации информации, обеспечивающие синхронизацию фотографирования с нагружением, а также выделения из потока данных только полезных сигналов АЭ. В основу принципа функционирования стенда положено выделение и

совместный анализ характерных стадий изменения информативных параметров: интенсивности деформации сдвига, активности акустической эмиссии и удлинения образца как функции количества циклов нагружения.

Проведено тестирование разработанного стенда при циклическом растяжении образцов сплава В96. Показано, что изменение всех трех информативных параметров (регистрируемых от различных датчиков) во времени характеризуется тремя выраженными стадиями, причем начало стадии III (распространение трещины) четко совпадает по времени для всех проанализированных зависимостей. Несовпадение по времени начала стадии II наиболее вероятно обусловлено двумя причинами: для картирования деформации на поверхности это невысокое разрешение оптической системы, что не позволяет выявить развитие деформации на малых пространственных масштабах; для метода АЭ – чувствительность метода к механизмам деформации только микромасштабного уровня, а также высокая интенсивность деформации в начале циклического нагружения, что при конечной чувствительности АЭ аппаратуры не позволяет фиксировать все «полезные» АЭ сигналы.

Дальнейшее развитие предложенного подхода и стенда для его реализации предполагает использование нескольких датчиков акустической эмиссии для решения задач локации и идентификации источников, использование более высокого разрешения оптической системы для повышения чувствительности оценки деформации оптическим методом.

Ключевые слова:

Обработка изображений, акустическая эмиссия, корреляция цифровых изображений, тензометрия, усталостное разрушение.

Введение

Актуальность изучения механического поведения конструкционных материалов при циклическом нагружении обусловлена, прежде всего, поиском путей повышения усталостной прочности, а также факторов, ее определяющих. Однако проведение усталостных испытаний сопряжено с рядом сложностей, в том числе связанных с выбором и использованием исследовательского оборудования, средств измерения, процедур обработки данных и т. д. Указанная специфика определяется следующими факторами:

- длительностью экспериментов, что, например, в условиях фото (видео) регистрации поверхности нагружаемого образца требует значительных ресурсов памяти;
- значительным уровнем внешних механических шумов и т. п., связанных с непрерывным циклическим движением захватов испытательной машины и работой масляной станции (при использовании акустических методов, в частности акустической эмиссии). Например, авторы работ [1, 2] предлагают различные способы для устранения подобных типов шумов;
- зарождение микротрещин (ы), особенно на ранних стадиях, происходит локально и при малых их размерах сложно выявляется с помощью традиционных методов неразрушающего контроля;
- проведение электронно-микроскопических наблюдений требует извлечения образца из захватов (растровая электронная микроскопия) либо разрушения образца (просвечивающая микроскопия).

Важность получения такой информации, например, для проведения неразрушающего контроля деталей машин и элементов конструкций, стимулирует исследователей создавать новые, в том числе комбинированные методы *in situ* наблюдения и регистрации данных о процессах деформации и разрушения.

В традиционной реализации большинство методов неразрушающего контроля, как правило, позволяют выявлять дефекты (трещины) достаточно большого размера, поэтому более эффективными

являются методы *in situ* мониторинга, например метод акустической эмиссии (АЭ). Так, в литературе активно обсуждается использование метода АЭ для обнаружения несплошностей при искусственном нагружении инспектируемых объектов [3]. Однако, поскольку метод АЭ не является прямым методом измерения деформаций, а также не позволяет идентифицировать (визуально определять) формирующиеся дефекты, практикуют совместное использование нескольких методов, в частности АЭ и тензометрии (либо оптического наблюдения, включающего средства микроскопии).

В работе [4] рассмотрено применение метода АЭ, оптического наблюдения и тензометрии в процессе циклических испытаний планера самолета. В качестве оптического метода применяли визуальный контроль за ростом трещины с помощью эндоскопа, оборудованного черно-белой видеокамерой с разрешением 320×240 пикселей. Однако для проведения более тонких лабораторных испытаний образцов требуется использование точных и локальных методов оценки деформации, реализуемых, в частности, оптическим методом (например, картирование деформации на поверхности [5–7]).

Отметим, что в ТПУ, начиная с 70-х гг. прошлого века под руководством проф. С.Д. Заверткина успешно ведется разработка средств акустико-эмиссионного контроля в приложении к процессам кристаллизации [8]. В частности, был разработан метод синхронной регистрации термостимулированной радиочастотной электромагнитной эмиссии (ТСРЭЭ) и АЭ, основанный на эффекте генерирования радиочастотных электромагнитных импульсов при нагревании дефектных минералов и кристаллов с контролируемой дефектностью. С использованием такого подхода удается установить связь между закономерностями генерирования ТСРЭЭ и АЭ вследствие фазовых переходов в природных и искусственных кристаллах, являющихся диэлектриками.

Ранее коллективом авторов данной статьи был разработан стенд регистрации АЭ для проведения исследований материалов в условиях приложения статических нагрузок (растяжения и трехточечного изгиба), а также было проведено тестирование

этого стенда совместно с оптико-телевизионной измерительной системой TOMSC и анализом данных тензометрии, получаемых с помощью регистрирующего блока испытательной машины INSTRON-5582 [9–11].

Однако применение такого стенда для изучения усталостного разрушения требовало помимо его адаптации к сервогидравлической испытательной машине, существенной доработки аппаратного и программного обеспечения, а также тестирования его функционирования при циклическом растяжении образцов конструкционных материалов. Описанию результатов этих исследований и посвящена настоящая работа.

Разработка структурной схемы и реализация стенда

В работе была поставлена задача на базе промышленной сервогидравлической испытательной машины разработать и протестировать исследовательский стенд для проведения мониторинга усталостного разрушения комбинацией методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии. В состав лабораторного стенда были включены следующие блоки (рис. 1): испытательная машина UTM150 (BiSS, Индия) – 3, фотокамера Canon EOS 450D – 4, стенд регистрации АЭ [10] – 6, 7, персональный компьютер для фиксации, обработки и визуализации данных, а также управления периферийными устройствами – 1.

Регистрация, обработка и анализ записываемых сигналов проводилась по алгоритму, приведенному на рис. 2. При этом принцип действия стенда заключается в следующем. Испытательная машина – 3 реализует циклическое растяжение образца (на рис. 1 обозначен как объект испытаний – 5). С помощью силоизмерителя регистрируется прикладываемая нагрузка, а датчик линей-

ных перемещений измеряет удлинение образца. Данная информация в настоящей работе трактуется как данные тензометрии, которые являются основанием для построения зависимости удлинения образца от времени (рис. 2, блок 4.1).

Для получения оценки деформации методом картирования деформации на поверхности регистрация оптических картин поверхности образца в процессе нагружения проводится с помощью цифровой зеркальной фотокамеры Canon EOS 450D (рис. 1–4), оборудованной длиннофокусным объективом Canon EF-S 55–250mm f/4–5.6 IS. Фотографирование проводилось с интервалом циклической нагрузки 1000 циклов и автоматическим режимом наведения фокуса. С использованием программного обеспечения DVECT [12] проводится расчет компонент деформации, и в частности интенсивности деформации сдвига (рис. 2, блок 4.3).

Спецификой циклических испытаний является регулярное удлинение образца подвижным захватом испытательной машины. По этой причине фотографирование должно быть произведено синхронно с перемещением захвата при минимальном удлинении образца, поскольку только в этом случае удастся оценить его остаточную деформацию. Для решения поставленной задачи была разработана схема синхронизации при фотографировании поверхности образца в процессе приложения циклической нагрузки (рис. 3). Программная реализация для ПЭВМ представленной схемы позволяет автоматически, с учетом данных обратной связи, формировать управляющие сигналы. Отметим, что возможность управлять работой испытательной машины появилась благодаря использованию функции глобального доступа к памяти (Global Data Sharing), которую обеспечивает программное обеспечение контроллера серии 2370SS [13].

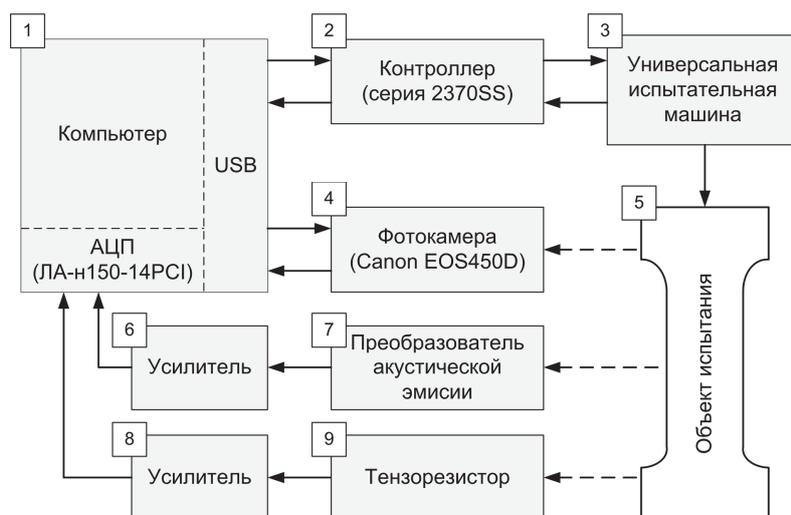


Рис. 1. Блок-схема комплекса для исследования усталостного разрушения комбинацией методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии

Fig. 1. Block-chart for setup for investigation of fatigue fracture by combination of acoustic emission, surface strain mapping and strain gauging



Рис. 2. Блок-схема алгоритма регистрации, обработки и анализа информации в стенде комбинированного исследования усталостного разрушения

Fig. 2. Flow chart of algorithm for registration, processing and information analysis in the setup for combined investigation of fatigue failure

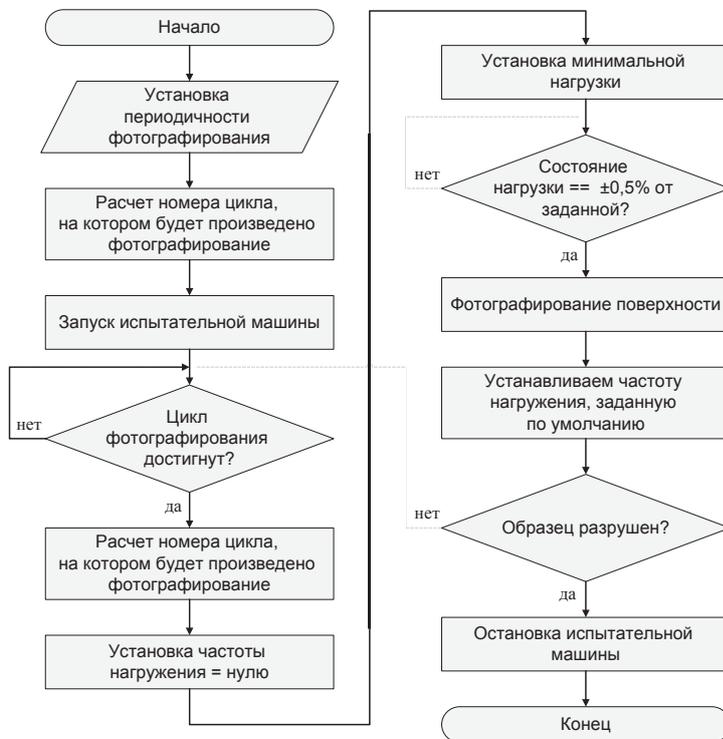


Рис. 3. Блок-схема программы, предназначенной для синхронизации приложения циклической нагрузки и фотографирования образца

Fig. 3. Flow chart of the program for synchronization of applying cyclic loading and specimen capturing

Основными параметрами нагружения, задаваемыми программно перед началом испытаний, являются: максимальная и минимальная сила приложения циклической нагрузки; частота механического циклирования; количество циклов нагружения до остановки испытаний; периодичность по времени фотографирования поверхности образца.

С использованием разработанного программного обеспечения сразу после запуска испытательной машины проводится мониторинг информации, поступающей от контроллера. При достижении заданного количества циклов на контроллер подается управляющий сигнал о снижении частоты циклирования до нуля, что позволяет приостановить перемещение подвижного захвата; следующий за ним сигнал корректирует нагрузку. После того как нагрузка на образце установлена в пределах $\pm 0,5\%$ от заданной величины, приложение подает камере запрос на фотографирование поверхности. Последующий управляющий сигнал инициирует продолжение нагружения с первоначально заданными параметрами.

Поскольку для регистрации изображений поверхности использовали зеркальную фотокамеру Canon, для управления ее работой было разработано программное обеспечение, на основе средств разработчика EDSDK (Canon?). Использование последней позволяет управлять камерой без установки дополнительных драйверов, так как используется стандартный драйвер, входящий в состав ОС Windows. Программное обеспечение для фотографирования поверхности позволяет управлять: чувствительностью камеры; временем выдержки затвора; балансом белого; фокусировкой объектива.

В основу блока регистрации акустической эмиссии был положен разработанный нами ранее [11] стенд регистрации АЭ (рис. 1, блоки 1, 6, 7) с внесенными в него изменениями и модификациями, в которых регистрация АЭ проводилась путем on-line выделения полезных сигналов из потока входных данных.

Запись данных АЭ производится с помощью платы сбора данных; для инициализации ее работы необходимо задать следующие параметры: частоту дискретизации сигнала; количество каналов записи; размер блока данных. Запись данных осуществляется блоками. Перед каждым блоком данных записывается идентификатор и информация о номере и размере блока. Основная роль идентификатора заключается в повышении надежности определения информативных блоков и следующего за ними блока данных. Информация о номере и размере блока данных необходима для последующего восстановления шкалы времени.

Актуальная проблема, решение которой проводилось в работе, была связана со значительным шумовым фоном, возникающим в процессе работы испытательной машины, а также значительным количеством АЭ-сигналов, равных по уровню и даже превышающих полезные сигналы, но по своей природе являющихся помехами. Для исключения

подобных сигналов из рассмотрения авторами был реализован алгоритм фильтрации [14], основанный на анализе энергетического параметра MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope) [15]. По сравнению с методом регистрации сигналов с амплитудной дискриминацией (обнаружение по превышению установленного порога) использование в качестве параметра обнаружения энергетической характеристики более предпочтительно, так как параметр MARSE чувствителен одновременно и к амплитуде, и к длительности сигнала. Кроме того, параметр MARSE менее зависим от установленного порога и частоты, что позволяет относительно легко избавиться от влияния импульсных помех.

Следует отметить, что применение энергетического параметра для выделения сигналов АЭ не является безальтернативным. Так, авторы работ [16–20] для решения подобных задач разработали и успешно применяют в своих исследованиях методы кластеризации на основе различных параметров сигналов АЭ. В следующих работах авторы также планируют использовать более широкий набор параметров для получения более достоверной информации о регистрируемых сигналах АЭ.

Тестирование стенда и результаты эксперимента

Тестирование разработанных аппаратных средств, алгоритмического и программного обеспечения стенда комбинированного исследования усталостного разрушения проводили с использованием образцов алюминиевого сплава В96 с концентратором напряжений в форме центрального отверстия диаметром 6 мм.

Испытания проводили в области малоциклового усталости (долговечность менее 50 тыс. циклов). Фотокамеру устанавливали на штатив, приблизительно на расстоянии 1 м от образца. Частота опроса линейного датчика перемещений составляла 5 кГц. Параметры нагружения приведены в таблице.

Таблица. Параметры циклического нагружения образцов сплава В96

Table. Parameters of cyclic load of V96 alloy samples

Макс./мин. напряжение, МПа max/min stress, MPa	Макс./мин. нагрузка, кН max/min load, kN	Асимметрия цикла Cycle asymmetry	Количество циклов до разрушения Amount of cycles to failure
173/17,3	20,229/2,0229	0,1	~40 000

На рис. 4, а приведено оптическое изображение поверхности образца, отражающее ее состояние на этапе $3 \cdot 10^3$ циклов нагружения. Зарождение усталостной трещины визуально фиксируется лишь при количестве циклов нагружения $N > 30 \cdot 10^3$. Это подтверждается графиком зависимости удлинения образца (l , мм) от времени испытаний (рис. 5, а). Условно последний график можно разбить на три участка (стадии), характеризующиеся различной скоростью удлинения: стадия I характеризуется

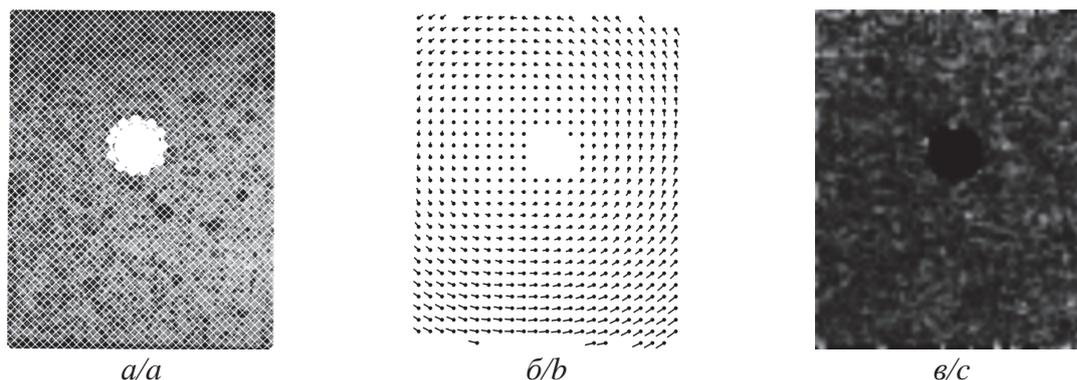


Рис. 4. Оптическое изображение поверхности образца (а), соответствующее ему поле векторов перемещений (б) и распределение интенсивности деформации сдвига (в), полученные и рассчитанные на этапе циклического нагружения равному $3 \cdot 10^3$ циклов

Fig. 4. Optical images of specimen surface (a), corresponding displacement vector field (b) and shear strain intensity (c) calculated at cyclic loading of $3 \cdot 10^3$ cycles

достаточно быстрым ростом трещины (до $N \sim 0.2 \cdot 10^3$ циклов). Стадия II отражает стабильный рост трещины и соответствует большей длительности всего нагружения (до $N \sim 36 \cdot 10^3$ циклов). Наконец, стадия III соответствует катастрофическому росту трещины и составляет менее четверти от общей продолжительности испытаний.

явном виде прослеживается наличие всех трех стадий в изменении параметра γ от времени нагружения, которые с позиции длительности достаточно хорошо коррелируют с результатами данных тензометрии.

На рис. 5, кривая в (\dot{N}_s) приведен график активности АЭ по мере циклического нагружения. Видно, что на нем также четко проявляются три участка, первый из которых длится до $t = 750$ с от начала нагружения, второй до $t = 1750$ с, а третий завершается в момент разрушения. Таким образом, временные границы начала и окончания стадии III по данным тензометрии и акустической эмиссии (равно как и картирования деформации на поверхности) неплохо соответствуют друг другу, что, безусловно, вызвано зарождением и ростом усталостной трещины. Различие во времени начала второй стадии может быть связано с длительным локализованным развитием пластической деформации в небольшой зоне в окрестности отверстия (что должно сопровождаться постепенным снижением активности АЭ в образце). В этом случае имеет место различная чувствительность каждого из методов к (локализованному) развитию деформации на микромасштабном уровне (данные АЭ) и интегральному удлинению образца (данные тензометрии).

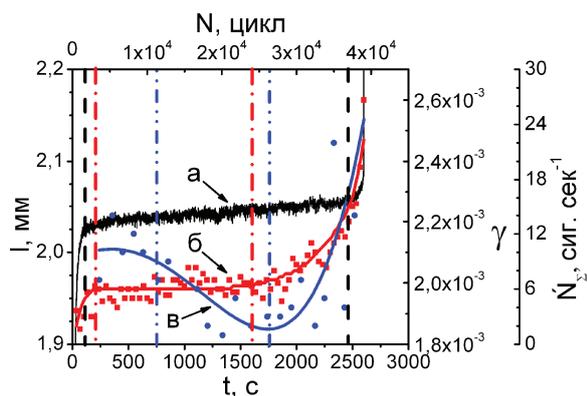


Рис. 5. Временные зависимости данных тензометрии l от t (а), интенсивности деформации сдвига γ от t (б) и активности АЭ \dot{N}_s от t (в)

Fig. 5. Time dependences of strain gauging data l vs t (a), shear strain intensity γ vs t (б) acoustic emission activity \dot{N}_s vs t (в)

На основании построенных полей векторов перемещений (рис. 4, б) были рассчитаны значения интенсивности деформации сдвига γ (график интегрального значения которого показан на рис. 5, кривая б). 2D-картина распределения γ приведена на рис. 4, в. Видно (рис. 5, кривая б), что до момента времени $t = 200$ с она имела минимальное значение. С момента времени $t = 200$ и до $t = 1600$ с величина γ составляла $\gamma \approx 2 \cdot 10^{-3}$. При количестве циклов нагружения $N \sim 30 \cdot 10^3$ начинается заметный рост анализируемого параметра, который перед разрушением достигает максимального значения $\gamma \approx 2,6 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, на указанном графике в

Выводы

На базе серийной сервогидравлической испытательной машины разработан лабораторный стенд для изучения поведения образцов конструкционных материалов при циклических испытаниях, включающий in situ регистрацию данных тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустической эмиссии. С учетом специфики циклического приложения нагрузки предложены алгоритмы регистрации информации, обеспечивающие синхронизацию фотографирования с нагружением, а также выделения из потока данных только полезных сигналов АЭ. В основу принципа функционирования стенда положено выделение и

совместный анализ характерных стадий изменения информативных параметров: интенсивности деформации сдвига, активности акустической эмиссии и удлинения образца как функции количества циклов нагружения.

Проведено тестирование разработанного стенда при циклическом растяжении образцов сплава В96. Показано, что изменение всех трех информативных параметров (регистрируемых от различных датчиков) во времени характеризуется тремя выраженными стадиями, причем начало стадии III (распространение трещины) четко совпадает по времени для всех проанализированных зависимостей. Несоответствие по времени начала стадии II наиболее вероятно обусловлено двумя причинами: для картирования деформации на поверхности это невысокое разрешение оптической системы, что не позволяет выявить развитие деформации на малых пространственных масштабах; для метода АЭ – чувствительность метода к механизмам деформации только микромасштабного уровня, а

также высокая интенсивность деформации в начале циклического нагружения, что при конечной чувствительности АЭ аппаратуры не позволяет фиксировать все «полезные» АЭ сигналы.

Дальнейшее развитие предложенного подхода и стенда для его реализации предполагает использование нескольких датчиков акустической эмиссии для решения задач локации и идентификации источников, использование более высокого разрешения оптической системы для повышения чувствительности оценки деформации оптическим методом и использование контактного датчика раскрытия трещины, а также расчет параметра COD (смещение раскрытия трещины) для увеличения точности оценки локальной деформации в области концентратора напряжений.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, а также гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ «Школа академика В.Е. Панина» № 2817.2014.1 (2014–2015 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. – 2010. – V. 28. – P. 109–119.
2. Barat V., Grishin D., Rostovtsev M. Detection of signals against background friction noise. Journal of Acoustic Emission. – 2011. – V. 29. – P. 133–141.
3. Акустико-эмиссионный контроль криволинейных панелей фюзеляжа самолета RRJ при ресурсных испытаниях / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, О.В. Митрофанов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 42–47.
4. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при проверке остаточной прочности самолета / А.Н. Серьезнов, Степанова Л.Н., А.Б. Тихонравов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 28–35.
5. James M.R., Morris W.L., Cox B.N. A High Accuracy Automated Strain-Field Mapper. // Experimental Mechanics. – 1990. – № 30. – P. 60–67.
6. Chivers K.F., Clocksin W.F. Inspection of surface strain in materials using optical flow // Eleventh British Machine Vision Conference. – Bristol, September 2000. – P. 392–401.
7. Lin Q., Labuz J.F. Identifying quasi-brittle fracture by AE and digital imaging // Journal of Acoustic Emission. – 2011. – V. 29. – P. 68–77.
8. Заверткин С.Д. Электромагнитная и акустическая эмиссия при фазовых переходах в минералах и гетерогенных материалах: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. –Томск, 2011. – 46 с.
9. Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионными методами / С.В. Панин, А.В. Бяков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, С.А.К. Юсиф // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 6. – С. 63–72.
10. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals / S.V. Panin, A.V. Biakov, M.S. Kuzovlev, V.V. Grenke, I.V. Shakirov, V.B. Ovechkin // Proceedings IFOST'2009. Ho Chi Ming City, Vietnam, 21–23 October, 2009. – V. 3. – P. 202–206.
11. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии / С.В. Панин, А.В. Бяков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, О.В. Башков // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 115–128.
12. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004612276. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.10.2004 / Любутин П.С., Панин С.В., Сапожников С.В., Сырякин В.И. Программа построения векторов смещений и оценки деформаций поверхностей твердых тел.
13. Sunder R. Recent developments to improve the quality and economics of testing for fatigue and fracture // Strength of Materials. – 2009. – V. 41. – № 1. – P. 8–19.
14. Куликов Д.А., Харитонов К.О., Чье Ен Ун. Обнаружение импульсов акустической эмиссии и обеспечение единого времени в системе сейсмоакустического контроля горного давления // Измерительная техника. – 2007. – № 2 (14). – С. 109–119.
15. ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004. – 64 с.
16. Barat V.A., Alyakritskiy A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data // Journal of Acoustic Emission. – 2008. – V. 26. – P. 132–141.
17. Crack growth monitoring with hierarchical clustering of AE / N.F. Ince, Chu-Shu Kao, M. Kaveh, A. Tewfik, J.F. Labuz // Journal of Acoustic Emission. – 2009. – V. 27. – P. 167–185.
18. Разработка метода кластеризации по параметрам сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, К.В. Канифадин, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов // Дефектоскопия. – 2010. – № 2. – С. 78–89.
19. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, В.В. Кириченко // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44–49.
20. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Динамическая кластеризация по набору параметров сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 12–16.

Поступила 01.04.2013 г.

UDC 53.08.004, 53.087/.088

TEST BENCH FOR FATIGUE FAILURE INVESTIGATION BY COMBINATION OF ACOUSTIC EMISSION, SURFACE STRAIN MAPPING AND TENSOMETRY

Sergey V. Panin,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia;
Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Anton V. Byakov,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: bjakov@ispms.tsc.ru

Pavel S. Lyubutin,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: psl@sibmail.com

Ramasubbu Sunder,

PhD, Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd (BiSS), 41a, Cross AECS,
Bangalore, 560094, India. E-mail: rs@biss.in

Viktor V. Grenke,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: viktor.grenke@gmail.com

Igor V. Shakirov,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: igor.shakirov@gmail.com

Oleg V. Bashkov,

Dr. Sc., Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenin avenue,
Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: bashkov_ov@mail.ru

Based on industrial servohydraulic testing machine the authors have designed a laboratory setup for studying behavior of structural material samples under cyclic testing. It includes in situ strain gauging data registration, surface strain mapping and acoustic emission data. Taking into account cyclic pattern of loading application the algorithms for information acquisition were offered that provides synchronization of surface image capturing with loading as well as detecting acoustic emission signals from input data flow. The operation principle of the setup is underlined by detecting and joint analysis of characteristic stages of informative parameters changing: shear strain intensity, acoustic emission activity and specimen elongation as a function of number of loading cycles.

The authors tested the setup designed under tension of A7075 alloy specimens. It is shown that changing of all three informative parameters (registered by three different sensors) in time is characterized by 3 pronounced stages. The beginning of the III stage (crack propagation) coincides well for all three dependences. Difference in time of the II stage beginning is most probably related to a couple of reason. For surface strain mapping it is governed by low resolution of optical system that does not allow revealing deformation development at low spatial scales. For acoustic emission method it is associated with sensitivity of the technique to deformation mechanisms of microscale level as well as high deformation intensity at the onset of cyclic loading. If this takes place finite sensitivity of AE equipment did not allow registering all informative acoustic emission signals.

The development of the offered technique and the setup is related to use of several AE sensors for solving the problems of AE source location and identification. The optical sensors of higher resolution will be attracted as well in order to increase sensitivity of strain measurement by optical technique.

Key words:

Image processing, acoustic emission, digital image correlation, strain gauging, fatigue.

The research was supported by the program of basic scientific studies of the RF state academies of sciences for 2013–2020 and the grant of the President of the RF for support of leading scientific schools «Scholl of academician V.E. Panin» No. 2817.2014.1 (2014–2015).

REFERENCES

1. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, vol. 28, pp. 109–119.
2. Barat V., Grishin D., Rostovtsev M. Detection of signals against background friction noise. *Journal of Acoustic Emission*, 2011, vol. 29, pp. 133–141.
3. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Mitrofanov O.V. Akustiko-emissionnyy kontrol krivolineynykh paneley fyuzelyazha samoleta RRJ pri resursnykh ispytaniykh [Acoustic-emission inspection of curved panels of fuselage of RRJ aircraft under resource testing]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2008, no. 12, pp. 42–47.
4. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Tikhonravov A.B. Ispolzovanie metoda akusticheskoy emissii i tenzometrii pri proverke ostatochnoy prochnosti samoleta [Application of acoustic emission technique at inspection of an aircraft residual strength]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2008, no. 2, pp. 28–35.
5. James M.R., Morris W.L., Cox B.N. A High Accuracy Automated Strain-Field Mapper. *Experimental Mechanics*, 1990, no. 30, pp. 60–67.
6. Chivers K.F., Clocksin W.F. Inspection of surface strain in materials using optical flow. *Eleventh British Machine Vision Conference*. Bristol, September 2000. pp. 392–401.
7. Lin Q., Labuz J.F. Identifying quasi-brittle fracture by AE and digital imaging. *Journal of Acoustic Emission*, 2011, vol. 29, pp. 68–77.
8. Zavertkin S.D. *Elektromagnitnaya i akusticheskaya emissiya pri fazovykh perekhodakh v mineralakh i geterogennykh materialakh*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Electromagnetic and acoustic emission under phase transitions in mineral and heterogeneous materials. Dr. Sc. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
9. Panin S.V., Byakov A.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Jussif S.A.K. Mnogomasshtabnoe issledovanie stadiynosti lokalizovannoy plasticheskoy deformatsii pri rastyazhenii obraztsov splava D16AT s nadrezami akustiko-emissionnym i optiko-televizionnym metodami [Multiscale investigation of stage pattern of localized plastic deformation under tension of A2024 alloy specimens with notches by acoustic emission and television-optical methods]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2009, vol. 12, no. 6, pp. 63–72.
10. Panin S.V., Biakov A.V., Kuzovlev M.S., Grenke V.V., Shakirov I.V., Ovechkin B.B. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals. *Proceedings IFOST'2009*. Ho Chi Ming City, Vietnam, 21–23 October 2009. Vol. 3, pp. 202–206.
11. Panin S.V., Byakov A.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Bashkov O.V. Razrabotka i ispytanie laboratornogo stenda registratsii i analiza dannyykh akusticheskoy emissii [Development and testing of laboratory setup for registration and analysis of acoustic emission data]. *Avtometriya – Autometry*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 115–128.
12. Lyubutin P.S., Panin S.V., Sapozhnikov S.V., Syryamkin V.I. *Programma postroeniya vektorov smeshcheniya i otsenki deformatsiy poverkhnostey tverdykh tel* [Program for constructing displacement vectors and estimation of surface deformation of solids]. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM – Certificate for official registration software for PC no. 2004612276, 2004.
13. Sunder R. Recent developments to improve the quality and economics of testing for fatigue and fracture. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, no. 1, pp. 8–19.
14. Kulikov D.A., Kharitonov K.O., Che En Un. Obnaruzhenie impulssov akusticheskoy emissii i obespechenie edinogo vremeni v sisteme seysmoakusticheskogo kontrolya gornogo davleniya [Revealing acoustic emission pulses and providing unite time in a system for seismic inspection of mine pressure]. *Izmeritel'naya tekhnika – Measuring equipment*, 2007, no. 2 (14), pp. 109–119.
15. PB 03–593–03. *Pravila organizatsyi i provedeniya akustiko-emissionnogo kontrolya sudov, apparatov, kotlov i tekhnologicheskikh truboprovodov* [Rules for organizing and carrying out acoustic emission inspection of vessels, apparatus, boilers and technological pipelines]. St. Petersburg, DEAN Publ., 2004. 64 p.
16. Barat V.A., Alyakritskiy A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data. *Journal of Acoustic Emission*, 2008, vol. 26, pp. 132–141.
17. Ince N.F., Chu-Shu Kao, Kaveh M., Tewfik A., Labuz J.F. Crack growth monitoring with hierarchical clustering of AE. *Journal of Acoustic Emission*, 2009, vol. 27, pp. 167–185.
18. Stepanova L.N., Kanifadin K.V., Ramazanov I.S., Kabanov S.I. Razrabotka metoda klasterizatsii po parametram signalov akusticheskoy emissii [Development of method for clusterization over parameters of acoustic emission signals]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2010, no. 2, pp. 78–89.
19. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V., Kireenko V.V. Ispolzovanie dvukhetapnoy klasterizatsiyi signalov akusticheskoy emissii dlya opredeleniya defektov svarki [Application of two-stage clusterization of acoustic emission for detecting defects of welding]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2011, no. 6, pp. 44–49.
20. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V. Dinamicheskaya klasterizatsiya po naboru parametrov signalov akusticheskoy emissii [Dynamic clusterization by set of parameters of acoustic emission signals]. *Kontrol. Diagnostika – Inspection. Diagnostics*, 2012, no. 10, pp. 12–16.

Received: 01 April 2013.