

**Применение метода главных компонент
к исследованию сигналов акустической эмиссии
в алюминиевых сплавах***

А.А. Дмитриев¹, В.В. Поляков^{1,2}, Д.Д. Рудер¹

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

**Application of Principal Component Analysis
to Investigation of Acoustic Emission Signals
in Aluminum Alloys**

A.A. Dmitriev¹, V.V. Polyakov^{1,2}, D.D. Ruder¹

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch
of the RAS (Tomsk, Russia)

Проведено акустико-эмиссионное исследование алюминиевых сплавов, подвергнутых испытаниям на статическое растяжение. Часть исследованных образцов содержала в рабочей части сварное соединение, что давало возможность выявить влияние на акустическую эмиссию дефектов, сосредоточенных в зоне сварного шва. При испытаниях определялись напряжения и степени деформации, по которым строились кривые деформационного упрочнения, а также скорости счета акустической эмиссии. Для анализа деформационных процессов весь интервал деформаций разделялся на две области, первая из которых содержала стадии упрочнения, соответствовавшие равномерной пластической деформации, а вторая — стадии с неустойчивостью пластического течения и предразрушением. Виды зависимостей скорости счета акустической эмиссии от степени деформации для однородных образцов и образцов со сварными соединениями существенно различались, что отражало влияние высокой дефектности зоны соединения.

При проведении обработки экспериментальных данных с помощью метода главных компонент в качестве информативных параметров применялись коэффициенты дискретного вейвлет-разложения акустико-эмиссионного сигнала. Эти коэффициенты рассчитывались для отдельных малых интервалов, на которые разбивалась кривая деформационного упрочнения. Результаты обработки представлялись в виде проекций на плоскости первых главных компонент. Расчеты, проведенные для второй области

In this paper, an acoustic emission study of aluminum alloys subjected to static tension testing is conducted. Some of the test samples have welded joints in the test area. Influence of defects concentrated in a welded joint on acoustic emission signals is studied. The values of deformation stress and degree are used to construct the strain hardening curves and the acoustic emission count rate. Two areas of each strain hardening curve are analyzed. The first area corresponds to the stage of plastic yielding caused by uniform plastic deformation, while the second area corresponds to stages of discontinuous plastic deformation and fracture. The forms of acoustic emission count rates for solid and welded samples are significantly different due to highly defective structures in the welded joints.

Discrete wavelet transform coefficients are used as informative features of an acoustic emission signal. These coefficients are calculated for separate small intervals dividing the strain hardening curve. Principal component analysis (PCA) is utilized to process wavelet decomposition coefficients. The processing results are presented in the form of projections on first principal components planes. The calculations performed for the second area of each loading curve demonstrate that the acoustic emission signals of homogeneous samples and samples containing a welded joint are split into two linearly separated clusters. This indicates that proposed method provides an effective separation of signals produced in materials with different structures.

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №17-08-00914.

кривой нагружения, показали, что акустико-эмиссионные сигналы однородных образцов и образцов, содержащих сварное соединение, сформировали два линейно разделявшихся кластера. Это свидетельствовало об эффективном разделении с помощью использованного метода сигналов, формировавшихся в материалах с различной структурой.

Полученные результаты могут быть использованы при акустико-эмиссионной диагностике деформационного поведения и структуры изделий, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварные соединения, акустическая эмиссия, дискретное вейвлет-разложение, метод главных компонент.

DOI 10.14258/izvasu(2018)1-02

Введение

Конструкционные алюминиевые сплавы широко используются в современном авиа- и автомобилестроении, где к их механическим и прочностным свойствам предъявляются повышенные требования. При диагностике свойств получаемых из этих сплавов изделий наряду с вихретоковыми, рентгеновскими и ультразвуковыми методами применяется метод акустической эмиссии [1–5]. Этот метод основан на регистрации характеристик акустического излучения, возникающего при локальной перестройке внутренней структуры материала в условиях воздействия внешними механическими полями. Измеряемые характеристики акустической эмиссии зависят от протекающих деформационных процессов и возникающих изменений структуры. Развитие метода и расширение его возможностей может быть достигнуто за счет математической обработки регистрируемых акустико-эмиссионных сигналов с помощью аппарата многомерного анализа данных [6]. В настоящей работе рассматривается подход, основанный на привлечении для такой обработки метода главных компонент [7].

Материалы и эксперимент

В качестве материала для испытаний использовались отожженные образцы алюминиевого сплава AlMg5, часть из которых содержала сварное соединение. Образцы со сварным соединением выступали в качестве практически важного и распространенного случая изделий, сложная форма которых достигается за счет соединения отдельных элементов. Одновременно они выступали в качестве удобных модельных объектов материала с четко локализованной дефектной областью. В процессе нагружения в области сварного шва возникают значительные градиенты упругих напряжений, релаксация которых приводит к преждевременному трещинообразованию и разрушению.

Obtained results can be used for acoustic-emission testing of deformation behavior and structure of products made with aluminum alloys.

Key words: aluminum alloys, acoustic emission, discrete wavelet transform, principal component analysis.

Нагружение осуществлялось в «жесткой» испытательной машине по схеме статического растяжения. Сами образцы имели стандартную форму для таких испытаний с размером рабочей части 50x15x5 мм, в группе сварных образцов шов располагался посередине рабочей части и перпендикулярно оси растяжения. В процессе испытаний измерялись приложенная нагрузка и абсолютная деформация, по которым строились кривые деформационного упрочнения в координатах «условное напряжение σ — условная степень деформации ϵ ».

В качестве физических характеристик акустической эмиссии использовалась скорость счета \dot{N} . Выбор этой величины был обусловлен тем, что она непосредственно связана с интенсивностью потока актов акустической эмиссии, которая, в свою очередь, используется для физического анализа локальной перестройки структуры материала при моделировании процессов пластической деформации и разрушения [8]. Величины \dot{N} рассчитывались по акустико-эмиссионному сигналу и анализировались в виде зависимостей от степени деформации ϵ .

Метод обработки сигналов акустической эмиссии

Информативными параметрами, используемыми при обработке регистрировавшихся сигналов, выступали коэффициенты многоуровневых дискретных вейвлет-разложений этих сигналов [9–11]. Эти коэффициенты рассчитывались по методике, описанной в [2], для отдельных малых интервалов, на которые разбивалась вся кривая деформационного упрочнения. Совокупность полученных коэффициентов характеризовала весь процесс деформации образца вплоть до его разрушения или выделенный участок кривой, соответствовавший исследуемым стадиям деформационного упрочнения.

Для анализа полученных указанным способом величин привлекался метод главных компонент

[6, 7]. Согласно этому методу информативные параметры, рассчитанные для отдельных интервалов кривой нагружения, рассматривались как точки многомерного пространства. Выявление латентных закономерностей, которым подчинялись эти параметры, осуществлялось за счет перехода к системе координат, обеспечивавшей снижение размерности исходного пространства. Эта система координат строилась таким образом, что ее первая ось (компонента ГК1) была ориентирована в направлении максимального разброса экспериментальных точек, вторая ось (компонента ГК2) — в направлении разброса точек, следующего по величине за максимальным, и так далее. Результаты расчетов представлялись в виде проекций многомерных данных на плоскости первых главных компонент. Каждая точка на такой проекции описывала акустико-эмиссионный сигнал на отдельном интервале разбиения кривой нагружения, при этом близкие по виду сигналы образовывали кластеры из близко расположенных точек.

Экспериментальные результаты

Типичные результаты механических испытаний приведены на рисунке 1 (рис. 1а — кривая дефор-

мационного упрочнения для образца с однородной структурой, рис. 1б — для образца со сварным соединением). Как видно из рисунка 1, влияние макроscopicких дефектов, связанных со сварным швом, приводило к понижению предельных значений напряжения и деформации. Для удобства анализа экспериментальные кривые нагружения условно разделялись на две области, первая из которых (область А на рисунке 1) содержала стадии упрочнения, соответствовавшие равномерной пластической деформации, а вторая (область В) — стадии неустойчивостью пластического течения и его локализацией [3, 4], характерные для алюминиевых сплавов при достаточно больших деформациях. Для образцов со сварным соединением вторая область также включала в себя стадию с процессами предразрушения, проявившимися в преждевременном по сравнению с однородным материалом образованием и развитием микро-трещин в зоне сварного шва.

На рисунке 2 приведены типичные экспериментальные зависимости для скоростей счета акустической эмиссии (рис. 2а — образец с однородной структурой, рис. 2б — образец со сварным соединением). Из рисунка 2 следует, что кривая $\dot{N} - \varepsilon$ имеет вид,

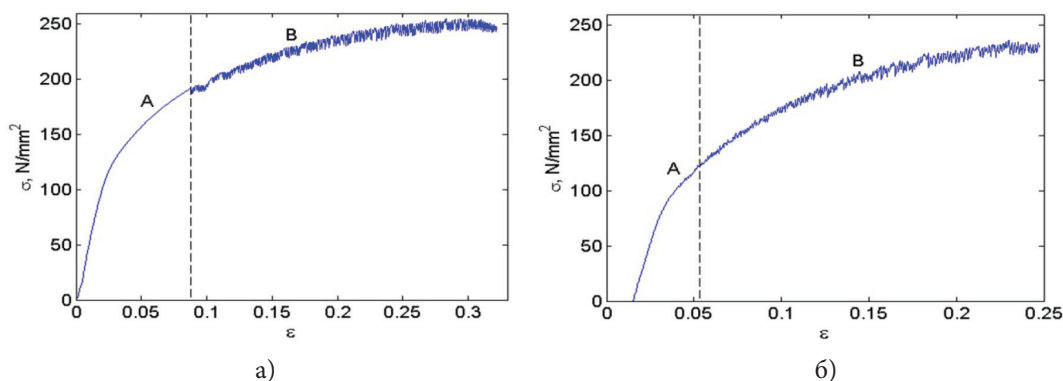


Рис. 1. Деформационное упрочнение алюминиевых сплавов: а — образцы с однородной структурой; б — образцы со сварным соединением. А — область равномерной пластической деформации; В — область неустойчивой пластической деформации и предразрушения

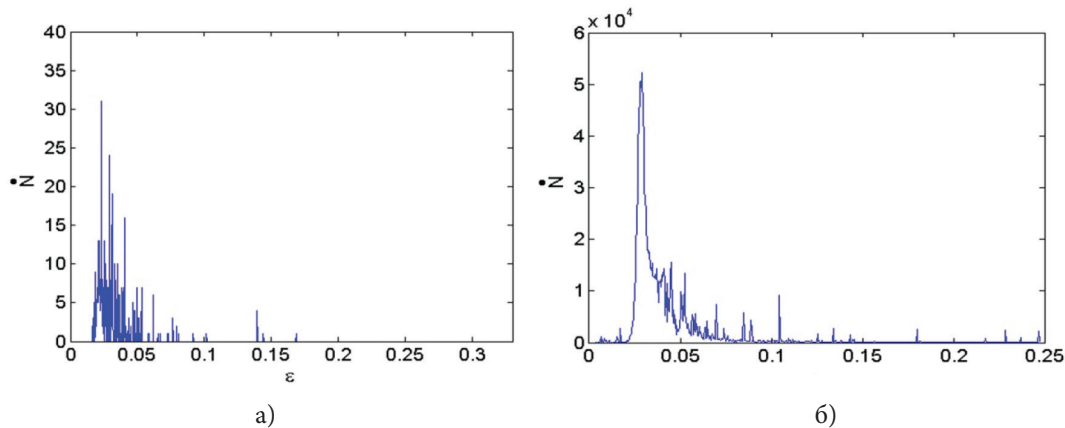


Рис. 2. Акустическая эмиссия в алюминиевых сплавах: а — образцы с однородной структурой; б — образцы со сварным соединением

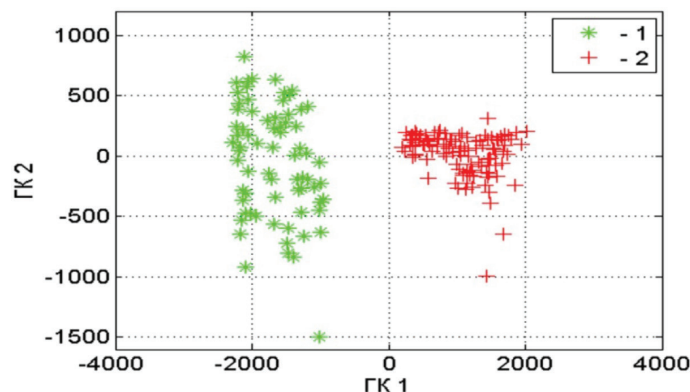


Рис. 3. Проекция информативных параметров акустической эмиссии в алюминиевых сплавах на плоскость первых главных компонент:

1 — образцы с однородной структурой; 2 — образцы со сварным соединением

сходный с максимумом, который приходится на участок предела текучести. Сопоставление рисунков 2а и 2б свидетельствует о существенном различии скоростей счета при нагружении образцов с разной структурой. Для сварных образцов значения \dot{N} гораздо больше по величине, что отражает определяющий вклад в акустическую эмиссию структуры сварного шва. Кроме того, изменяется вид кривой $\dot{N} - \varepsilon$, на спадающей ветви которой в случае сварных образцов появлялись локальные всплески значительной амплитуды. По-видимому, выявленные различия связаны с формированием акустических сигналов на границах макро- и мезодефектов сварного соединения, а также с дополнительным вкладом при образовании и развитии системы микротрещин в зоне шва.

Результаты расчета по методу главных компонент

Проведенные измерения показали, что для первой области А кривой нагружения, отражавшей процессы равномерной деформации, различия в поведении механических и акустико-эмиссионных характеристик относительно менее существенны, чем для второй области В. В связи с этим обработка информативных параметров по методу главных компонент проводилась для второй области, соответствовавшей процессам неустойчивого пластического течения и предразрушения. Математической обработке подвергались информативные параметры для групп из 3–5 однородных и сварных образцов. Результаты применения

метода главных компонент представлены на рисунке 3 (точки 1 описывают однородные образцы, точки 2 — образцы со сварными швами). Как следует из рисунка 3, на плоскости первых главных компонент наблюдалось отчетливое линейное разделение точек на два кластера, один из которых описывал образцы с однородной структурой, а другой — образцы, содержавшие сварные соединения. Это свидетельствует об эффективном разделении с помощью использованного метода акустико-эмиссионных сигналов, формировавшихся при деформационных процессах в материалах с различной структурой.

Заключение

В работе рассмотрены возможности использования метода главных компонент для математической обработки сигналов акустической эмиссии, возникающих при механическом нагружении алюминиевых сплавов с различной структурой. В качестве информативных параметров, характеризующих акустическую эмиссию, привлекались коэффициенты многоуровневых дискретных вейвлет-разложений регистрируемых сигналов. Показано, что предложенный подход позволил количественно выявить особенности акустической эмиссии, отражавшие различия в процессах пластической деформации и разрушения в материале с различной структурой. Полученные результаты могут быть применены при диагностике и контроле изделий на основе алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Chen C., Kovacevic R., Jandric D. Acoustic emission in monitoring quality of stir welweld in friction stir welding // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA). — 2003.
2. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Колубаев А.А. Диагностика алюминиевых сплавов со сварными соединениями на основе анализа сигналов акустической эмиссии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2017. — Т. 14, №4.

3. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевого сплава // Физика металлов и металлургия. — 1996. — Т. 81, вып. 1.
4. Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А. Акустическая эмиссия при распространении полосы Людерса в сплаве АМг6 // Вестник Тамбовского гос. ун-та. — 2010. — Т. 15, вып. 3.
5. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Скачкообразная деформация и импульсная акустическая эмиссия при нагружении алюминиево-магниевого сплава // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2014. №1/2. DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.2-36.
6. Esbensen K. H. Multivariate Data Analysis — In Practice. CAMO Process AS. — 2002.
7. Egorov A.V., Polyakov V.V. The Application of Principal-Component Analysis during Eddy-Current Testing of Aluminum Alloys // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2015. — Vol. 51.
8. Polyakov V.V., Egorov A.V., Lependin A.A. Modeling plastic deformation and fracture of porous materials // Technical Physics Letters. — 2005. — Vol. 31, N 2.
9. Mallat S. Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press. — 2009.
10. Marec A., Thomas J.-H., Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2008. — Vol. 22.
11. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebello J.M.A., Siqueira M.H.S. Failure mechanism characterisation in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals // Insight. — 2004. — Vol. 46.