

УДК 539.42

Дмитриев А.А.¹, Поляков В.В.^{1,2}, Колубаев Е.А.^{2,3}

ДИАГНОСТИКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СО СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

На основе метода акустической эмиссии проведено исследование алюминий-магниевого сплава, полученных с помощью сварки трением с перемешиванием. Образцы сплавов подвергались испытаниям на статическое растяжение с одновременной регистрацией среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, приложенной нагрузки и степени деформации. Сварные соединения, располагавшиеся в рабочих частях образцов, специально получались с помощью различных технологических режимов. Это обеспечивало формирование в зоне соединения дефектов структуры, вызывавших трещинообразование и преждевременное разрушение. Для нагружаемого материала выявлены стадии пластической деформации, включавшие в себя стадии равномерной деформации, стадию локализации пластического течения вследствие явления прерывистой текучести и стадию предразрушения.

В качестве информативных характеристик акустической эмиссии были использованы коэффициенты дискретного 9-уровневого вейвлет-разложения акустико-эмиссионного сигнала. Эти величины описывали низкочастотную форму регистрировавшихся сигналов и отражали их энергетические и частотные особенности. Для анализа информативных характеристик проводилась их обработка с помощью метода главных компонент, обеспечившая кластеризацию полученных данных. Предложенный подход позволил разделить кластеры сигналов, соответствовавшие разным стадиям деформационного упрочнения. Выявлены и описаны существенные различия сигналов акустической эмиссии, связанные с образованием в зоне сварных соединений высокодефектной структуры при отклонениях от оптимального технологического режима сварки. Показано, что применение в качестве релевантных характеристик коэффициентов вейвлет-разложения регистрируемых сигналов с их последующей обработкой на основе математического аппарата многомерного анализа данных расширяет возможности акустико-эмиссионной диагностики.

Полученные результаты могут быть использованы при контроле с помощью метода акустической эмиссии сварных соединений в изделиях из алюминиевых сплавов, подвергнутых воздействию внешних нагрузок.

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

Dmitriev A.A.¹, Polyakov V.V.^{1,2}, Kolubaev E.A.^{2,3}

DIAGNOSTICS OF ALUMINUM WELDED ALLOYS BASED ON ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

Based on the acoustic emission method, aluminum-magnesium alloys with welded joints was investigated. Rms voltage of the acoustic emission, the applied load and the degree of deformation was registered in process static tensile loading of alloy samples. Welded joints of aluminum samples were manufactured using various technological modes. The aluminum samples obtained had a different defectivestructure in the weld region. Different stages of plastic deformation were observed during the loading of an aluminum sample.

Coefficients of 9-level discrete wavelet transform used for new informational features of emission signal. The calculated coefficients describe the low-frequency form of the signals and reflect their energy and frequency features. The obtained wavelet decomposition coefficients were processed using principal component analysis. It is shown that the proposed approach made it possible to separate the signals formed at different stages of plastic deformation and fracture. Significant differences in the acoustic emission signals are associated with the formation of a highly defective structure in the welded joint, deviating from the optimal welding process. The use of the coefficients of wavelet decompositions of the acoustic emission signals with the subsequent processing based on the mathematical apparatus of multidimensional data analysis extends the possibilities of acoustic emission diagnostics.

The obtained results can be used for acoustic-emission diagnostics of welded joints in aluminum alloys products under external loads.

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

Введение

Среди конструкционных материалов, применяемых в авиа- и автомобилестроении, широко распространены алюминиевые сплавы. При их использовании для изготовления различных изделий часто применяются сварочные технологии. Получаемые изделия отличаются значительной неоднородностью структуры на участках сварных соединений, содержащих большое количество различных дефектов [1, 2]. Под действием внешних механических воздействий, возникающих при эксплуатации изделий, возле этих дефектов формируются трещины, что становится причиной преждевременного разрушения. Наличие сварных соединений предъявляет повышенные требования к методам диагностики структуры и прочностных свойств. Наряду с такими методами контроля, как вихретоковые, рентгеновские и ультразвуковые [3], определенными достоинствами обладает метод акустической эмиссии [4]. Этот метод основан на регистрации характеристик акустического излучения, возникающего при локальной перестройке внутренней структуры в условиях развития в материале деформационных процессов.

Изменяемые характеристики акустической эмиссии определяются физическими источниками излучения, действие которых, в свою очередь, зависит от конкретных механизмов пластической деформации и разрушения. В случае материалов с резко неоднородной структурой вклады в регистрируемые акустико-эмиссионные сигналы одновременно вносят различные конкурирующие источники и механизмы [5]. Как следствие, выявление протекающих в материале деформационных процессов и возникающих изменений структуры вызывает значительные трудности, что снижает надежность и эффективность акустико-эмиссионной диагностики. Для того, чтобы избежать указанных недостатков, применяются различные методы математической обработки энергетических и частотных характеристик акустико-эмиссионных сигналов. В настоящей работе для выявления связи между физическими процессами, развивающимися в нагружаемом материале, и регистрируемыми сигналами предлагается подход, основанный на использовании проекционных методов многомерного анализа данных с привлечением аппарата вейвлет-разложений. В качестве конкретных матери-

алов исследованы образцы алюминий-магниевого сплава, содержащие сварные соединения, полученные при различных технологических режимах.

1. Материалы и проведение эксперимента

Непосредственные измерения проводились для образцов алюминий-магниевого сплава AlMg5M. Объединение элементов из этого сплава осуществлялось с помощью сварки трением с перемешиванием [6]. В процессе сварки в материале возникали значительные градиенты температуры и деформации, приводившие к резкой неоднородности структуры и формированию в зоне соединения различных дефектов (пор, микротрещин, инородных включений). С целью изучения возможностей предлагаемого метода диагностики специально задавались различные режимы сварки. Именно, при основном режиме, обеспечивавшем наиболее прочное соединение, скорость вращения инструмента составляла 560 об/мин, прикладываемое к соединяемым элементам усилие – 2600 кг, скорость подачи вращающегося инструмента – 500 мм/мин (режим 1). При режимах, обеспечивавших заведомое формирование дефектной структуры сварного соединения, указанные параметры составляли соответственно 560 об/мин, 2600 кг, 700 мм/мин (режим 2) и 560 об/мин, 2100 кг, 500 мм/мин (режим 3).

Образцы имели стандартную плоскую форму для испытаний на статическое растяжение, размер рабочей части составлял 50x15x5 мм. Сварное соединение располагалось в центре рабочей части. Микроструктура сварных соединений изучалась с помощью послойного металлографического анализа. Анализ структуры показал, что в зоне сварного шва располагались макроскопические дефекты в виде системы пор (рис.1).

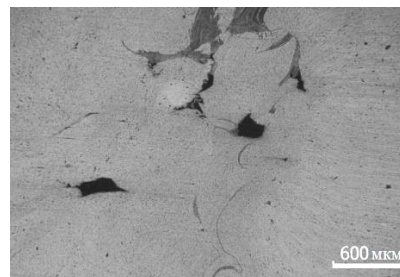


Рис.1. Микроструктура поперечного сечения сварного соединения

Растяжение образцов осуществлялось на установке механических испытаний с постоянной скоростью деформирования. В процессе нагружения определялись значения приложенной нагрузки и степени деформации, по которым рассчитывались кривые деформационного упрочнения в координатах «напряжение σ – деформация ϵ ». Вид этих кривых был качественно аналогичен кривым нагружения сплошных алюминий-магниевого сплавов, для которых характерна локализация деформации в связи с явлением прерывистой текучести [7]. В области пластической деформации для всех исследованных образцов отчетливо выделялись следующие стадии: стадия линейного упрочнения А, стадия параболического упрочнения В с равномерной пластической деформацией, стадия упрочнения с неустойчивостью пластического течения С и стадия предразрушения D, характеризовавшаяся образованием и быстрым распространением магистральной трещины. Такое поведение материала обусловлено физическими процессами, протекавшими в сплошных областях. Влияние сварного шва весьма существенно и проявлялось на кривых σ - ϵ прежде всего резким уменьшением предельных значений напряжения и деформации. Очевидно, что это связано с формированием в зоне сварного соединения макроскопических дефектов, возле которых возникала повышенная концентрация упругих напряжений, приводившая к преждевременному трещинообразованию.

В качестве характеристик, описывавших акустическое излучение, выступали среднеквадратичные значения напряжения акустической эмиссии. Акустико-эмиссионные сигналы регистрировались на автоматизированной установке с частотой дискретизации 2,5 МГц в частотном интервале от 50 до 700 кГц одновременно с измерениями механических величин. Акустическая эмиссия характеризовалась непрерывным спектром и существенным изменением вида сигналов при переходе от одной стадии нагружения к другой. Именно, пластическое течение сопровождалось формированием пика акустической эмиссии на стадии А, который связан с движением дислокационных потоков на сплошных участках образца в условиях пластического течения [8]. На стадиях В и С возникали высокоамплитудные осцилляции и всплески акустико-эмиссионных сигналов, обусловленные формированием и последующим развитием полос локализованной деформации.

На стадии предразрушения D акустическая эмиссия для режима 1 характеризовалась пиком, отвечавшим распространению магистральной трещины. Для образцов, изготовленных на основе режимов 2 и 3, наблюдалось несколько таких пиков, что отражало возникновение возле краев крупных пор нескольких магистральных трещин [9, 10].

2. Метод анализа характеристик акустической эмиссии

Информативные параметры акустической эмиссии отражали изменения в протекании пластической деформации и разрушения, обусловленные различиями в дефектной структуре сварного соединения вследствие смены технологических режимов изготовления образцов. Традиционные методы анализа акустико-эмиссионных сигналов, основывающиеся на анализе числа импульсов, амплитудного или частотного спектра [11-13], не позволяют при проведении диагностики выявить количественную связь между деформационными процессами и характеристиками регистрируемого сигнала. В связи с этим был использован подход, заключающийся в математической обработке сигналов и включавший в себя ряд последовательных этапов.

На первом этапе весь зарегистрированный в процессе нагружения сигнал разбивался на интервалы, соответствовавшие временным блокам длительностью 10^7 отсчетов сигналов. Каждый блок обрабатывался с помощью многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования [13], при этом непосредственно привлекалось 9-уровневое вейвлет-разложение по базису вейвлет-функций Добеши [14]. Полученные коэффициенты вейвлет-разложений для низкочастотных фильтров обрабатывались далее с помощью преобразования Гильберта [15, 16]. Рассчитанные значения описывали огибающую для выделенного блока акустико-эмиссионных сигналов, они использовались в качестве новых информативных признаков акустической эмиссии.

На втором этапе коэффициенты, рассчитанные для отдельных блоков и формировавшие вектора признаков, рассматривались как точки многомерного пространства. Для выявления латентных закономерностей привлекался метод главных компонент [17, 18], в котором результаты расчетов графически представля-

лись в виде проекций многомерных данных на плоскости первых главных компонент. Каждая точка на получаемой проекции соответствовала одному блоку сигнала, при этом блоки с близкими свойствами образовывали кластеры из точек, расположенных в одной области. Такое представление позволяло проанализировать связь между регистрировавшимися сигналами и протекавшими при нагружении деформационными процессами.

3. Результаты расчетов

Типичные результаты расчетов, описывавшие все стадии от начала растяжения до разделения образца, представлены на рис.2 на плоскости двух первых главных компонент PC1 и PC2. Рис.2а иллюстрирует основной режим 1, рис.2б и рис.2в – режимы 2 и 3 соответственно. Каждая из точек на рис.2 изображает энергетические и частотные характеристики одного блока длительностью ~ 0,4 сек., выделявшегося из всего сигнала и отражавшего процессы на

соответствующем участке кривой нагружения. Как видно из рис.2, все точки отчетливо разделились на две группы: кластер перекрывающихся точек 1, относящихся к стадиям пластической деформации А, В, С, и точки 2, описывавшие быстро развивавшийся процесс разрушения (стадия D). Большой разброс точек 2 связан с увеличением мгновенных значений регистрировавшегося на стадии D сигнала, что приводило к увеличению коэффициентов вейвлет-разложения. В целом существенно разное расположение точек 1 и 2 отражало различия в характеристиках акустико-эмиссионного сигнала на разных стадиях нагружения, обусловленные сменой доминирующих физических механизмов, определявших деформационные процессы на этих стадиях. В качестве таких механизмов на стадиях пластической деформации выступает движение дислокационных потоков и развитие полос локализованной деформации, а на стадии предразрушения – скачки распространявшихся трещин.

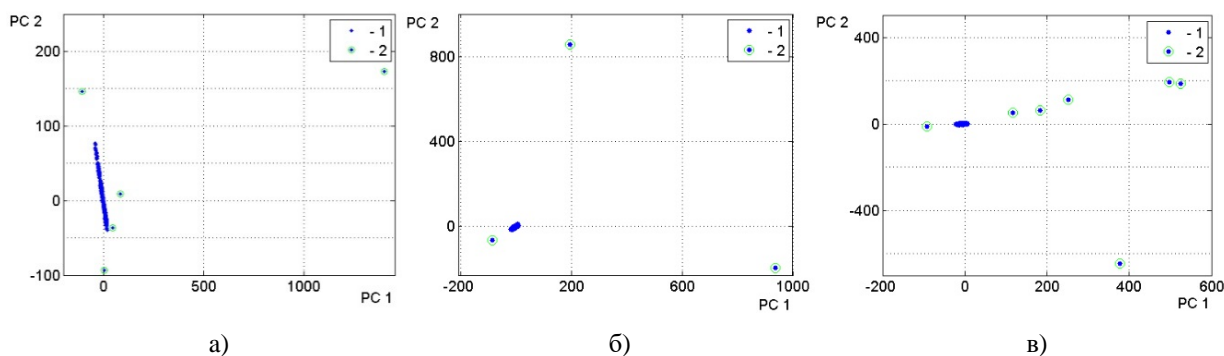


Рис.2. Проекция характеристик сигнала акустической эмиссии на плоскость первых главных компонент при растяжении алюминий-магниевого сплава со сварным соединением. а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3; 1 – стадии пластической деформации А, В, С, 2 – стадия предразрушения D

При диагностике особое значение имеет выявление процессов, предвещающих разрушение, то есть происходящих на стадиях пластического течения. С этой целью изложенный подход был применен к анализу той части сигнала акустической эмиссии, которая регистрировалась на стадиях пластической деформации и сформировала кластер 1 на рис.2. Полученные результаты приведены для трех режимов сварки на рис.3. Как видно из рис.3, для всех режимов наблюдалось разделение точек на три кластера, каждый из которых описывал одну из трех стадий А, В и С. Отличительной особенностью рис.3а, описывавшего режим 1 с прочным сварным соединением, являлось то, что эти

кластеры практически не перекрывались. Это означало, что на стадиях А, В и С действуют различные источники акустического излучения, что, в свою очередь, отражало смену доминирующих механизмов пластической деформации при росте нагрузки. На рис.3б и 3в группы точек, описывавших сигналы на разных стадиях, заметно перекрывались. Такой вид кластеров, по-видимому, свидетельствовал, что при переходе от одной стадии к другой для образцов, содержащих дефектные сварные соединения, одновременно действовало несколько различных источников акустического излучения без доминирования какого-либо одного из них. Это может быть связано с тем, что при большом ко-

личестве дефектов в области сварного соединения пластическая деформация осуществлялась за счет одновременных вкладов от нескольких конкурирующих механизмов, в частности, об-

разование системы микротрещин начиналось на более ранних стадиях деформационного упрочнения.

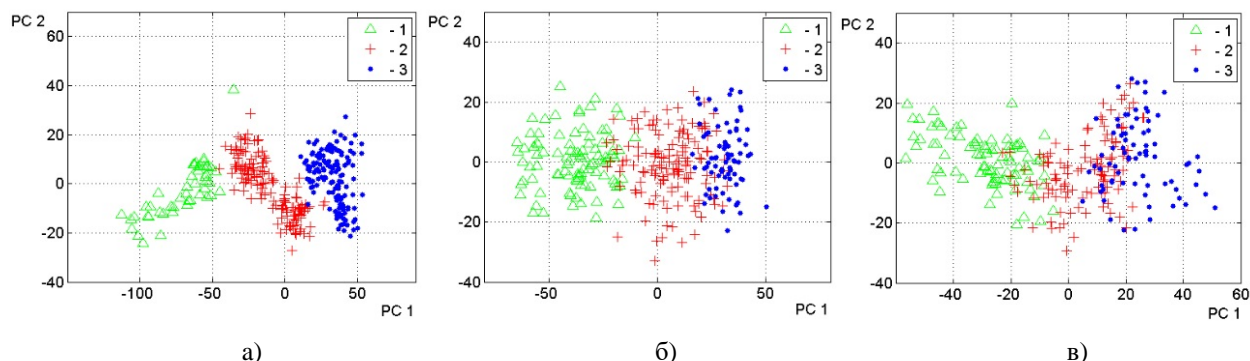


Рис.3. Проекция характеристик сигнала акустической эмиссии на плоскость первых главных компонент при растяжении алюминий-магниевых сплавов со сварным соединением в области пластической деформации. а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3; 1 – стадия А, 2 – стадия В, 3 – стадия С

Заключение

В работе описан метод акустико-эмиссионной диагностики материалов со сварными соединениями в условиях статического нагружения. Диагностика основана на использовании в качестве информативных признаков акустической эмиссии коэффициентов многоуровневых дискретных вейвлет-разложений регистрируемых сигналов и их последующей кластеризации с помощью метода главных компонент. Применение такой процедуры дало возможность установить связь между акустико-эмиссионными сигналами и особенностями пластической деформации и разрушения в исследуемом материале на разных стадиях нагружения. На примере алюминий-магниевых сплавов со сварными соединениями показано, что предложенный подход позволил диагностировать протекавшие деформационные процессы, а также контролировать состояние сварных соединений, формировавшихся при различных технологических режимах сварки.

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

Список используемой литературы

1. Threadgill P.L., Leonard F.J., Shercliff Y.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys // *International Materials Reviews*. 2009. V.54. Is.2. P. 49-93.

2. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering: R*. 2005. V.50. P. 1-78.

3. Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S., Kolubaev E.A., Psakhie S.G., Chernyavskii A.G., Vorobei I.V. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // *Defence Technology*. 2015. V.11. P. 99-103.

4. Chen C., Kovacevic R., Jandric D. Acoustic emission in monitoring quality of stir weld in friction stir welding // *4th International Symposium on Friction Stir Welding*. Utah (USA), 2003.

5. Lependin A.A., Polyakov V.V. Scaling of the Acoustic Emission Characteristics during Plastic Deformation and Fracture // *Technical Physics*. 2014. V.59. Is.7. P. 1041-1045.

6. Polyakov V.V., Kolubaev E.A., Salita D.S., Dmitriev A.A., and Lependin A.A. Fracturing Behavior of Aluminum Alloys with Welded Joints // *AIP Conference Proceedings*. 2015. V.1683. P. 0201861-0201864.

7. Кристал М.М., Меерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминий-магниевых сплавов. // *Физика металлов и металловедение*. 1996. т.81. в.1. С. 156-162.

8. Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А. Акустическая эмиссия при распространении полосы Людерса в сплаве АМгб // *Вестник Тамбовского государственного университета*. 2010. т.15. в.3. С. 1269-1273.

9. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Скачкообразная деформация и импульсная

- акустическая эмиссия при нагружении алюминево-магниевого сплава // Известия Алтайского государственного университета. 2014. в.2. С. 207-210.
10. Горбатенко В.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. Неустойчивость пластического течения: полость Чернова-Людерса и эффект Портевена-Ле Шателье // Журнал технической физики. 2017. т.87. в.3. С. 372-377.
11. 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. V.22. Is.6. P. 1441-1464.
12. Yang L., Zhou Y.C., Mao W.G., Lu C. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings // Applied Physics Letters. 2008. V.93. Is.23. P. 2319061-2319063.
13. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebelo 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. V.46. Is.5. P. 282-289.
14. Mallat S. Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, 2009. 795 p.
15. Hamdi E., Le Duff A., Laurent S. Acoustic emission pattern recognition approach based on Hilbert-Huang transform for structural health monitoring in polymer composite materials // Applied Acoustics. 2013. V.74. P. 746-757.
16. Shahri M.N., Jalal Yousefi J., Fotouhi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // Journal of Composite Materials. 2015. V.50. Is. 14. P. 1897-1907.
17. Esbensen K.H. Multivariate Data Analysis – In Practice. CAMO Process AS, 2002. 160 p.
18. 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. V.51. Is.10. P. 633-638.
- ¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.
- ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
- ³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

Подписано в печать 24.11.17.

Сведения об авторах

Дмитриев Александр, ст. преподаватель АлтГУ, dmitriev@asu.ru

Поляков Виктор Владимирович, д.ф.-м.н., профессор АлтГУ, НИ ТПУ, pvv@asu.ru

Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., зав. лабораторией ИФПМ СО РАН, НИ ТПУ, eak@ispms.tsc.ru