

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ

На основе метода акустической эмиссии проведено исследование образцов алюминиево-магниевого сплава, полученных с помощью сварки. Образцы сплава, содержащих сварные соединения, подвергались испытаниям на статическое растяжение с одновременной регистрацией характеристик акустической эмиссии и механических параметров нагружения. В качестве информативных признаков акустической эмиссии использовались коэффициенты многоуровневого дискретного вейвлет-разложения. Эти коэффициенты характеризовали низкочастотную форму регистрировавшихся акустико-эмиссионных сигналов. Метод главных компонент применялся для уменьшения размерности обрабатываемых акустико-эмиссионных данных, необходимого для последующего анализа введенных информативных признаков. Показано, что предложенный подход позволил разделить сигналы, формировавшиеся на отдельных стадиях пластической деформации материала. Выявлены и описаны различия в характеристиках акустико-эмиссионных сигналов, описывавших эти стадии. Полученные результаты могут быть использованы при акустико-эмиссионной диагностике изделий из металлических сплавов, содержащих элементы со сварными соединениями, находящиеся в условиях внешних механических нагрузок. Применение алгоритмов многомерного анализа данных и цифровой обработки сигналов, оптимизированных под параллельные вычисления, способствует разработке новых методов быстрой акустико-эмиссионной диагностики сварных соединений.

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

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 полей, возникающих при эксплуатации изделий, возле этих дефектов формируются трещины, что становится причиной преждевременного разрушения. Это предъявляет повышенные требования к диагностике структуры и прочностных свойств. Наряду с такими традиционными методами диагностики, как вихретоковые, рентгеновские и ультразвуковые методы [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 вкладки 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 цифровой обработки сигналов акустической эмиссии, использующие математический аппарат временного и частотного анализа сигналов. Основной целью данной обработки является, прежде всего, получение новых информативных признаков, описывающих сигнал на определенной стадии пластического течения. В ряде работ в качестве характеристик напрямую используются амплитуда сигнала, его энергия, число импульсов акустической эмиссии относительно заданного порога, время нарастания импульса акустической эмиссии [6-8]. Особенностью подобных признаков является то, что они рассчитываются непосредственно по мгновенным значениям сигнала акустической эмиссии и зависят от способа получения этого сигнала при диагностике. К другим методам обработки сигналов акустической эмиссии относится преобразование Фурье. Применение данного метода позволяет судить о частотных составляющих сигнала и получать информацию о его спектре [9]. Однако в силу нестационарности сигнала акустической эмиссии использование

преобразования Фурье достаточно ограничено и не позволяет получать точную информацию о частотных особенностях на локальных участках сигнала. Поэтому ряд исследователей применяет более сложные методы обработки [10, 11], такие как методы оконного преобразования Фурье, преобразования Гильберта–Хуанга, вейвлет-преобразования. Подобные методы позволяют анализировать частотные изменения на различных масштабах, учитывая локальные особенности сигнала.

Вычисление информативных характеристик сигнала акустической эмиссии с помощью методов временной и частотной обработки сигнала приводит к формированию массива больших данных. Для уменьшения размерности обрабатываемых данных и определения релевантных признаков акустической эмиссии, количественно связанных с деформационным поведением материала, привлекается аппарат многомерного анализа данных [7]. Применение алгоритмов многомерного анализа данных и цифровой обработки сигналов, оптимизированных под параллельные вычисления, способствует разработке новых методов быстрой акустико-эмиссионной диагностики сварных соединений.

В настоящей работе для диагностики деформационных процессов, развивающихся в материале со сварными соединениями, применяется подход, основанный на использовании аппарата вейвлет-разложений для отдельных временных блоков регистрируемых акустико-эмиссионных сигналов. Получаемые таким способом векторы признаков анализируются с помощью метода главных компонент. В качестве конкретных материалов для испытаний используются образцы алюминий–магниевого сплава, содержащие сварные соединения.

1. Материалы и экспериментальный метод

В качестве материала для испытаний использовался алюминий–магниевый сплав AlMg5M. Структура и деформационное поведение этого материала в однородном состоянии изучались достаточно подробно [12, 13]. Эффективным способом объединения элементов из этого сплава в конструкцию является сварка трением с перемешиванием [4], которая и использовалась в настоящей работе для создания сварных соединений. В процессе такой сварки в материале возникают значительные градиенты температуры и деформации, приводящие к резкой неоднородности структуры и формированию в зоне соединения различных дефектов.

Образцы были подготовлены для испытаний на статическое растяжение, их длина составляла 160 мм, размер рабочей части составлял 50x15x5 мм. Сварное соединение располагалось в центре рабочей части перпендикулярно оси растяжения. Микроструктура сварных соединений изучалась с помощью металлографического анализа. С этой целью специально приготавливались послойные металлографические шлифы по сечению сварных швов. Как показали металлографические исследования, в зоне сварного шва отчетливо наблюдаются крупные дефекты в виде пор неправильной формы. Возле этих пор при нагружении образца возникала повышенная концентрация упругих напряжений, релаксирующая путем образования системы микротрещин.

Изготовленные образцы подвергались статическому растяжению на установке механических испытаний с постоянной скоростью растяжения. При измерениях регистрировались приложенная нагрузка P и абсолютное удлинение Δl , по которым рассчитывались напряжение $\sigma = P/S$ в истинных значениях, где S – текущая площадь поперечного сечения образца, и истинная (логарифмическая) деформация

$$\varepsilon = \ln(1 + \Delta l / l).$$

Для выделения стадий деформационного упрочнения рассчитывался в истинных координатах коэффициент деформационного упрочнения K :

$$K = d\sigma / d\varepsilon.$$

Границы стадий упрочнения определялись по виду зависимостей $K(\varepsilon)$.

Одновременно с механическими характеристиками по методике [14] измерялись сигналы акустической эмиссии. При измерениях использовался датчик акустической эмиссии GT-301, работавший в диапазоне частот 50 Гц ... 500 кГц. Частота дискретизации сигналов акустической эмиссии определялась техническими характеристиками аналогово-цифрового преобразователя экспериментальной установки и составляла 2.5 МГц. В качестве параметров, характеризующих акустические сигналы, использовались среднеквадратичные напряжения U_e . Для удобства анализа

экспериментальных зависимостей непосредственно использовалось отношение U_e/U_n , где U_n – значение шума, измеренное в ненагруженном состоянии.

2. Экспериментальные результаты

Полученные типичные экспериментальные данные, характеризующие механическое поведение образцов со сварными соединениями, приведены на рисунке 1 в виде деформационных кривых $\sigma(\epsilon)$ и зависимостей $K(\epsilon)$.

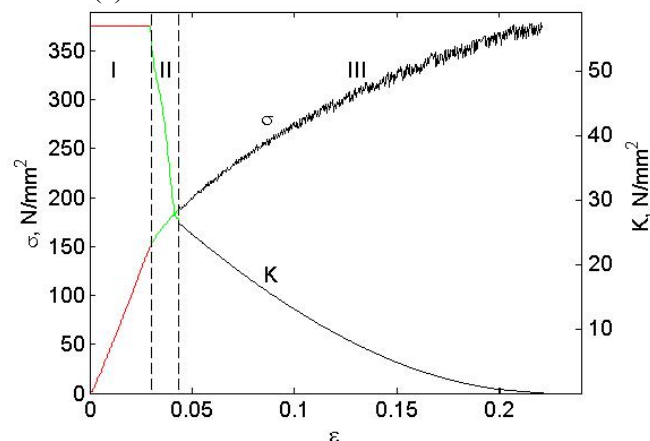


Рис. 1. Деформационное упрочнение алюминиево-магниевого сплава со сварным соединением: I, II, III – стадии пластической деформации

Как видно из рисунка 1, в области пластической деформации можно было выделить несколько стадий. Именно, после перехода к пластическому течению для всех образцов выделялись стадия линейного упрочнения I и две стадии параболического упрочнения II и III, различавшиеся по поведению коэффициента деформационного упрочнения K.

Первая и вторая стадии были связаны с макроскопически равномерной пластической деформацией. Особенностью деформационного поведения алюминиево-магниевого сплава является неустойчивость пластического течения при нагружении, проявляющаяся в виде явления прерывистой текучести с локализацией деформации в полосах Портевена–Ле Шателье [15, 16]. Эта неустойчивость определяет поведение наиболее длительной третьей стадии, особенности которой наглядно проявляются на кривой $\sigma(\epsilon)$ в виде характерных скачков напряжения. В конце третьей стадии происходит формирование системы микротрещин и быстрое разрушение при распространении магистральной трещины.

Результаты измерений акустической эмиссии приведены на рисунке 2.

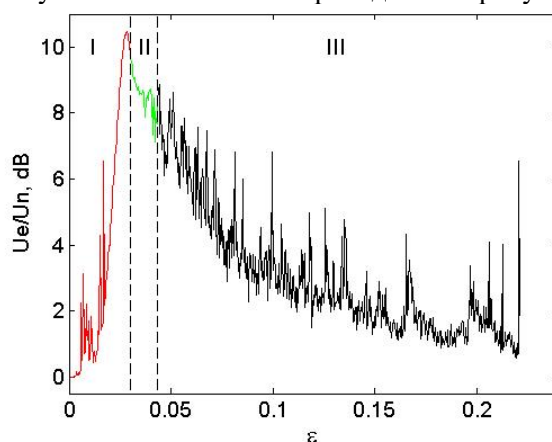


Рис. 2. Акустическая эмиссия для алюминиево-магниевого сплава: I, II, III – стадии пластической деформации

Акустическая эмиссия сварных образцов характеризовалась непрерывным спектром и существенным изменением вида сигналов при переходе от одной стадии нагружения к другой. Именно, на стадии I пластическое течение сопровождалось формированием пика акустической эмиссии. Этот максимум может быть связан с выходом на границы раздела дислокационных

потоков в условиях монотонного накопления деформации. На стадии II наблюдались высокоамплитудные осцилляции, что может быть связано с началом формирования полос локализованной деформации. В области прерывистой текучести на стадии III появлялись мощные всплески сигналов различной амплитуды, отражавшие скачки упругого напряжения при развитии полос Портевена–Ле Шателье [15]. С позиций мезоскопического описания акустическое излучение для этой стадии связано с одновременным протеканием процессов равномерной деформации и ее локализацией вследствие явления прерывистой текучести [15].

3. Вейвлет-преобразование сигналов акустической эмиссии

Приведенные на рисунке 2 результаты показывают, что вид сигналов акустической эмиссии отражает протекавшие в материале деформационные процессы. В то же время при практической диагностике материалов обычно используется сигнал малой длительности, описывающий текущее нагруженное состояние. Использовать подобный сигнал для выявления стадии упрочнения и действующих на данной стадии процессов весьма затруднительно. В связи с этим в настоящей работе был использован подход, заключающийся в обработке регистрируемых сигналов с помощью вейвлет-преобразования. Результат обработки характеризовал форму акустико-эмиссионных сигналов на соответствующем участке кривой упрочнения. Получаемые массивы экспериментальных данных далее обрабатывались на основе математического аппарата многомерного анализа данных [17]. Последовательность этапов использованного подхода заключалась в следующем. На первом этапе обработки весь зарегистрированный за время нагружения сигнал, включавший в себя 10^9 дискретных отсчетов и соответствовавший интервалу деформаций от начала растяжения ($\epsilon=0$) до разрушения образца, разбивался на отдельные временные блоки длительностью 10^7 отсчетов. Каждый такой блок характеризовал поведение материала на определенном участке кривой $\sigma(\epsilon)$, совокупность всех блоков описывала всю кривую деформационного упрочнения. Выбор размера блока определялся требованиями, с одной стороны, сохранения характерных особенностей сигнала, с другой стороны – уменьшением массива обрабатываемых экспериментальных данных.

Для извлечения из акустико-эмиссионного сигнала признаков, адекватно описывавших его частотные и энергетические особенности, применялось многоуровневое дискретное вейвлет-преобразование [18, 19]. При выборе преобразования учитывалось, что регистрируемые сигналы отражали не только процессы акустического излучения, но и всевозможные искажения, вносимые при распространении упругих колебаний в образце и возникавшие вследствие высокочастотных резонансных колебаний пьезодатчика, шумов экспериментальной установки и случайных процессов различной природы.

Дискретное вейвлет-преобразование является одним из методов частотной обработки сигнала, в основе которого лежит одновременная фильтрация сигнала низкочастотным и высокочастотным фильтрами, построенными на основе заданной вейвлет-функции:

$$y_l[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[k] \cdot g[n-k],$$

$$y_h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[k] \cdot h[n-k].$$

Здесь y_l и y_h коэффициенты многоуровневого вейвлет-разложения для низкочастотного и высокочастотного фильтров соответственно, g и h – значения коэффициентов низкочастотного и высокочастотного фильтров, X – обрабатываемый дискретный сигнал, k – индекс, определяющий дискретное значение сигнала.

На этапе обработки, заключающемся в построении векторов признаков для временных блоков, рассчитывались коэффициенты y_l , характеризовавшие низкочастотную форму сигнала. Отметим, что при этом обеспечивалось подавление высокочастотных составляющих. При проведении расчетов к отдельным блокам, на которые разбивался экспериментальный сигнал, применялось 9-уровневое дискретное вейвлет-разложение по базису вейвлет-функций Добеши [20]. Уровень разложения определялся по минимальной погрешности, вносимой численными расчетами [21].

Как показано на рисунке 3, для всех возможных уровней вейвлет-декомпозиции рассчитывалось значение энергии коэффициентов низкочастотного фильтра. При увеличении

уровня разложения значения этой энергии снижаются вследствие уменьшения количества обрабатываемых данных и сглаживающего действия низкочастотного фильтра, при приближении к максимальному уровню декомпозиции значения коэффициентов аппроксимации искажаются численными расчетами. Уровень разложения определяется минимальным значением энергии для кривой (рис. 3), при котором коэффициенты аппроксимации характеризуют форму сигнала без внесения дополнительных искажений.

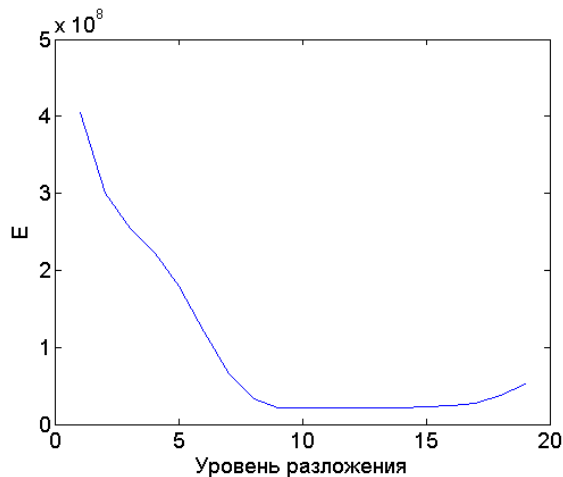


Рис. 3. Определение уровня разложения

На втором этапе обработки к полученным коэффициентам вейвлет-разложения применялось преобразование Гильберта [22]. В основе преобразования Гильберта лежит такая фильтрация дискретного сигнала $X(k)$, результатом которой является получение значений $X_g(k)$ с исходной амплитудой и фазой, смещенной на $\pi/2$. С помощью преобразования Гильберта для коэффициентов $y_i[n]$ строились значения $y_g[n]$ с исходной амплитудой и фазой, смещенной на $\pi/2$. Значения мгновенной амплитуды, описывавшие огибающую для данного блока исходных сигналов, представлялись в следующем виде:

$$E[n] = \sqrt{y_i^2[n] + y_g^2[n]}.$$

Совокупность коэффициентов $E[n]$, являвшихся новыми информативными характеристиками акустической эмиссии, формировала вектора признаков. Получаемые данные представлялись в виде матрицы, строками которой были номера блоков сигнала, а столбцами - соответствующие вектора признаков.

4. Применение метода главных компонент

Для выявления связи коэффициентов $E[n]$ с деформационной структурой образцов со сварными соединениями был привлечен метод главных компонент [17, 23]. Согласно этому методу вектор признаков, описывавший выделенный блок сигналов, рассматривался как точка многомерного пространства. Все вектора признаков задавали совокупность точек, описывавших весь зарегистрированный сигнал. Выявление закономерностей в расположении этих точек осуществлялось за счет перехода к системе координат, обеспечивавшей снижение размерности исходного пространства. Новая система координат строилась таким образом, что ее первая ось (компонента ГК1) ориентировалась в направлении максимального разброса экспериментальных точек, вторая ось (компонента ГК2) ориентировалась в направлении разброса точек, следующего по величине за максимальным, и так далее. Применяемое в случае метода главных компонент преобразование может быть записано в виде [23]

$$X = T \cdot P' + M,$$

где матрица X – массив исходных данных, характеризующих исследуемые свойства, матрица «остатков» M – массив данных, непосредственно с исследуемым свойством не связанных и образующих «шум». Матрицы так называемых счетов T и нагрузок P (P' – транспонирование матрицы P) определяют пространство главных компонент. Группы точек, описывавших блоки с

близкими свойствами, располагаются в многомерном пространстве вблизи друг от друга и образуют кластеры [24].

Описанный подход применялся на заключительном этапе обработки акустико-эмиссионного сигнала. Для определения максимального числа возможных главных компонент (обозначенных через ГК1, ..., ГК9 на рисунке 4) использовались значения объясненной дисперсии, вычислявшейся по массиву данных M [24]. Согласно рисунку 4 первая главная компонента описывала $\sim 25\%$ изменений в данных, все последующие компоненты вносят примерно одинаковый вклад $\sim 4\%$. Это означает, что при анализе с помощью метода главных компонент было достаточно использовать две первых главных компоненты.

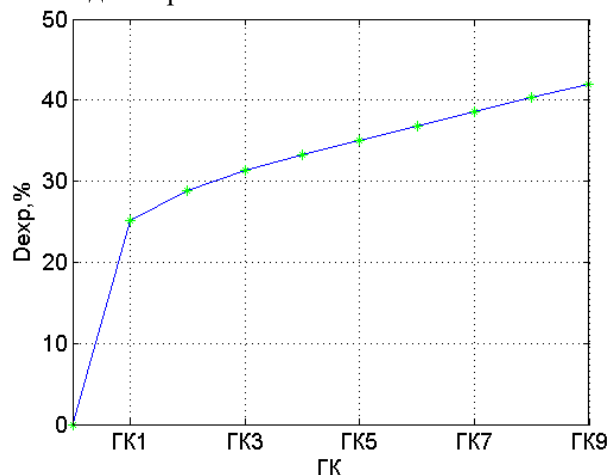


Рис. 4. Зависимость объясненной дисперсии от числа главных компонент

Проецирование векторов признаков в пространство низкой размерности с помощью метода главных компонент приводило к уменьшению размеров обрабатываемых данных. Многопараметрические векторы признаков проецировались на плоскость, образованную первыми двумя компонентами. На плоскости главных компонент проекции векторов признаков были представлены отдельными точками. Представление проекций информативных параметров в таком виде упрощало последующий анализ на кластеризацию проекций информативных параметров и установление количественной связи между отдельной точкой на плоскости и определенной стадией пластической деформации материала.

При построении математической модели из матрицы признаков были выбраны блоки акустико-эмиссионного сигнала, регистрировавшиеся на стадиях развитой пластической деформации II и III. Это было обусловлено тем, что при малой деформации упругие напряжения возле границ раздела малы и влияние дефектной структуры сварных швов относительно невелико, поэтому для стадии легкого скольжения I различия в акустической эмиссии при режимах 1, 2 и 3 незначительны. Результаты расчетов представлены на рисунке 5, каждая точка на рисунке 5 описывает конкретный участок кривой деформационного упрочнения.

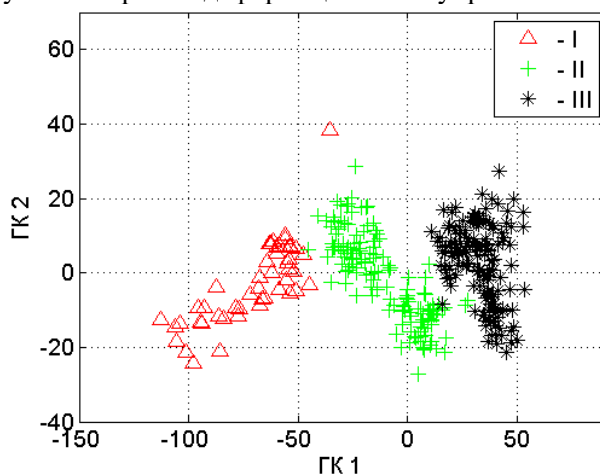


Рис. 5. Проекция информативных параметров акустической эмиссии для области пластической деформации: I, II, III – стадии пластической деформации

Как видно из рисунка 5, проекции информативных характеристик сформировали три кластера, соответствовавших стадиям I, II и III пластической деформации. Подобное расположение кластеров указывало на то, что первая главная компонента ГК1 при анализе по методу главных компонент описывала смену стадий пластической деформации. Вторая компонента ГК2 характеризовала изменение номера блока, который обрабатывался использованным методом. Особенностью рисунка 5 являлось формирование практически непересекающихся кластеров. Подобное положение кластеров было связано с тем, что на разных стадиях пластической деформации доминировали различные механизмы акустического излучения, менявшиеся при росте нагрузки [25].

Таким образом, заключительная обработка с помощью метода главных компонент позволила кластеризовать акустико-эмиссионные сигналы по характеру их изменения со временем и установить связь между видом этих сигналов и стадиями пластической деформации.

Заключение

В работе описан метод цифровой обработки сигнала акустической эмиссии, применяемый для исследования металлических сплавов, содержащих сварные соединения, в условиях статического нагружения. Рассмотренный метод обработки сигнала основан на применении многоуровневого дискретного вейвлет-разложения сигнала для получения коэффициентов преобразования, которые использовались в качестве информативных признаков акустической эмиссии. Рассчитанные векторы признаков анализировались с помощью метода главных компонент. Результаты расчетов показали, что данный подход обеспечил надежное разделение акустико-эмиссионных сигналов, регистрировавшихся в процессе нагружения на разных стадиях пластической деформации.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения описанного метода для контроля изделий из металлических материалов, содержащих сварные соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Threadgill P.L., Leonard F.J., Shercliff Y.R. and Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys // *International Materials Reviews*. 2009. Vol. 54. No. 2. P. 49-93.
2. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2005. Vol. 50 (1-2). P. 1-78.
3. Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S., Kolubaev E.A., Psakhie S.G., Chernyavskii A.G., and Vorobei I.V. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // *Defence Technology*. 2015. Vol. 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. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. №7. С. 96-100.
6. Sibil A., Godin N., R'Mili M., Maillat E., Fantozzi G. Optimization of Acoustic Emission Data Clustering by a Genetic Algorithm Method // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. Vol. 31. Issue 2. P. 169-180.
7. Godin N., Huguet S., Gaertner R. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites // *NDT & E International*. 2005. Vol. 38. Issue 4. P. 299-309.
8. Sophian A., Tian C.Y., Taylor D., Rudlin J. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT // *NDT & E International*. 2003. Vol. 36. Issue 1. P. 37-41.
9. Loutas T.H., Kostopoulos V., Ramirez-Jimenez C., Pharaoh M. Damage evolution in center-holed 4a glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms // *Composites Science and Technology*. 2006. Vol. 66. Issue 10. P. 1366-1375.
10. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebello J.M.A., Siqueira M.H.S. Failure mechanism characterization in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals // *Insight*. 2004. Vol. 46. Issue 5. P. 282-289.
11. Hamdi S.E., Le Duff A., Simon L., Plantier G., Sourice A., Feuilloley M. Acoustic emission pattern recognition approach based on Hilbert-Huang transform for structural health monitoring in polymer composite materials // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. P. 746-757.
12. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013. 633 p.
13. 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. Vol. 1683. P. 0201861-0201864.
14. Rizzi E., Hahner P. On the Portevin-Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical result // *International Journal of Plasticity*. 2004. Vol. 20. Issue 1. P. 121-165.
15. Michael Zaiser, Elias C. Aifantis. Randomness and slip avalanches in gradient plasticity // *International Journal of Plasticity*. 2006. Vol. 22. Issue 8. P. 1432-1455.

16. Egorov A.V., Polyakov V.V., Gumirov E.A., Lependin A.A. Recording Acoustic Emission Signals by the Modified Oscillation Method // *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. Vol. 48. No. 5. P. 667-670.
17. Breton R.G. *Chemometrics for Pattern Recognition*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2009. 504 p.
18. 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. Issue 6. P. 1441-1464.
19. 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. Vol. 93. Issue 23. P. 231906-1-231906-3.
20. Mallat S.A. *Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 2009. 832 p.
21. Sang Y., Wang D., Wu J. Entropy-Based Method of Choosing the Decomposition Level in Wavelet Threshold De-noising // *Entropy*. 2010. Vol. 12. Issue 6. P. 1499-1513.
22. Shahri M.N., Jalal Y.J., Fotouhi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50. Issue 14. P. 1897-1907.
23. Esbensen Kim H. *Multivariate Data Analysis – In Practice*. CAMO Process AS, Oslo, Norway, 2002. 160 p.
24. Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 160. P. 8-12.
25. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Колубаев Е.А. Диагностика алюминиевых сплавов со сварными соединениями на основе анализа сигналов акустической эмиссии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т. 14. № 4. С. 458 – 463.

Дмитриев Александр Александрович

старший преподаватель кафедры
информационной безопасности Института
цифровых технологий, электроники и физики,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 61,
Тел.: +7 (3852) 298-199
Эл. почта: dmitriev@asu.ru

Поляков Виктор Владимирович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф.
информационной безопасности Института
цифровых технологий, электроники и физики,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»,
656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 61,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, Академический просп., 2/4,
Тел.: +7-(3852) 296-656, Эл. почта: pvv@asu.ru

Колубаев Евгений Александрович

Д-р техн. наук, профессор, директор Института
физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Россия, г. Томск, Академический просп., 2/4,
Тел.: +7 (3822) 28-68-04, Эл. почта: eak@ispms.ru

A.A. DMITRIEV, V.V. POLYAKOV, E.A. KOLUBAEV

DIGITAL PROCESSING OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN THE STUDY OF WELDED COMPOUNDS IN METAL ALLOYS

On the basis of the acoustic emission method, a study was carried out of samples of aluminum-magnesium alloys obtained by welding. Samples of alloys containing welded joints were subjected to static tensile tests with simultaneous recording of acoustic emission characteristics and mechanical loading parameters. The coefficients of multilevel discrete wavelet decomposition were used as informative features of acoustic emission. These coefficients characterized the low-frequency shape of the recorded acoustic emission signals. The method of principal components was used to reduce the dimension of the processed acoustic emission data necessary for the subsequent analysis of the introduced informative features. It is shown that the proposed approach made it possible to separate the signals formed at individual stages of plastic deformation of the material. The differences in the characteristics of acoustic emission signals describing these stages are revealed and described. The obtained results can be used in acoustic emission diagnostics of metal alloy products containing elements with welded joints under external mechanical loads. The use of algorithms for multivariate data analysis and digital signal processing, optimized for parallel computing, contributes to the development of new methods for fast acoustic emission diagnostics of welded joints.

Keywords: *acoustic emission, welded joints, metal alloys, discrete wavelet transform, principal component analysis.*

REFERENCES

1. Threadgill P.L., Leonard F.J., Shercliff Y.R. and Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2009. Vol. 54. No. 2. P. 49-93.
2. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2005. Vol. 50 (1-2). P. 1-78.

3. Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S., Kolubaev E.A., Psakhie S.G., Chernyavskii A.G., and Vorobei I.V.: Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method. *Defence Technology*. 2015. Vol. 11. P. 99-103.
4. Chen C., Kovacevic R., Jandric D. Acoustic emission in monitoring quality of stir weld in friction stir welding. *Proceedings of 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA)*. 2003.
5. Lependin A.A., Polyakov V.V. Scaling of acoustic emission characteristics during plastic deformation and destruction. *Journal of Technical Physics*. 2014. Vol. 84. No. 7. P. 96-100 (in Russian).
6. Sibil A., Godin N., R'Mili M., Maillet E., Fantozzi G. Optimization of Acoustic Emission Data Clustering by a Genetic Algorithm Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. Vol. 31, Issue 2:169–180.
7. Godin N., Huguet S., Gaertner R. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT & E International*. 2005. Vol. 38. Issue 4. P. 299-309.
8. Sophian A., Tian C.Y., Taylor D., Rudlin J. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT. *NDT & E International*. 2003. Vol. 36. Issue 1. P. 37-41.
9. Loutas T.H., Kostopoulos V., Ramirez-Jimenez C., Pharaoh M. Damage evolution in center-holed 4a glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms. *Composites Science and Technology*. 2006. Vol. 66. Issue 10. P. 1366 – 1375.
10. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebello J.M.A., Siqueira M.H.S. Failure mechanism characterization in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals. *Insight*. 2004. Vol. 46. Issue 5. P. 282–289.
11. Hamdi S.E., Le Duff A., Simon L., Plantier G., Sourice A., Feuilloley M. Acoustic emission pattern recognition approach based on Hilbert–Huang transform for structural health monitoring in polymercomposite materials. *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. P. 746-757.
12. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013. 633 p.
13. 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. Vol. 1683. P. 0201861-0201864.
14. Rizzi E., Hahner P. On the Portevin–Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical result. *International Journal of Plasticity*. 2004. Vol. 20. Issue 1. P. 121-165.
15. Michael Zaiser, Elias C. Aifantis. Randomness and slip avalanches in gradient plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2006. Vol. 22. Issue 8. P. 1432-1455.
16. Egorov A.V., Polyakov V.V., Gumirov E.A., Lependin A.A. Recording Acoustic Emission Signals by the Modified Oscillation Method. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. Vol. 48. No. 5. P. 667-670.
17. Breerton R.G. *Chemometrics for Pattern Recognition*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2009. 504 p.
18. 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. Issue 6. P. 1441-1464.
19. 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. Vol. 93. Issue 23. P. 231906-1-231906-3.
20. Mallat S.A. *Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press. 2009. 832 p.
21. Sang Y., Wang D., Wu J. Entropy-Based Method of Choosing the Decomposition Level in Wavelet Threshold De-noising. *Entropy*. 2010. Vol. 12. Issue 6. P. 1499-1513.
22. Shahri M.N., Jalal Y.J., Fotouhi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform. *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50. Issue 14. P. 1897-1907.
23. Esbensen Kim H. *Multivariate Data Analysis – In Practice*. CAMO Process AS, Oslo, Norway. 2002. 160 p.
24. Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 160. P. 8-12.
25. Dmitriev A.A., Polyakov V.V., Kolubaev E.A. Diagnostics of aluminum alloys with welded joints based on the analysis of acoustic emission signals. *Fundamental problems of modern materials science*. 2017. Vol. 14. No. 4. P. 458–463 (in Russian).

Alexander A. Dmitriev

Senior lecturer of Department of Information Security,
Altai State University,
61, Lenina avenue, Barnaul, Russia, 656049,
Phone: +7 (3852) 298-199
E-mail: dmitriev@asu.ru

Victor V. Polyakov

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head
of Department of Information Security, Altai State University,
61, Lenina avenue, Barnaul, Russia, 656049,
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
2/4, Academic avenue, Tomsk, Russia, 634055,
Phone: +7 (3852) 296-656, E-mail: pvv@asu.ru

Evgeny A. Kolubaev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Institute
of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
2/4, Academic avenue, Tomsk, Russia, 634055,
Phone: +7 (3822) 28-68-04, E-mail: eak@ispms.ru