

УДК 534

Применение вейвлет-обработки к акустико-эмиссионным измерениям при растяжении титанового сплава ВТ 1-0*

А.А. Дмитриев

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Wavelet Processing of Acoustic Emission of VT 1-0 Titanium Alloy under Tension

A.A. Dmitriev

Altai State University (Barnaul, Russia)

Предлагается метод обработки сигналов акустической эмиссии для вычисления информативных параметров сигнала, характеризующих стадии пластической деформации и разрушения в нагруженном титановом сплаве. Представленный метод имеет комплексную структуру, включающую применение алгоритмов цифровой обработки сигналов и методов многомерного анализа данных. В основе предлагаемого подхода к обработке акустической эмиссии лежит применение математического аппарата многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования сигналов. С помощью вейвлет-преобразования получены коэффициенты аппроксимации 10-уровня разложения, которые характеризовали низкочастотные особенности акустической эмиссии на различных этапах нагружения материала. Коэффициенты аппроксимации использовались в качестве информативных параметров сигнала. Для анализа информативных параметров и установления их количественной связи со стадиями пластической деформации титана привлечен метод главных компонент. На основе результатов кластеризации выявлены различия в информативных параметрах на разных стадиях пластической деформации материала.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке нового поколения устройств диагностики, использующих акустико-эмиссионные измерения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, многомерное дискретное вейвлет-преобразование, метод главных компонент, титановые сплавы.

DOI: 10.14258/izvasu(2021)4-04

The paper proposes a method for processing acoustic emission signals for calculating informative signal parameters characterizing the stages of plastic deformation and fractures in a loaded titanium alloy. The proposed method has a complex structure that includes digital signal processing algorithms and multivariate data analysis methods. The acoustic emission signals are processed using the mathematical apparatus of the multilevel discrete wavelet transform to obtain the approximation coefficients of the 10-level decomposition. These coefficients characterize the low-frequency features of acoustic emission at various stages of samples loading. The approximation coefficients are further used as informative parameters of acoustic emission signals. Principal components analysis is used to investigate the informative parameters and establish their quantitative relationship with the stages of plastic deformation of titanium by clustering the processed results. Differences in the informative parameters at different stages of plastic deformation of the material are revealed by the following analysis of the clustered results.

The obtained results can be used to develop a new generation of diagnostic devices for acoustic emission measurements.

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

* Исследование выполнено в рамках реализации Программы поддержки научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», проект «Разработка метода контроля нагруженных конструкционных материалов на основе классификационного анализа многомерных акустико-эмиссионных данных».

Введение

На сегодняшний день диагностика и контроль материалов с помощью акустической эмиссии широко применяется в промышленности и технике. Для получения достоверных результатов акустико-эмиссионной диагностики используется математическая обработка сигналов, применяемая для вычисления надежных информативных параметров, связанных с изменениями в акустическом сигнале при нагружении материала [1–3].

Выбор математического аппарата для обработки зависит от извлекаемых амплитудных или частотных характеристик акустического сигнала, полученного от контролируемого объекта. Для количественной оценки в изменении амплитудных значений сигнала обычно применяются статистические параметры, вычисление мощности и энергии акустической эмиссии [4]. Исследование глобальных частотных свойств эмиссионных сигналов проводят при помощи математического преобразования Фурье [5].

Развитием в способах исследования частотных особенностей акустической эмиссии стало применение частотно-временных методов обработки сигналов. Для частотно-временного анализа акустико-эмиссионных измерений обычно привлекают хорошо апробированный математический аппарат оконного преобразования Фурье, вейвлет-преобразования, преобразования Вигнера-Вилла, а также преобразование Гилберта-Хуанга [6]. Применение перечисленных частотно-временных методов используется не только для определения доминирующих частот исследуемого сигнала, но и с целью выявления временных промежутков, на которых происходят изменения в частотном спектре сигнала [7–9].

В последнее время при обработке и анализе акустической эмиссии применяется комплексный подход, в котором совместно используются методы амплитудной или частотной обработки сигналов и методы многомерного анализа данных [10]. В этом подходе рассчитанные информативные параметры дополнительно обрабатываются методами многомерного анализа данных. На основе результатов применения методов многомерного анализа данных проводится интерпретация информативных параметров сигнала и устанавливается количественная связь с текущим состоянием нагруженного контролируемого объекта или прочностными свойствами деформируемого материала.

В настоящей работе предложен метод обработки сигнала акустической эмиссии на основе применения дискретного вейвлет-преобразования для получения новых информативных параметров, характеризующих изменения в сигналах акустической эмиссии, полученных на разных стадиях пластической деформации титана.

Математический аппарат вейвлет-обработки сигналов

В основе предложенного метода обработки акустико-эмиссионных измерений лежит применение математического аппарата вейвлет-преобразования сигналов. Как показано в выражении (1), при выполнении вейвлет-преобразования обрабатываемый сигнал преобразуется с помощью специальных математических функций-вейвлетов [11].

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}^*(t)dt, \text{ где } \psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

В выражении (1) $x(t)$ — исследуемый сигнал, $\psi_{a,b}^*(t)$ — функция-вейвлет, коэффициенты a, b задают масштаб разложения и параметр сдвига, а символ * обозначает математическую операцию комплексного сопряжения. Функция $\psi_{a,b}^*(t)$ рассчитывается из базисного (материнского) вейвлета ψ при различных значениях параметров масштаба и сдвига. Значения параметра масштаба a , задаваемые при вычислении соотношения (1), определяют анализируемый частотный диапазон исследуемого сигнала $x(t)$. В результате вейвлет-преобразования исследуемый сигнал представляется набором коэффициентов в частотно-временном пространстве, которые характеризуют локальные амплитудно-частотные особенности обрабатываемого сигнала [6].

Другим подходом для вычисления вейвлет-преобразования является многоуровневое дискретное вейвлет-преобразование. При вычислении многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования выполняется разложение сигнала на отдельные компоненты с помощью набора низкочастотных и высокочастотных фильтров, согласно выражениям (2) [12]. Значения коэффициентов дискретных фильтров определяются частотными свойствами базисной вейвлетной функции

$$a[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[n-k], d[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k]. \quad (2)$$

В выражении (2) $a[n]$ и $d[n]$ являются коэффициентами аппроксимации и детализации многоуровневого вейвлет-разложения, $g[n-k]$ и $h[n-k]$ — значения коэффициентов низкочастотного и высокочастотного фильтров, построенных на основе базисного вейвлета, $x[k]$ — обрабатываемый дискретный сигнал, k, n — индексы, определяющие дискретное значение сигнала и коэффициентов преобразования. При выполнении многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования сигнала вычисляются коэффициенты аппроксимации и детализации для каждого уровня разложения. Коэффициенты аппроксима-

ции на каждом уровне имеют смысл низкочастотной, усредненной версии обрабатываемого сигнала, а коэффициенты детализации характеризуют его высокочастотные особенности [11–12]. Для описания частотных свойств в предлагаемом методе обработки акустической эмиссии было выбрано многоуровневое дискретное вейвлет-преобразование.

Экспериментальные измерения

В работе обрабатывались сигналы акустической эмиссии, полученные при нагружении образцов из титанового сплава марки ВТ1-0. Для проведения испытаний механическим способом были изготовлены образцы прямоугольной формы с размерами рабочей части 5x15x50 мм. Полученные образцы подвергались статическому растяжению с постоянной скоростью деформирования 10^{-3} с^{-1} . При растяжении образцов одновременно регистрировались сигнал акустической эмиссии и параметры условного напряжения и условной деформации. По параметрам напряжения и деформации был рассчитан коэффициент деформационного упрочнения [13]. Значение коэффициента деформационного упрочнения количественно изменялось при деформировании образца, что позволило выделить отдельные четыре стадии пластической деформации материала.

Стадия I линейного упрочнения характеризовалась постоянным значением коэффициента упрочнения 82 Н/мм^2 . Переход к стадии II пластической деформации сопровождался уменьшением коэффициента упрочнения до значений 5 Н/мм^2 . Дальнейшее развитие пластической деформации материала соответствовало нулевым значениям коэффициента, и это обстоятельство позволило выделить стадию пластической деформации III. Разупрочнение образца проходило на IV стадии, на которой коэффициент непрерывно увеличивался до высоких значений вплоть до разрушения образца.

Для регистрации акустической эмиссии использовался пьезоэлектрический датчик GT-301 [13]. Регистрируемый сигнал был предварительно усилен на 60 dB и записан с частотой дискретизации 2,5 МГц. Мгновенные значения акустической эмиссии были пропорциональны напряжению, снимаемому с пьезоэлектрического датчика. Записанная акустическая эмиссия представляла собой непрерывный сигнал с различной амплитудой отдельных отсчетов.

Метод обработки акустико-эмиссионных измерений

Для обработки записанных сигналов акустической эмиссии был предложен метод, имеющий многошаговую структуру. На первом шаге непрерывный сигнал разбивался на равные непересекающиеся блоки, состоящие из 10^7 мгновенных значений. Выбор параметра длины блока был обусловлен быстрой математической обработкой блока при последующих вычислениях коэффициентов с помощью вейвлет-

преобразования. На втором шаге к каждому блоку по отдельности применялось многоуровневое дискретное вейвлет-преобразование. Декомпозиция сигнала проводилась с помощью алгоритма цифровой фильтрации (2). В качестве базисной вейвлет-функции использовался вейвлет Добеши 8. Этот вейвлет был выбран, исходя из требования, что вейвлет не должен быть менее гладким, чем обрабатываемый сигнал [11].

Для дальнейшей обработки были выбраны коэффициенты аппроксимации 10 уровня разложения, характеризовавшие низкочастотную форму сигнала акустической эмиссии [12]. При нагружении материала на разных стадиях пластической деформации вклад в акустическую эмиссию совместно вносят различные конкурирующие механизмы пластической деформации. Вклад различных источников акустической эмиссии приводит к изменению низкочастотной формы сигнала, которую описывают коэффициенты аппроксимации.

Выбор 10 уровня вейвлет-разложения основывался на анализе зависимости энергии коэффициентов аппроксимации от уровня разложения. Вычисляемый параметр энергии для разных уровней выступал в качестве количественной меры вариации коэффициентов аппроксимации. На младших уровнях разложения энергия коэффициентов принимала максимальные значения, ввиду того что коэффициенты аппроксимации содержали детали обрабатываемого сигнала. Уменьшение значений энергии по мере вычисления новых уровней разложения связано с тем, что коэффициенты аппроксимации описывали более усредненную и низкочастотную форму сигнала. На больших уровнях разложения энергия возрастала ввиду искажений коэффициентов аппроксимации, вносимых при низкочастотной фильтрации.

На следующем шаге к полученным коэффициентам аппроксимации применялось преобразование Гилберта. Преобразование Гилберта позволяет получить копию сигнала, у которой фазы всех спектральных составляющих смещены на $\pi/2$ [14]. С помощью преобразования Гилберта коэффициентов аппроксимации $a[n]$ вычислялись значения $a_g[n]$, которые затем использовались для нахождения значений мгновенной амплитуды, согласно выражению (3):

$$E[n] = \sqrt{a^2[n] + a_g^2[n]}. \quad (3)$$

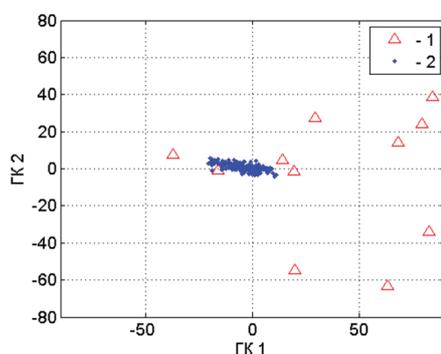
Полученные значения мгновенной амплитуды описывали огибающую коэффициентов аппроксимации сигнала. Значения мгновенной амплитуды использовались в качестве информативных параметров, которые описывали изменение во времени энергии коэффициентов аппроксимации и низкочас-

тотные особенности акустического сигнала для данного блока.

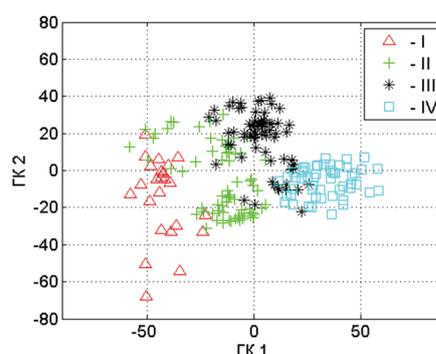
С помощью предложенного метода обработки были рассчитаны информативные параметры для блоков акустической эмиссии титанового сплава. Информативные параметры были объединены в матрицу признаков, каждая строка которой состояла из информативных параметров, описывающих блок акустической эмиссии. Для нахождения количественной связи между информативными параметрами и стадиями пластической деформации материала был привлечен метод главных компонент [15]. Метод главных компонент позволяет представить матрицу признаков в пространстве с низкой размерностью, которая определяется числом используемых при обработке главных компонент. В низкоразмерном пространстве каждая строка матрицы признаков представляется в виде отдельной точки. Если информативные параметры, описывающие отдельные блоки сигналов, имеют близкие значения и свойства, то соответствующие этим параметрам точки в новом пространстве образуют отдельные группы. На рисунке представлена проекция рассчитанных информативных параметров в пространство, образованное первыми двумя компонентами, которые совместно описывали ~35 % исходных данных. Привлечение других главных компонент не позволило выявить новые за-

кономерности в данных, поэтому они не рассматривались [15].

На графике а рисунка показано, что проекции информативных параметров акустической эмиссии разделились на две группы. Группа точек 1 описывала информативные параметры, полученные для акустической эмиссии в начале стадии I линейного упрочнения. Сигнал акустической эмиссии в этих блоках сильно осциллировал и имел высокую амплитуду, что нашло отражение в рассчитанных информативных параметрах. Основной кластер 2 описывал информативные параметры акустической эмиссии, полученной при дальнейшем деформировании материала. Информативные параметры, соответствовавшие группе точек кластера 2, были отдельно спроецированы на новую плоскость главных компонент. Результат повторного применения метода главных компонент представлен на графике б рисунка, на котором проекции информативных параметров разделились на четыре кластера. Точки внутри отдельного кластера описывали акустическую эмиссию на отдельной стадии пластической деформации титана. Такие результаты кластеризации указывали на то, что предложенные информативные параметры акустической эмиссии характеризовали стадии пластической деформации материала.



а)



б)

Результат обработки методом главных компонент рассчитанных информативных параметров:
а — разделение информативных параметров стадии линейного упрочнения (1) и развитой пластической деформации (2); б — разделение кластеров на стадии I–IV пластической деформации титана

Заключение

В работе представлен метод обработки сигналов акустической эмиссии, используемый для вычисления энергетических и частотных информативных параметров акустической эмиссии. С помощью математического аппарата вейвлет-разложения были вычислены коэффициенты аппроксимации, которые характеризовали низкочастотные свойства сигнала. Дальнейшая обработка рассчитанных коэффициен-

тов с помощью преобразования Гилберта позволила получить новые информативные параметры акустической эмиссии, описывавшие изменение энергии низкочастотной формы сигнала. Для нахождения соответствия между новыми информативными параметрами и стадиями пластической деформации титана привлечен метод главных компонент. Применение проекционного метода позволило разделить информативные параметры на отдельные кластеры, это сви-

детельствовало о том, что информативные параметры, вычисленные с помощью предложенного метода обработки акустической эмиссии, связаны со стадиями пластической деформации титанового сплава.

Предложенный метод обработки акустической эмиссии может быть использован для интерпретации акустико-эмиссионных измерений при диагностике и контроле нагруженных конструкционных материалов.

Библиографический список

1. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты : монография. Ростов /нД, 1986.
2. Bellenger F., Mazille H., Idrissi H. Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion // NDT&E International. 2002. Vol. 35. № 6. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00011-7.
3. Shahri M.N., Yousefi J., Fotouchi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 50. № 14. DOI: 10.1177/0021998315597555.
4. Буйло С.И. Физико-механические, химические и статистические аспекты акустической эмиссии // Известия Алт. гос. ун-та. 2019. № 1 (105). DOI: 10.14258/izvasu(2019)1-01.
5. 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. № 5. DOI: 10.1784/insi.46.5.282.55560.
6. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // Известия вузов. ПНД. 2011. Т. 19. № 2. DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-2-141-157.
7. Loutas T.H., Kostopoulos V., Ramirez-Jimenez C., Pharaoh M. Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66, № 10. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.09.011.
8. Lu C., Ding P., Chen Z. Time-frequency Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Tension Damage in CFRP // Procedia Engineering. 2011. № 23. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2491.
9. 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, № 5. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.11.018.
10. Godin N., Huguet S., Gaertner R., Salmon L. Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers // NDT & E International. 2004. Vol. 37. № 4. DOI: 10.1016/j.ndteint.2003.09.010.
11. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М., 2003.
12. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11.
13. Поляков В.В., Егоров А.В., Салита Д.С., Колубаев Е.А. Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах. Ч. 2. Акустическая эмиссия // Известия Алт. гос. ун-та. 2015. № 1/1 (85). DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.1-08.
14. Бутырский Е. Ю. Преобразование Гильберта и его обобщение // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 4.
15. Эсбенсен, К. Анализ многомерных данных. Черноголовка, 2005.