

11. Уманец, Н. Н. Ультраструктурные изменения сосудистой оболочки и сетчатки глаза кролика непосредственно после воздействия различных режимов высокочастотной электросварки биологических тканей [Текст] / Н. Н. Уманец, В. А. Науменко, Н. Е. Думброва, Н. И. Молчанюк, Р. Э. Назаретян // Журнал НАМН Украины. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 359–364.
12. Popovic, Z. Introductory Engineering Electromagnetics [Text] / Z. Popovic, B. D. Popovic // Prentice Hall, 1999. – 548 p.

Проведено моделювання зміни енергії сигналів акустичної емісії при механічній обробці композиційного матеріалу в залежності від його властивостей для механічної моделі акустичного випромінювання. Показано, що зростання значення параметру, який характеризує властивості матеріалу, приводить до падіння енергетичних характеристик акустичної емісії. Визначено, що падіння дисперсії середнього рівня енергії випереджає падіння інших енергетичних та амплітудних параметрів акустичної емісії

Ключові слова: акустична емісія, композиційний матеріал, сигнал, амплітуда, механічна обробка, властивості матеріалу

Проведено моделирование изменения энергии сигналов акустической эмиссии при механической обработке композиционного материала в зависимости от его свойств для механической модели акустического излучения. Показано, что возрастание значения параметра, характеризующего свойства материала, приводит к падению энергетических характеристик акустической эмиссии. Определено, что падение дисперсии среднего уровня энергии опережает падение других энергетических и амплитудных параметров акустической эмиссии

Ключевые слова: акустическая эмиссия, композиционный материал, сигнал, амплитуда, механическая обработка, свойства материала

УДК 620.179:534.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43733

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АМПЛИТУДНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КОМПОЗИТА

С. Ф. Филоненко

Доктор технических наук, профессор, директор
Институт информационно-диагностических систем
Национальный авиационный университет
пр. Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058
E-mail: fils01@mail.ru

1. Введение

Работоспособность изделий из композиционных материалов (КМ) в значительной степени определяется неоднородностью их свойств. Такая неоднородность обусловлена процессами изготовления КМ. Для обеспечения надёжности изделий проводят широкий комплекс исследований с разработкой методов контроля и мониторинга, как КМ, так и технологических процессов их механической обработки. Одним из методов исследований является метод акустической эмиссии (АЭ). Однако при значительных преимуществах метода его применение для контроля технологических процессов механической обработки КМ ограничено. Это обусловлено проблемами интерпретации регистрируемого акустического излучения.

Результаты опубликованных исследований показывают, что сигналы АЭ, регистрируемые в процессе механической обработки КМ, формируются при действии влияющих факторов. Такими факторами являются: технологические параметры механической обработки КМ; физико-механические характеристики обрабаты-

ваемого КМ. Они определяют сложную форму и параметры сигналов АЭ, которые изменяются во времени. Безусловно, что интерпретация их изменения является важной задачей для разработки методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ. Одним из направлений решения задачи является моделирование АЭ с определением влияния различных факторов на амплитудно-энергетические параметры формируемых сигналов. Это позволит определить информативность и чувствительность параметров АЭ к действию влияющих факторов, что является основой создания методов контроля механической обработки КМ и качества изготавливаемых изделий.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Метод АЭ, как показывают обзорные публикации [1–3], имеет широкое применение при исследовании различных операций механической обработки материалов (точение, сверление, фрезерование), включая и

КМ. Исследования АЭ проводят с анализом факторов, влияющих на параметры регистрируемых сигналов. Такими факторами, как правило, являются скорость и глубина резания, скорость продольной подачи резца, а также износ резального инструмента. Результаты проведенных исследований показывают, что закономерности изменения параметров регистрируемых сигналов АЭ при действии влияющих факторов имеют неоднозначный характер изменения.

В работе [4] проведен анализ энергии сигналов АЭ и их статистические характеристики при точении метало матричного композита на основе алюминия. Показано, что энергия АЭ возрастает во времени. При этом статистические параметры ее распределения (коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса), а также b -параметр амплитудного распределения имеют хорошую связь с износом резального инструмента. Согласно данным работы [5], в процессе механической обработки метало матричного композита с использованием различных технологических режимов, наблюдается падение во времени амплитуд низкочастотной и высокочастотной составляющих сигналов АЭ. Однако переход к стадии повреждения поверхности (пленки) обрабатываемого инструмента сопровождается увеличением скорости роста амплитуд низкочастотной и высокочастотной составляющих сигналов АЭ. В то же время, в работе [6] показано, что при таком переходе к повреждению инструмента происходит падение среднеквадратического значения амплитуд (СКЗА) регистрируемых сигналов АЭ.

При исследовании влияния технологических параметров фрезерования титан алюминиевого композиционного сплава в работе [7] показано, что возрастание скорости и глубины резания, а также скорости продольной подачи фрезы приводит к возрастанию СКЗА сигналов АЭ. Однако в работе [8] при обработке композита на основе алюминия определено, что при увеличении скорости обработки происходит падение СКЗА сигналов АЭ, а при увеличении скорости продольной подачи резца и глубины резания его значение возрастает. Возрастание СКЗА сигналов АЭ от скорости обработки показано и в работе [9] при точении титан алюминиевого композиционного сплава. При этом увеличение скорости продольной подачи резца и глубины резания приводит к падению СКЗА.

При исследовании АЭ в процессе механической обработки материалов, включая и КМ, считается, что обрабатываемый материал имеет заданные и постоянные физико-механические характеристики. Однако, как показывают исследования [5, 6], даже на стадии нормального резания изменение АЭ во времени имеет сложный характер (наблюдаются локальные изменения среднего уровня амплитуды и его разброса).

Теоретические исследования амплитудных характеристик АЭ при обработке КМ с изменением его свойств для механической модели разрушения рассмотрены в работе [10]. Показано, что формируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами, что согласуется с результатами экспериментальных исследований [5, 6]. Также показано, что возрастание значения параметра, характеризующего свойства КМ, приводит к падению среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. При общем

падении амплитудных параметров АЭ наибольшую чувствительность к изменению влияющего параметра имеет дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Определено, что возрастание влияющего параметра в 5 раз приводит к падению дисперсии среднего уровня результирующего сигнала АЭ в 2,77 раз.

В тоже время, наиболее емкими параметрами сигналов, включая и сигналы АЭ, являются энергетические параметры. Поэтому интерес представляет исследование энергетических параметров акустического излучения и их чувствительность к изменению свойств КМ.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование влияния свойств КМ при его механической обработке на энергетические параметры АЭ.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- провести моделирование изменения энергии сигналов АЭ в зависимости от свойств КМ при его механической обработке;
- провести статистическую обработку результатов моделирования с получением данных по энергетическим характеристикам АЭ;
- определить закономерности изменения энергетических характеристик АЭ с изменением свойств КМ; провести сравнение чувствительности амплитудных и энергетических характеристик АЭ к изменению свойств КМ.

4. Влияние свойств композиционного материала на энергетические характеристики акустической эмиссии

Моделирование изменения энергии сигналов АЭ во времени будем проводить при условиях механической обработки КМ, рассмотренных в работе [10]. Обработка КМ осуществляется с постоянными технологическими параметрами, при которых происходит последовательное разрушение во времени элементарных площадок и последовательное формирование импульсных сигналов АЭ. При таких условиях, энергию изменения результирующего сигнала АЭ представим в виде выражения

$$E_p(t) = \sum_j U_j^2(t - t_j), \quad (1)$$

где $t_j = j\Delta t_j \pm \delta$ – моменты времени появления импульсных сигналов АЭ U_j , возникающих при последовательном разрушении j -ых площадок КМ; j – номер разрушаемой площадки КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ; δ – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ.

Амплитуды импульсного сигнала АЭ U_j , как и в работе [10], будем рассчитывать для механической модели разрушения поверхностного слоя КМ

$$U_j(t) = u_0 t \alpha v_0 e^{\alpha t} e^{-\frac{v_0}{\alpha t}} (e^{\alpha t} - 1), \quad (2)$$

где $u_0 = N_0 \psi \delta_s$ – максимально возможное упругое смещение, которое распространяется по материалу при мгновенном разрушении заданной площади КМ, состоящей из N_0 одиночных элементов; ψ – коэффициент пропорциональности между механическим напряжением и амплитудой одиночного импульса возмущения, который формируется при разрушении одиночного элемента КМ (является константой); δ_s – величина, которая пропорциональна длительности импульса возмущения при разрушении одиночного элемента КМ; α – скорость нагружения; v_0, γ – постоянные, которые определяются свойствами КМ.

По результатам проведенных расчетов амплитуд импульсных сигналов АЭ будем проводить расчеты их энергии по выражению:

$$E_j(t) = \Delta t_k \sum_i U_{ji}^2(i \cdot \Delta t_k), \tag{3}$$

где $i=0, \dots, k$ – номер расчетного значения амплитуды j -го сигнала АЭ на его длительности; Δt_k – интервал времени между расчетными значениями амплитуд j -го сигнала АЭ ($\Delta t_k = \text{const}$).

Моделирование будем проводить, согласно (1), с учетом (2) и (3), в относительных единицах. При этом параметры, входящие в выражение (2), приведем к безразмерным величинам, а энергия и время будут представлены в нормированных единицах. Значения параметров в выражении (1) и (2) примем такими же, как и в работе [10]: $\alpha=20$; $\tilde{\gamma}=10000$; начальное значение $v_0=100000$; начальное значение $\Delta t_j=0,000007$; $\tilde{\delta}$ будем изменять в диапазоне от 0 до 0,0000082 произвольным образом. Значение v_0 будем изменять в диапазоне величин от $v_0=100000$ до $v_0=500000$ с шагом приращения 100000. Для других значений \tilde{v}_0 величины Δt_j и $\tilde{\delta}$ будем уменьшать пропорционально уменьшению длительности импульсных сигналов АЭ. При расчетах энергии, согласно (3), значение Δt_k составляло: $\Delta t_k=0,000002$.

На рис. 1, а, б приведены результаты моделирования изменения энергии результирующих сигналов АЭ во времени в относительных единицах (по расчетам 5000 значений энергий для каждого результирующего сигнала АЭ).

Из рис. 1 видно, что при возрастании параметра \tilde{v}_0 происходит падение среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ и величины его разброса. Расчеты статистических параметров сигналов АЭ (среднего уровня энергии \bar{E} , его стандартного отклонения S_E и дисперсии S_E^2) в виде зависимостей процентного падения энергетических параметров сигналов АЭ ($\Delta Z_{AE}, \%$) от процентного прироста параметра \tilde{v}_0 ($\Delta \tilde{v}_0, \%$) показаны на рис. 2. Процентное падение параметров рассматривается по отношению к их начальным значениям при $\tilde{v}_0=100000$. На рис. 2 также приведены зависимости процентного падения амплитудных параметров результирующих сигналов АЭ (средний уровень амплитуды U , его стандартное отклонение $S_{\tilde{v}}$ и дисперсия $S_{\tilde{v}}^2$) по данным работы [10].

Из проведенных исследований видно, что возрастание параметра \tilde{v}_0 , определяемого свойствами разрушаемого поверхностного слоя КМ, приводит к общему не линейному падению энергетических и амплитудных параметров результирующего сигнала АЭ. Однако падение энергетических параметров сигналов АЭ

опережает падение их амплитудных параметров. Возрастание \tilde{v}_0 на 400 % приводит к падению \bar{E}, S_E и S_E^2 , соответственно, на 56,39 %, на 62,59 % и на 86,0 %, а $U, S_{\tilde{v}}$ и $S_{\tilde{v}}^2$ – на 33,39 %, 39,88 % и 63,86 %. При этом наибольшее чувствительным параметром является дисперсия среднего уровня энергии сигнала АЭ (наблюдается наибольшее падение ее значения).

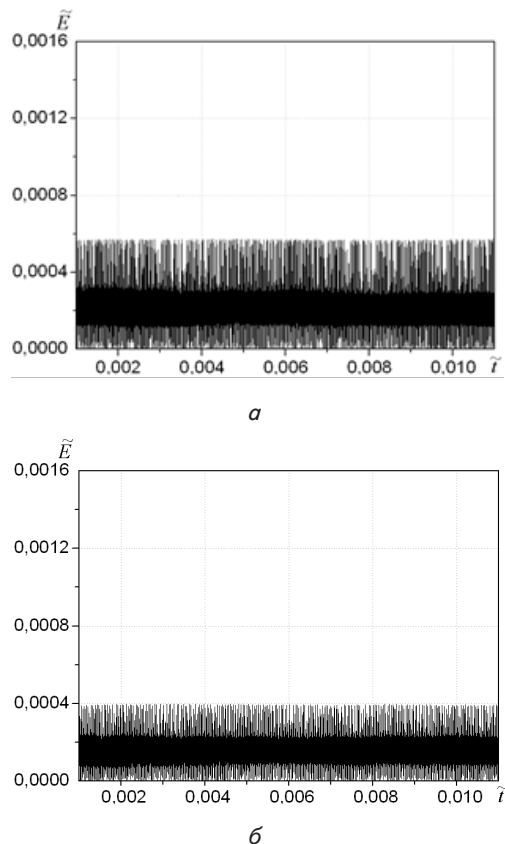


Рис. 1. Изменение энергии результирующих сигналов АЭ во времени в относительных единицах при механической обработке КМ для механической модели разрушения его поверхностного слоя: а – $\tilde{v}_0=200000$; б – $\tilde{v}_0=400000$

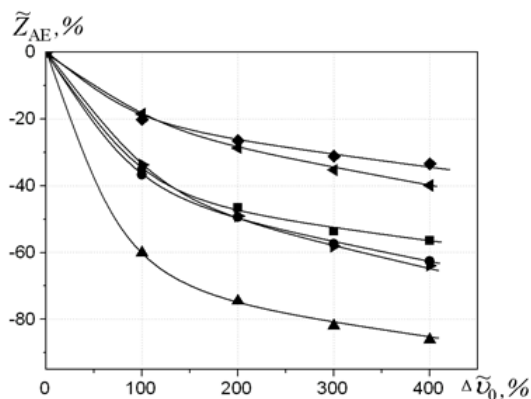


Рис. 2. Процентное падение энергетических и амплитудных параметров АЭ от процентного прироста \tilde{v}_0 : ■ – E ; ● – S_E ; ▲ – S_E^2 ; ◆ – U ; ◀ – $S_{\tilde{v}}$; ▶ – $S_{\tilde{v}}^2$

Результаты исследований показывают, что при постоянных технологических параметрах механической обработки КМ и отсутствии износа резально-

го инструмента неоднородность свойств снимаемого поверхностного слоя должна приводить к девиации амплитудно-энергетических параметров АЭ. Такая девиация будет иметь наибольшее проявление при анализе дисперсии среднего уровня энергии сигнала АЭ. Результаты исследований, во-первых, позволяют интерпретировать данные регистрации сигналов АЭ при механической обработке КМ, полученные различными авторами [5, 6, 9, 11]. Во-вторых, при нормальном резании анализ дисперсии среднего уровня энергии сигнала АЭ может использоваться для разработки метода контроля неоднородности свойств по поверхности обрабатываемого КМ непосредственно при выполнении операции его механической обработки.

6. Выводы

Проведено моделирование изменения энергии результирующих сигналов АЭ при механической обработке КМ для механической модели формирования акустического излучения в зависимости от параметра, определяемого свойствами КМ.

Показано, что возрастание влияющего параметра приводит к падению энергетических параметров АЭ.

Проведена обработка энергетических параметров АЭ и определены их статистические характеристики. Определены закономерности изменения процентного изменения энергетических параметров АЭ от процентного прироста влияющего параметра.

Анализ полученных данных показал, что процентный прирост значения влияющего параметра приводит к процентному падению энергетических параметров сигналов АЭ. При этом наибольшее падение имеет дисперсия среднего уровня энергии сигнала АЭ. Проведено сравнение чувствительности энергетических и амплитудных параметров АЭ к изменению влияющего фактора. Определено, что падение дисперсии среднего уровня энергии сигналов АЭ опережает падение его среднего уровня и стандартного отклонения, а так же всех амплитудных параметров АЭ.

Полученные результаты показывают, что анализ дисперсии среднего уровня энергии сигналов АЭ, как информативного параметра, может использоваться для разработки методов контроля, диагностики и мониторинга качества изготавливаемых изделий (неравномерности их свойств по поверхности) непосредственно в процессе механической обработки КМ.

Литература

1. Dongre, P. R. Tool Condition Monitoring in various machining operations and use of acoustic signature analysis [Text] / P. R. Dongre, S. S. Chiddarwar, V. S. Deshpande // International Journal on Mechanical Engineering and Robotics. – 2013. – Vol. 1, Issue 1. – P. 34–38.
2. Ali, Y. H. Acoustic Emission Signal Analysis and Artificial Intelligence Techniques in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis: A Review [Text] / Y. H. Ali, R. A. Rahman, R. I. R. Hamzah // Journal Teknologi. – 2014. – Vol. 69, Issue 2. – P. 121–126. doi: 10.11113/jt.v69.3121
3. Mandal, S. Applicability of Tool Condition Monitoring Methods Used for Conventional Milling in Micromilling: A Comparative Review [Text] / S. Mandal // Journal of Industrial Engineering. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–8. doi: 10.1155/2014/837390
4. Mukhopadhyay, C. K. Statistical analysis of acoustic emission signals generated during turning of a metal matrix composite [Text] / C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj, S. Venugopal // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 34, Issue 2. – P. 145–154. doi: 10.1590/s1678-58782012000200006
5. Lu, P. An investigation into interface behavior and delamination wear for diamond-coated cutting tools [Text] / P. Lu. – A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the department of mechanical engineering in the Graduate School of the University of Alabama, 2013. – 155 p.
6. Qin, F. Delamination wear of nano-diamond coated cutting tools in composite machining [Text] / F. Qin, J. Hu, Y. K. Chou, R. G. Thompson // Wear. – 2009. – Vol. 267, Issue 5–8. – P. 991–995. doi: 10.1016/j.wear.2008.12.065
7. Thepsonthi, T. Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-micromanufacturing [Text] / T. Thepsonthi. – A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School-New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, 2014. – 246 p.
8. Giriraj, B. Prediction of progressive tool wear using acoustic emission technique and artificial neural network [Text] / B. Giriraj // Journal of Civil Engineering Science: An International Journal. – 2012. – Vol. 1, Issue 1-2. – P. 43–46.
9. Fadare, D. A. Influence of Cutting Parameters and Tool Wear on Acoustic Emission Signal in High-speed Turning of Ti-6Al-4V Alloy [Text] / D. A. Fadare, W. F. Sales, J. Bonney, E. O. Ezugwu // Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences. – 2012. – Vol. 3, Issue 3. – P. 547–555.
10. Филоненко, С. Ф. Влияние свойств обрабатываемого композиционного материала на акустическую эмиссию [Текст] / С. Ф. Филоненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 5 (74). – С. 60–64. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40191s
11. Ren, Q. High-order interval type-2 Takagi-Sugeno-Kang fuzzy logic system and its application in acoustic emission signal modeling in turning process [Text] / Q. Ren, M. Balazinski, L. Baron // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 63, Issue 9-12. – P. 1057–1063. doi: 10.1007/s00170-012-3956-z