

*Проведено моделювання сигналів акустичної емісії при механічній обробці в залежності від властивостей поверхневого прошарку композиційного матеріалу, що руйнується, для механічної моделі акустичного випромінювання. Показано, що зростання значення параметру, який визначається властивостями матеріалу, приводить до падіння амплітудних характеристик акустичної емісії. Визначено, що найбільше падіння має дисперсія середнього рівня амплітуди сигналу акустичної емісії*

*Ключові слова: акустична емісія, композиційний матеріал, сигнал, амплітуда, механічна обробка, площа руйнування*

*Проведено моделирование сигналов акустической эмиссии при механической обработке в зависимости от свойств разрушаемого поверхностного слоя композиционного материала для механической модели акустического излучения. Показано, что возрастание значения параметра, определяемого свойствами материала, приводит к падению амплитудных характеристик акустической эмиссии. Определено, что наибольшее падение имеет дисперсия среднего уровня амплитуды сигнала акустической эмиссии*

*Ключевые слова: акустическая эмиссия, композиционный материал, сигнал, амплитуда, механическая обработка, площадь разрушения*

УДК 620.179:534.6  
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40191

# ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА АКУСТИЧЕСКУЮ ЭМИССИЮ

**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

Для получения заданного качества изделий из композиционных материалов (КМ) при их механической обработке проводятся исследования с разработкой методов контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов. Одним из методов исследований является метод акустической эмиссии (АЭ). К преимуществам метода относят малую инерционность и высокую чувствительность, что позволяет получать значительные объемы информации о процессах, протекающих в поверхностных слоях КМ при его механической обработке.

Результаты проводимых исследований показывают, что акустическое излучение, регистрируемое при механической обработке материалов, включая и КМ, может использоваться при контроле, диагностике и мониторинге технологических процессов для получения заданного качества изделий. В первую очередь, это относится к оптимизации параметров технологических процессов и контролю состояния режущего инструмента. Однако сложный характер акустического излучения и его видоизменение в процессе механической обработки КМ приводят к проблеме интерпретации регистрируемой информации. Проблема усугубляется и наличием большого количества влияющих факторов – технологических параметров механической обработки и характеристик обрабатываемого материала. Как показывают результаты экспериментальных исследований, существующие проблемы ограничивают применение метода АЭ в задачах кон-

троля, диагностики и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ.

Одним из направлений решения отмеченных проблем являются теоретические исследования, которые связаны с разработкой моделей и моделированием акустического излучения при преобладающем механизме разрушения поверхностного слоя КМ, с учетом действия различных факторов. Теоретический анализ влияния различных факторов на АЭ позволит получить закономерности изменения характера акустического излучения и его параметров, определить их чувствительность. Такие закономерности являются основой разработке методов контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ, что представляет научный и практический интерес.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В основе исследований АЭ лежат представления об источниках акустического излучения при механической обработке материалов [1, 2]. Предполагается, что такими источниками могут быть: процессы пластической деформации и разрушения обрабатываемого материала; процессы трения стружки и обрабатывающего инструмента; процессы разрушения стружки и ее соударения; разрушение обрабатывающего инструмента и ряд других. Однако, с точки зрения контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов, методологии экспериментальных исследований

строятся на разделении обработки регистрируемых сигналов АЭ по их типам [1–3]. Непрерывные сигналы АЭ связывают с работой режущего инструмента в нормальном или затупленном (изношенном) состоянии. Импульсные сигналы АЭ связывают с разрушением режущего инструмента. Такие подходы используются при исследовании всех видов механической обработки материалов, в том числе и КМ [2, 4–6].

При проведении экспериментальных исследований АЭ проводят анализ параметров регистрируемых сигналов АЭ с параметрами технологических процессов механической обработки КМ и состоянием (износом) режущего инструмента [5, 7–9]. Во многих случаях, полученные эмпирические взаимосвязи имеют сложный характер изменения с ограниченным их применением. При действии различных влияющих факторов они являются не устойчивыми, а данные некоторых исследований противоречивы.

Теоретических исследований АЭ при механической обработке материалов мало, и, в основном, они относятся к исследованию материалов с традиционной кристаллической структурой. При этом можно выделить два подхода. Первый из них, не рассматривает физику процесса формирования акустического излучения, а базируется на представлениях механики разрушения при резании, т.е. работа, затрачиваемая на пластическую деформацию при резании, прямо пропорциональна объему материала, который вступает в пластическую деформацию, действующему напряжению и скорости деформации. При этом считается, что между работой на пластическую деформацию и энергией АЭ также существует прямо пропорциональная связь. Такой подход использован в работах [10–12] для описания закономерности изменения среднеквадратического значения амплитуды (СКЗ) сигнала АЭ при резании материалов. Однако значительное количество исследований показывают отличие или незначительную согласованность экспериментальных закономерностей изменения СКЗ амплитуды сигнала АЭ с теоретической при действии различных факторов – скорости резания и скорости продольной подачи резца, глубины резания и других.

Второй подход рассмотрен в работах [13, 14]. Он учитывает физические основы формирования акустического излучения при протекании последовательных процессов пластического деформирования и разрушения поверхностного слоя заданной площади материала. Такие процессы приводят к последовательному излучению импульсных сигналов АЭ на малых промежутках времени, которые формируют результирующий сигнал АЭ при механической обработке материала. Моделирование результирующих сигналов АЭ при действии различных факторов позволило получить ряд закономерностей их влияния на параметры АЭ, которые показали хорошее согласование с результатами экспериментальных исследований.

Такой подход использован и для модели результирующего сигнала АЭ при механической обработке КМ, которая рассмотрена в работе [15], для случая преобладающего термоактивационного разрушения поверхностного слоя материала. Результаты проведенных исследований [15] показали, что для заданных условий моделирования акустического излучения при механической обработке КМ для термоактивационной моде-

ли разрушения поверхностного слоя результирующие сигналы АЭ представляет собой непрерывные сигналы с сильно изрезанной формой. Статистический анализ результатов моделирования так же показал, что при стабильности протекания процесса разрушения поверхностного слоя на различных интервалах анализа наблюдаются стабильные значения амплитудных характеристиках результирующего сигнала АЭ. Их отклонение может свидетельствовать об изменении условий механической обработки КМ.

Подходы, рассмотренные в [13–15], могут использоваться для исследования влияния различных факторов на параметры АЭ при механической обработке КМ, для случая механической модели разрушения его поверхностного слоя. При таком разрушении площадки КМ заданного размера формируется импульсный сигнал АЭ, модель которого рассмотрена в работе [16]. Одним из таких факторов являются физико-механические характеристики КМ.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование влияния на АЭ свойств КМ при его механической обработке. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- провести моделирование результирующих сигналов АЭ, формируемых в процессе механической обработки, при изменении свойств КМ;
- провести статистическую обработку результатов моделирования с получением данных по амплитудным характеристикам акустического излучения;
- определить влияние свойств КМ на амплитудные характеристики АЭ;
- определить чувствительность амплитудных характеристик АЭ к изменению свойств КМ.

### 4. Анализ влияния свойств композиционного материала на амплитудные характеристики акустической эмиссии

Будем рассматривать процесс механической обработки КМ точением, который осуществляется с постоянными технологическими параметрами (скоростью резания, глубиной резания и скоростью продольной подачи). При заданных постоянных условиях механической обработки, согласно существующим представлениям, будет происходить последовательное деформирование и разрушение элементарных площадок поверхностного слоя КМ. Деформирование площадок происходит в области упругости до разрушения, а их площадь является постоянной величиной. Будем считать, что отсутствуют трение и износ режущего инструмента, а разрушение каждой элементарной площадки сопровождается формированием одиночного импульса АЭ. При последовательном разрушении элементарных площадок КМ во времени и формировании импульсных сигналов АЭ результирующий сигнал АЭ можно представить в виде выражения

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \quad (1)$$

где  $t_j$  – моменты времени появления импульсных сигналов АЭ  $U_j$ , возникающих при последовательном разрушении  $j$ -ых площадок КМ.

Для случая механической модели разрушения поверхностного слоя КМ импульсные сигналы АЭ  $U_j$ , согласно [16], описывается выражением

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

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;  $\psi$  – коэффициент пропорциональности между механическим напряжением и амплитудой одиночного импульса возмущения, который формируется при разрушении одиночного элемента КМ (является константой);  $\delta_s$  – величина, которая пропорциональна длительности импульса возмущения при разрушении одиночного элемента КМ;  $\alpha$  – скорость нагружения;  $v_0, \gamma$  – постоянные, которые определяются свойствами КМ.

Для заданных условий разрушения поверхностного слоя КМ временные интервалы  $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$  между появлением импульсных сигналов АЭ должны быть постоянной величиной. Однако дисперсность свойств, нестабильность скорости вращения заготовки, нестабильность скорости продольной подачи или другие факторы будут влиять на длительность протекания процесса разрушения элементарных площадок КМ. С учетом данных условий, моменты времени  $t_j$  появления импульсных сигналов АЭ можно представить в виде

$$t_j = j \Delta t_j \pm \delta, \tag{3}$$

где  $j$  – номер разрушаемой площадки КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ;  $\delta$  – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ.

Согласно (2), на параметры АЭ влияют технологические и физические факторы, одним из которых является параметр  $v_0$ , определяемый свойствами КМ и характеризующий способность (склонность) материала к развитию трещин (хрупкость). Проведем моделирование его влияния на амплитудные параметры акустического излучения при механической обработке КМ.

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 время будет представлено в нормированных единицах. Амплитуда сигналов будет нормирована на величину  $u_0$ . Значения параметров  $\alpha$  и  $\gamma$  примем равными:  $\alpha = 20; \gamma = 10000$ . Значение  $v_0$  будем изменять в диапазоне величин от  $\tilde{v}_0 = 100000$  до  $\tilde{v}_0 = 500000$  с шагом приращения 100000. Интервал времени  $\Delta t_j$  и диапазон изменения случайной составляющей  $\delta$ , которые входят в выражение (3), будем задавать исходя из длительности формируемых импульсных сигналов АЭ для заданных значений  $\tilde{v}_0$ . Для начального значения  $\tilde{v}_0 = 100000$  величину  $\Delta t_j$  примем равной:  $\Delta t_1 = 0,000007$ . Значение  $\tilde{\delta}$  будем изменять в

диапазоне величин от 0 до 0,0000082 произвольным образом. Как показывают расчеты, согласно (2), при возрастании  $\tilde{v}_0$  происходит уменьшение длительности формируемых импульсных сигналов АЭ. Исходя из этого, при моделировании результирующих сигналов АЭ для других значений  $\tilde{v}_0$  величины  $\Delta t$  и  $\tilde{\delta}$  будем уменьшать пропорционально уменьшению длительности формируемых импульсных сигналов.

Фрагменты результатов моделирования изменения амплитуды результирующих сигналов АЭ во времени в относительных единицах для принятых условий показаны на рис. 1, а, б. Графики на рис. 1 построены по результатам расчета 5000 значений амплитуд для каждого результирующего сигнала АЭ. При построении графиков рис. 1 текущее время нормировано на время развития процесса разрушения поверхностного слоя КМ при его механической обработке.

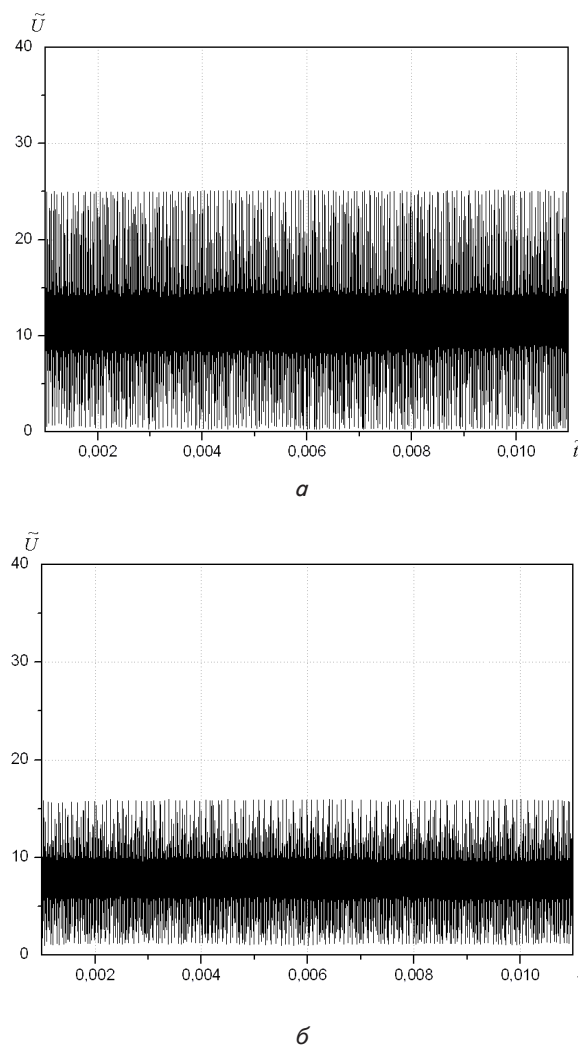


Рис. 1. Изменение амплитуд результирующего сигнала АЭ во времени, согласно (1), в относительных единицах при механической обработке КМ для механической модели разрушения его поверхностного слоя: а –  $\tilde{v}_0 = 100000$ ; б –  $\tilde{v}_0 = 500000$

Из рис. 1 видно, что результирующие сигналы АЭ представляют собой непрерывные сигналы с сильно

изрезанной формой. При этом возрастание параметра  $\tilde{v}_0$  приводит к уменьшению среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ и величины его разброса. Результаты статистического анализа данных с расчетами среднего уровня амплитуды  $\bar{U}$  результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения  $S_{\tilde{v}}$  и дисперсии  $S_{\tilde{v}}^2$  в относительных единицах для каждого значения  $\tilde{v}_0$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Амплитудные параметры результирующих сигналов АЭ

Значение $\tilde{v}_0$	$\bar{U}$	$S_{\tilde{v}}$	$S_{\tilde{v}}^2$
100000	11,63615	5,66525	32,0951
200000	9,29296	4,61336	21,2831
300000	8,55004	4,04121	16,33139
400000	8,01043	3,66646	13,44292
500000	7,75046	3,40589	11,6001

Результаты статистической обработки данных (табл. 1) показывают, что при увеличении  $\tilde{v}_0$  в 2 раза (от 100000 до 200000) значения  $\bar{U}$ ,  $S_{\tilde{v}}$  и  $S_{\tilde{v}}^2$  уменьшаются, соответственно, в 1,25 раз, в 1,23 раза и в 1,51 раз. Если  $\tilde{v}_0$  возрастает 3 раза до  $\tilde{v}_0=300000$ , то значения  $\bar{U}$ ,  $S_{\tilde{v}}$  и  $S_{\tilde{v}}^2$  уменьшаются, соответственно, в 1,36 раз, в 1,4 раза и в 1,97 раз. При увеличении  $\tilde{v}_0$  в 4 раза до  $\tilde{v}_0=400000$  значения  $\bar{U}$ ,  $S_{\tilde{v}}$  и  $S_{\tilde{v}}^2$  уменьшаются, соответственно, в 1,45 раз, в 1,55 раз и в 2,39 раз. При увеличении  $\tilde{v}_0$  в +5 раз до  $\tilde{v}_0=500000$  значения  $\bar{U}$ ,  $S_{\tilde{v}}$  и  $S_{\tilde{v}}^2$  уменьшаются, соответственно, в 1,5 раза, в 1,66 раз и в 2,77 раз.

Из результатов проведенных исследований видно, что возрастание параметра  $\tilde{v}_0$ , определяемого свойствами разрушаемого поверхностного слоя КМ, приводит к общему падению всех амплитуд-

ных параметров результирующего сигнала АЭ. Однако наибольшее падение наблюдается в дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ.

## 6. Выводы

Проведено моделирование результирующих сигналов АЭ при механической обработке КМ для механической модели формирования акустического излучения в зависимости от параметра, определяемого свойствами разрушаемого поверхностного слоя КМ. Показано, что возрастание влияющего параметра не изменяет характер формируемого акустического излучения. Результирующие сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с сильно изрезанной формой. Проведена статистическая обработка результатов моделирования с определением амплитудных параметров АЭ. Анализ полученных данных показал, что возрастание значения влияющего параметра приводит к падению среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. В тоже время, при общем падении амплитудных параметров АЭ наибольшую чувствительность к изменению влияющего параметра имеет дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Полученные результаты показывают, что при оптимизации параметров технологического процесса механической обработки композиционных материалов с различными физико-механическими характеристиками, а так же при разработке методов контроля, диагностики и мониторинга таких процессов в качестве информативного параметра необходимо анализировать закономерности изменения дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала.

## Литература

1. Teti, R. Advanced monitoring of machining operations [Text] / R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59, Issue 2. – P. 717–739. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.010
2. Neslušán, M. Analysis of chip formation during hard turning through acoustic emission [Text] / M. Neslušán, M. Šipek, J. Mrazik // Materials Engineering. – 2012. – Vol. 19. – P. 1–11.
3. Lee, D. E. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission [Text] / D. E. Lee, I. Hwang, C. M. O. Valente, J. F. G. Oliveira, D. A. Dornfeld // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46, Issue 2. – P. 176–188. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001
4. Kopač, J. Acoustic emission in drilling carbon steel and nodular gray iron [Text] / J. Kopač, S. Sali // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 19, Issue 1. – P. 91–95.
5. 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
6. Bhuiyann, M. S. H. An innovative approach to monitor the chip formation effect on tool state using acoustic emission in turning [Text] / M. S. H. Bhuiyann, I. A. Choudhury, Y. Nukman // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2012. – Vol. 58. – P. 19–28. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.001
7. 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
8. Sudha, A. J. AE waveform analysis of delamination in GFRP composite materials during drilling [Text] / A. J. Sudha, B. S. Sampathkumar, C. A. Vijaya // International Journal of Engineering and Technology. – 2009. – Vol. 1, Issue 1. – P. 63–66. doi: 10.7763/ijet.2009.v1.11

9. Thepsonthi, T. Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing [Text] / T. Thepsonthi. – A dissertation submitted to the Graduate School-New Brunswick Rutgers. The State University of New Jersey, 2014. – 246 p.
10. Teti, R. Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting [Text] / R. Teti, D. A. Dornfeld // Journal of Engineering for Industry. – 1989. – Vol. 111, Issue 3. – P. 229–237. doi: 10.1115/1.3188754
11. Liu, J. J. Modeling and analysis of acoustic emission in diamond turning [Text] / J. J. Liu, D. A. Dornfeld // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1996. – Vol. 118, Issue 2. – P. 199–207. doi: 10.1115/1.2831012
12. Keraita, J. N. Lathe stability charts via acoustic emission monitoring [Text] / J. N. Keraita, H. J. Oyango, G. K. Misoi // African Journal of Science and Technology. Science and Engineering Series. – 2001. – Vol. 2, Issue 2. – P. 81–93. doi: 10.4314/ajst.v2i2.44675
13. Філоненко, С. Ф. Акустична емісія при механічній обробці матеріалів точінням [Текст] / С. Ф. Філоненко, Т. В. Німченко // Технологические системы. – 2011. – № 3 (56). – С. 50–56.
14. Филоненко, С. Ф. Акустическая эмиссия при изменении скорости обработки материалов точением [Текст] / С. Ф. Филоненко, Т. В. Немченко, Т. Н. Косицкая // Технологические системы. – 2011. – № 4 (57). – С. 80–88.
15. Filonenko, S. Acoustic emission model with thermoactivative destruction of composite material surface [Text] / S. Filonenko // Proceedings of the National Aviation University. – 2015. – Vol. 1, Issue 62. – P. 57–62.
16. Косицька, Т. М. Моделювання сигналів акустичної емісії при механічному руйнуванні композиційного матеріалу [Текст] / Т. М. Косицька // Вісник Чернігівського Державного Технологічного Університету. – 2010. – № 45. – С. 214–220.