



УДК 620.179:534.6

Филоненко С. Ф.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

СВЯЗЬ ЭНЕРГИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Проведено моделирование энергии акустического излучения в зависимости от глубины резания при механической обработке композиционного материала для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя. Определены статистические энергетические параметры результирующих сигналов АЭ. Показано, что увеличение глубины резания приводит к возрастанию энергетических параметров акустической эмиссии. Определено, что возрастание дисперсии среднего уровня энергии акустической эмиссии опережает возрастание среднего уровня энергии и его стандартного отклонения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; композиционный материал; результирующий сигнал; амплитуда; энергия; механическая обработка; статистические характеристики.

Постановка проблемы

Проблеме контроля и диагностики технологических процессов механической обработки композиционных материалов (КМ) уделяется большое внимание в научной литературе. Это обусловлено необходимостью предотвращения повреждения поверхностных слоев КМ для получения изделий заданного качества.

Одним из методов исследования технологических процессов механической обработки КМ является метод акустической эмиссии (АЭ). Результаты проведенных исследований показывают высокую чувствительность метода к изменению параметров технологических процессов механической обработки КМ. Однако полученные экспериментальные закономерности имеют сложный и противоречивый характер изменения, что ограничивает практическое применение метода АЭ. Высокая чувствительность метода к видоизменению процессов деформирования и разрушения поверхностных слоев КМ, значительные объемы регистрируемой информации, наличие большого количества влияющих факторов усложняют интерпретацию получаемых данных, а так же определение информативности параметров сигналов АЭ.

С данной точки зрения, значение имеют теоретические исследования акустического излучения при наличии влияющих факторов. Исследования направлены на анализ влияния различных факторов на процесс акустического излучения и его параметры. Это позволит определить не только закономерности изменения акустического излучения, но и

чувствительность его параметров (амплитудных и энергетических) к изменению влияющего фактора. Такие исследования, безусловно, являются основой в оптимизации технологических процессов механической обработки КМ, а так же в разработке методов их контроля, диагностики и мониторинга. При этом контроль, диагностика и мониторинг относятся как к обрабатываемому КМ, так и к обрабатывающему (режущему) КМ.

Одним из факторов, который влияет на акустическое излучение, является глубина резания или площадь разрушаемого поверхностного слоя при механической обработке КМ. Теоретический анализ взаимосвязи глубины резания КМ с видоизменением акустического излучения и его энергетическими параметрами для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя, несомненно, представляет научный и практический интерес.

Анализ источников и публикаций

Экспериментальные исследования АЭ при механической обработке КМ с использованием операций точения, сверления и фрезерования показывают, что регистрируемые сигналы являются непрерывными сигналами [1–3]. Как правило, основными обрабатываемыми и анализируемыми параметрами регистрируемых сигналов АЭ являются: средний уровень или среднеквадратическое значение амплитуд, амплитудные спектры, а так же статистические характеристики сигналов АЭ (стандартное отклонение, коэффициент асимметрии распределения амплитуд, эксцесса) [1, 4, 5].

Иногда проводят анализ площади под сигналами или накопленных значений площади под сигналами, энергии или счета энергии, счета сигналов при введении порога ограничения и другие параметры регистрируемых сигналов.

Исследование влияния глубины резания при механической обработке материалов, включая и КМ, проведено в ряде работ. Результаты проведенных исследований показывают разнообразие полученных закономерностей изменения амплитудных параметров АЭ. Закономерности являются не устойчивыми и противоречивыми. Так в работе [6] показано, что для заданной скорости резания зависимости изменения среднеквадратического значения (СКЗ) амплитуд регистрируемых сигналов АЭ при возрастании глубины резания имеют сложный характер изменения. Наблюдаются подъемы и спады СКЗ амплитуд. При этом на разных скоростях резания зависимости не являются устойчивыми. Подобный результат получен и в работе [7]. При этом показано, что сложный характер изменения имеют не только среднее значение и СКЗ амплитуд регистрируемых сигналов АЭ, но и их статистические характеристики, такие как: стандартное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения амплитуд. В работах [8, 9] при выполнении механической обработки композита на основе алюминия с использованием операции фрезерования показано, что возрастание глубины резания приводит к возрастанию СКЗ амплитуд сигналов АЭ. При этом увеличение СКЗ амплитуд практически происходит линейным образом.

Теоретические исследования амплитудных параметров АЭ при механической обработке КМ с изменением глубины резания рассмотрены в работах [10, 11]. Исследования проводились на основе модели акустического излучения, которое формируется при механической обработке КМ, для преобладающего термоактивационного разрушения его поверхностного слоя [12]. При этом считалось, что при механической обработке КМ на малых промежутках времени происходит последовательное разрушение во времени площадок поверхностного слоя одинакового размера. Такое условие соответствует постоянным параметрам технологического процесса механической обработки КМ, т.е. постоянным величинам глубины и скорости резания, а также скорости продольной подачи обрабатываемого инструмента. Также считалось, что разрушение каждой площадки КМ приводит к формированию акустического излучения в виде импульсного сигнала АЭ, а результирующий сигнал описывается выражением вида

$$U_p(t) = \sum_j U_{jR}(t - t_j), \quad (1)$$

где t_j — моменты времени появления импульсных сигналов АЭ U_{jR} , возникающих при преобладаю-

щем термоактивационном разрушении площадок КМ заданного размера.

Модель импульсного сигнала АЭ при термоактивационном разрушении площадок КМ, согласно [12], описывается выражением

$$U_{jR}(t) = u_0 \theta \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \alpha} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{-\chi t_0})}, \quad (2)$$

где $u_0 = \frac{1}{\tau_0} \beta \delta_s$; $\theta = N_0/N_T - N_0$ — количество разру-

шаемых элементов КМ; N_T — начальное количество разрушаемых элементов КМ; τ_0 — параметр, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов решетки твердого тела; α — скорость изменения приложенной нагрузки; t — текущее время; β — коэффициент пропорциональности между напряжением разрушения и амплитудой одиночного импульса возмущения при разрушении

одного элемента; $\delta_s = \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} a(\tau) d\tau$; δ — длительность одиночного импульса возмущения; $a(\tau)$ — функция, определяющая форму одиночного импульса

возмущения; $\chi = \frac{\gamma \alpha}{kT}$; $t_0 = \frac{U_0}{\gamma \alpha}$; U_0 — начальная энергия активации (величина начального энергетического барьера) процесса разрушения; k — постоянная Больцмана; T — температура; γ — структурно чувствительный коэффициент.

Параметр θ , в выражении (2), используется для учета площади разрушаемых площадок КМ.

Предполагая, что дисперсность свойств обрабатываемого КМ, нестабильность скорости вращения заготовки, скорости продольной подачи или другие факторы могут влиять на длительность последовательных процессов разрушения площадок поверхностных слоев, т.е. длительность формируемых импульсных сигналов АЭ, то момент времени t_j может быть описан выражением вида

$$t_j = j \Delta t_j \pm \delta_R, \quad (3)$$

где Δt_j — интервал времени между началом формирования последующего импульсного сигнала АЭ по отношению к предыдущему; $j = 0, 1, \dots, n$ — номер разрушаемой площадки обрабатываемого КМ; δ_R — случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ.

Результаты проведенных исследований показали, что при возрастании площади разрушения поверхностного слоя КМ (глубины резания) не наблюдается изменений в характере акустического излучения. Результирующие сигналы АЭ являются непрерывным сигналом с сильно изрезанной фор-

мой. В тоже время, возрастание площади разрушения поверхностного слоя КМ приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. При этом средний уровень амплитуды результирующих сигналов АЭ и его стандартное отклонение с возрастанием глубины резания имеют линейный характер увеличения, а дисперсия среднего уровня амплитуды возрастает не линейным образом. Статистический анализ полученных данных так же показал, что с возрастанием глубины резания наибольшее увеличение наблюдается в дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ.

В тоже время, интерес представляет исследование влияния глубины резания КМ на энергетические характеристики результирующего сигнала АЭ.

Формулирование цели статьи

Целью работы является исследование влияния глубины резания КМ при его механической обработке на энергетические параметры АЭ для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи: провести моделирование изменения энергии сигналов АЭ во времени при изменении глубины резания (площади разрушения) КМ; определить влияние глубины резания на модификацию характера изменения энергии акустического излучения во времени; провести статистическую обработку результатов моделирования с получением числовых данных по статистическим энергетическим параметрам АЭ; провести сравнение энергетических параметров АЭ к изменению глубины резания КМ.

Результаты исследований

Будем рассматривать процесс механической обработки КМ точением. Обработка КМ осуществляется с постоянными технологическими параметрами. Такими параметрами являются: скорость резания, глубина резания и скорость продольной подачи резца. При таких условиях, согласно существующим представлениям, будет происходить последовательное деформирование и разрушение элементарных площадок поверхностного слоя КМ. Будем считать, что деформирование площадок происходит в области упругости до разрушения. Разрушаемые площадки имеют одинаковую и постоянную площадь. Положим, что разрушение каждой элементарной площадки сопровождается формированием одиночного импульса АЭ. Последовательное формирование импульсных сигналов АЭ приводит к формированию результирующего

сигнала, энергию изменения которого можно записать в виде

$$E_p(t) = \sum_j E_{jR}(t - t_j) \quad (4)$$

где $t_j = j\Delta t_j \pm \delta$ — моменты времени появления импульсных сигналов АЭ E_{jR} , возникающих при последовательном разрушении j -ых площадок КМ; j — номер разрушаемой площадки КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ ($j = 0, 1, \dots, n$); δ — случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ; $E_{jR} = U_{jR}^2 \cdot U_{jR}$ — амплитуды j -го сигнала АЭ.

При моделировании энергии результирующего сигнала АЭ, согласно (4), амплитуды импульсного сигнала АЭ U_{jR} будем рассчитывать для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя КМ, согласно выражению (2).

По результатам расчета амплитуд импульсных сигналов АЭ будем проводить расчеты их энергии по выражению

$$E_j(t) = \Delta t_k \sum_i U_{jR}^2(i \cdot \Delta t_k) \quad (5)$$

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 энергии результирующего сигнала АЭ будем проводить, согласно (4) и (5), с учетом (2) и (3), в относительных единицах. При моделировании параметры, которые входят в выражение (2), приведем к безразмерным величинам, а энергия и время будут представлены в нормированных единицах. Значения параметров в выражениях (2) и (3) примем такими же, как и в работе [10]. Будем считать, что при начальных условиях для некоторой глубины резания разрушается единичная площадь площадки КМ, т.е. начальное значение $\bar{\theta} = 1$. Далее будет происходить увеличение площади разрушения площадки КМ, величина которой определяется увеличением глубины резания, т.е. будет происходить увеличение количества элементов N_0 , по отношению к начальному количеству элементов N_r , или будет увеличиваться значение θ . При моделировании значение θ в относительных величинах будем изменять от $\bar{\theta} = 1$ до $\bar{\theta} = 3$ с шагом приращения 0,5.

При моделировании амплитуду сигналов будем нормировать на значение u_0 . Величину $\frac{Y}{kT}$ приведем к единичному нормированному значению. При таких условиях $\chi = \alpha$. Значение параметра τ_0 примем равным $\bar{\tau}_0 = 10^{-7}$. Величину $\tilde{\chi}$ или $\tilde{\alpha}$ примем равной $\tilde{\chi} = 30$. Интервал времени $\Delta \tilde{\tau}_j$ примем исходя из расчета длительности импульсного сигнала АЭ, согласно (2). Для заданного значения $\tilde{\chi} = 30$ величину $\Delta \tilde{\tau}_j$ примем равной $\Delta \tilde{\tau}_j = 0,08$. Значение

параметра $\tilde{\delta}_R$, который входит в выражение (3), для $\tilde{\chi} = 30$ будем изменять в диапазоне величин от 0 до 0,12 произвольным образом. При расчетах энергии, согласно (5), значение $\Delta\tilde{t}_k$ составляло: $\Delta\tilde{t}_k = 0,000002$.

Результаты проведенного моделирования в виде зависимостей изменения энергии результирующих

сигналов АЭ во времени в относительных единицах для разных значений параметра $\tilde{\theta}$ показаны на рис. 1. На графиках рис. 1 время нормировано на время развития процесса разрушения поверхностного слоя КМ при его механической обработке. При построении графиков рис. 1 проведены расче-

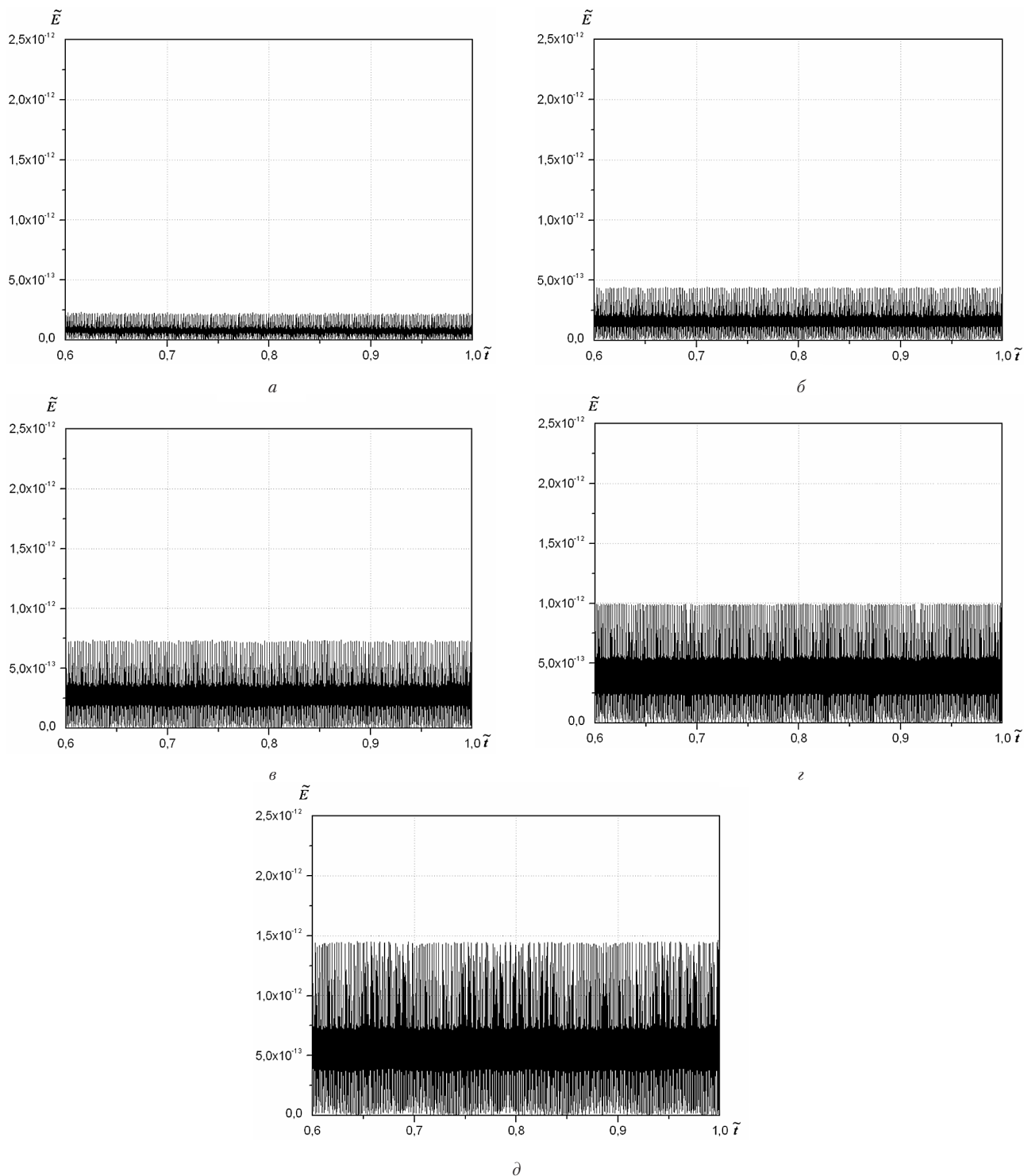


Рис. 1. Графики изменения энергии результирующих сигналов АЭ во времени, согласно (4), в относительных единицах при механической обработке для термоактивационного разрушения КМ при разной площади разрушения его поверхностного слоя. Параметры моделирования: $\tilde{\chi} = 30$; $\Delta\tilde{t}_j = 0,08$; $\tilde{\tau}_0 = 10^{-7}$; $\tilde{\delta}_R$ изменяется в диапазоне от 0 до 0,12. Площадь разрушения КМ в относительных единицах: а – $\tilde{\theta} = 1$; б – $\tilde{\theta} = 1,5$; в – $\tilde{\theta} = 2$; г – $\tilde{\theta} = 2,5$; д – $\tilde{\theta} = 3$



ты 4000 значений амплитуд и, соответственно, энергий для каждого результирующего сигнала АЭ.

Полученные результаты (рис. 1) показывают, что увеличение площади разрушения поверхностного слоя КМ (возрастание параметра $\tilde{\theta}$) приводит к возрастанию среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ и величины его разброса. Статистическая обработка энергетических параметров результирующих сигналов АЭ приведена в табл. 1. В табл. 1 приняты следующие обозначения: $\tilde{\theta}$ — параметр, характеризующий площадь разрушения (глубину резания) поверхностного слоя КМ; \tilde{E} — средний уровень энергии результирующего сигнала АЭ; $s_{\tilde{E}}$ — стандартное отклонение среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ; $s_{\tilde{E}}^2$ — дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ.

Из табл.1 видно, что при значении параметра $\tilde{\theta} = 1$ средний уровень энергии \tilde{E} результирующего сигнала АЭ составляет $\tilde{E} = 8,08568 \cdot 10^{-14}$, а его стандартное отклонение $s_{\tilde{E}}$ и дисперсия $s_{\tilde{E}}^2$, соответственно, равны: $s_{\tilde{E}} = 5,27677 \cdot 10^{-14}$; $s_{\tilde{E}}^2 = 2,78443 \cdot 10^{-27}$. Увеличение $\tilde{\theta}$ в 1,5 раза (до $\tilde{\theta} = 1,5$) приводит к возрастанию \tilde{E} , $s_{\tilde{E}}$ и $s_{\tilde{E}}^2$, соответственно, в 1,84924 раз, в 1,95037 раз и в 3,80393 раза. При увеличении $\tilde{\theta}$ возрастает 2 раза (до $\tilde{\theta} = 2,0$) значения \tilde{E} , $s_{\tilde{E}}$ и $s_{\tilde{E}}^2$ увеличиваются, соответственно, в 2,76873 раза, в 3,21609 раз и в 10,34325 раз. Дальнейшее увеличение $\tilde{\theta}$ в 2,5 раза (до $\tilde{\theta} = 2,5$) значения среднего уровня энергии \tilde{E} результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения $s_{\tilde{E}}$ и дисперсия $s_{\tilde{E}}^2$, соответственно, возрастают в 3,97118 раза, в 4,91841 раз и в 24,19071 раз. Если $\tilde{\theta}$ возрастает в 3 раза (до $\tilde{\theta} = 3,0$), то значения \tilde{E} , $s_{\tilde{E}}$ и $s_{\tilde{E}}^2$ возрастают в 5,10013 раз, в 6,32446 раз и в 39,99875 раз.

Полученные результаты (рис.1, табл. 1) показывают, что при механической обработке КМ для случая термоактивационной модели его разрушения увеличение площади разрушения поверхностного слоя (глубины резания) следует ожидать возрастания энергетических параметров акустического излучения — среднего уровня энергии, стандартного отклонения среднего уровня энергии и дисперсии среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ. Статистическая обработка полученных

данных так же показала, что наиболее чувствительным энергетическим параметром акустического излучения при увеличении площади разрушения поверхностного слоя КМ является дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Ее возрастание опережает возрастание среднего уровня энергии и стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ.

Следует отметить, что возрастание энергетических параметров результирующих сигналов АЭ при увеличении площади разрушения поверхностного слоя КМ значительно превосходит возрастание их амплитудных параметров, которые рассмотрены в работе [10]. Так, согласно полученным данным, при увеличении $\tilde{\theta}$ в 3 раза возрастание дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ в 4,4 раза превышает возрастание дисперсии среднего уровня его амплитуды.

Заключение

Проведено моделирование энергии акустического излучения при механической обработке КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя в зависимости от глубины резания. Показано, что возрастание глубины резания КМ не приводит к модификации характера изменения энергии акустического излучения во времени. Энергия сигналов АЭ во времени имеют непрерывный характер изменения с сильно изрезанной формой. Однако с увеличением глубины резания КМ происходит возрастание среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Проведена статистическая обработка данных моделирования с определением значений статистических энергетических характеристик результирующих сигналов АЭ. Показано, что увеличение глубины резания при механической обработке КМ оказывает различное влияние на возрастание энергетических параметров акустического излучения. Определено, что дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ опережает возрастание среднего уровня энергии и его стандартного отклоне-

Таблица 1

Энергетические статистические характеристики результирующих сигналов АЭ при возрастании площади разрушения поверхностного слоя КМ

| $\tilde{\theta}$ | \tilde{E} | $s_{\tilde{E}}$ | $s_{\tilde{E}}^2$ |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1,0 | $8,08568 \cdot 10^{-14}$ | $5,27677 \cdot 10^{-14}$ | $2,78443 \cdot 10^{-27}$ |
| 1,5 | $1,49524 \cdot 10^{-13}$ | $1,02916 \cdot 10^{-13}$ | $1,05918 \cdot 10^{-26}$ |
| 2,0 | $2,23871 \cdot 10^{-13}$ | $1,69706 \cdot 10^{-13}$ | $2,88001 \cdot 10^{-26}$ |
| 2,5 | $3,21097 \cdot 10^{-13}$ | $2,59533 \cdot 10^{-13}$ | $6,73573 \cdot 10^{-26}$ |
| 3,0 | $4,1238 \cdot 10^{-13}$ | $3,33727 \cdot 10^{-13}$ | $1,11374 \cdot 10^{-25}$ |

ния. Результаты проведенных исследований показывают, что при разработке методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ с определением глубины резания КМ может использоваться анализ дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ.

В тоже время интерес представляет исследование и описание закономерностей изменения энергетических параметров результирующих сигналов АЭ при изменении глубины резания КМ.

Литература

- [1] Ren Q. Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy logic system and uncertain in machining/Q. Ren/ Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy of Ecole Polytechnique de Montreal (Monreal, Canada, 2012) – 111 p.
- [2] Karimi N.Z. Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates/N.Z. Karimi, H. Heidary, G. Minak, M. Ahmadi//Composite Structures – 2013 – v.98 – P. 59–68
- [3] Mian A.J. Size effect in micromachining /A.J. Mian/ A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy in the faculty of engineering and physical sciences. The university of Manchester – 2011 – 209 p.
- [4] Lu P. Short- time Fourier transform method in AE signal analysis for diamond coating failure monitoring in machining application/P. Lu, Y. Kevin Chou, R.G. Tomthpson// Proceedings of the ASME 2010 Int. Manufacturing Science and Engineering Conf. MSEC 2010 (12 – 15 October, 2010, Erie, Pennsylvania, USA) – P.1-8.
- [5] Fadare D.A. Influence of cutting parameters and tool wear on acoustic emission signal in high-speed turning of Ti-6Al-4V alloy//D.A. Fadare, W.F. Sales, J. Bonney and E.O. Ezugwu//Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences – 2012 – V.3 (3) – P.547-555
- [6] Ronald B.A. Studies on grooving of dispersion strengthened metal matrix composites/B.A. Ronald, L.Vijayaraghavan, R.Krishnamurthy//Materials forum – 2007 – v.31 – P.102-109.
- [7] Fadare D.A. Influence of cutting parameters and tool wear on acoustic emission signal in high-speed turning of Ti-6Al-4V Alloy /D.A. Fadare, W.F. Sales, J. Bonney, E.O. Ezugwu// J. of Emerging Trends in Engin. and Applied Sciences – 2012 – v.3 – No3 – P.547-555.
- [8] Giriraj B. Prediction of progressive tool wear using acoustic emission technique and artificial neural network/B. Giriraj//Journal of Civil Engineering Science: An International Journal – 2012 – V.1 – No.1-2 – P.43-46.
- [9] Thepsonthi T. Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing /T. Thepsonthi//A dissertation submitted for the degree of doctor of philosophy (The State University of New Jersey) – 2014 – 246 p.
- [10] Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при изменении площади разрушения поверхностного слоя обрабатываемого композиционного материала /С.Ф. Филоненко// Вісник інженерної академії України – 2015 – №1 – С.252-257.
- [11] Филоненко С.Ф. Влияние различных факторов на закономерности изменения акустической эмиссии при обработке композиционных материалов/С.Ф. Филоненко// Вісник інженерної академії України – 2015 – №2 – С.195-200.
- [12] Filonenko S. Acoustic emission model with thermoactive destruction of composite material surface/S. Filonenko// Proceedings of the National Aviation University – 2015 – N1 (62) – P. 57–62

Filonenko S. F.

National Aviation University. Ukraine, Kiev

CONNECTION OF ACOUSTIC EMISSION ENERGY WITH A CUTTING DEPTH OF COMPOSITE MATERIAL

The simulation acoustic radiation energy is conducted depending on a cutting depth at machine work of composite material for thermoactive model of surface layer destruction. The statistical energy parameters of acoustic emission resultant signals are determined. It is shown, that the increase of a cutting depth results in ascending energy parameters of acoustic emission. Is determined, that the ascending of acoustic emission average level energy dispersion advances ascending an average level of energy and its standard deviation.

Keywords: acoustoc emission; composite material; the resulting signal; amplitude; energy; mechanical processing; statistical characteristics.



References

- [1] Ren Q. Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy logic system and uncertain in machining/Q. Ren/ Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy of Ecole Polytechnique de Montreal (Monreal, Canada, 2012) – 111 p.
- [2] Karimi N.Z. Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates/N.Z. Karimi, H. Heidary, G. Minak, M. Ahmadi//Composite Structures – 2013 – v.98 – P. 59–68
- [3] Mian A.J. Size effect in micromachining /A.J. Mian/ A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy in the faculty of engineering and physical sciences. The university of Manchester – 2011 – 209 p.
- [4] Lu P. Short- time Fourier transform method in AE signal analysis for diamond coating failure monitoring in machining application/P. Lu, Y. Kevin Chou, R.G. Tomthpson// Proceedings of the ASME 2010 Int. Manufacturing Science and Engineering Conf. MSEC 2010 (12 – 15 October, 2010, Erie, Pennsylvania, USA) – P.1-8.
- [5] Fadare D.A. Influence of cutting parameters and tool wear on acoustic emission signal in high-speed turning of Ti-6Al-4V alloy//D.A. Fadare, W.F. Sales, J. Bonney and E.O. Ezugwu//Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences – 2012 – V.3 (3) – P.547-555
- [6] Ronald B.A. Studies on grooving of dispersion strengthened metal matrix composites/B.A. Ronald, L.Vijayaraghavan, R.Krishnamurthy//Materials forum – 2007 – v.31 – P.102-109.
- [7] Fadare D.A. Influence of cutting parameters and tool wear on acoustic emission signal in high-speed turning of Ti-6Al-4V Alloy /D.A. Fadare, W.F. Sales, J. Bonney, E.O. Ezugwu// J. of Emerging Trends in Engin. and Applied Sciences – 2012 – v.3 – No3 – P.547-555.
- [8] Giriraj B. Prediction of progressive tool wear using acoustic emission technique and artificial neural network/B. Giriraj//Journal of Civil Engineering Science: An International Journal – 2012 – V.1 – No.1-2 – P.43-46.
- [9] Thepsonthi T. Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing /T. Thepsonthi//A dissertation submitted for the degree of doctor of philosophy (The State University of New Jersey) – 2014 – 246 p.
- [10] Filonenko S.F. Akusticheskaja jemissija pri izmenenii ploshhadi razrushenija poverhnosnogo sloja obrabatyvaemogo kompozicionnogo materiala / S.F. Filonenko // Visnik inzhenernoy akademiji Ukrainy. – 2015. – №1. – P. 252-257.
- [11] Filonenko S.F. Vlijanie razlichnyh faktorov na zakonomernosti izmenenija akusticheskoy jemissii pri obrabotke kompozicionnyh materialov / S.F. Filonenko // Visnik inzhenernoy akademiji Ukrainy. – 2015. – №2. – P.195-200.
- [12] Filonenko S. Acoustic emission model with thermoactivative destruction of composite material surface/S. Filonenko// Proceedings of the National Aviation University – 2015 – N1 (62) – P. 57–62