УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф.
Национальный авиационный университетУкраина, г. Киев

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведено моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при механической обработке композиционных материалов для термоактивационной модели акустического излучения. Определены закономерности изменения амплитудных параметров результирующих сигналов в зависимости от скорости механической обработки композиционных материалов. Проведено описание полученных закономерностей с их статистическими характеристиками. Показана чувствительность амплитудных параметров акустической эмиссии к изменению скорости механической обработки композиционных материалов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; композиционный материал; результирующий сигнал; амплитуда; механическая обработка; закономерность; параметр.

Постановка проблемы

Композиционные материалы (КМ) находят все большее применение при изготовлении изделий авиационной, космической, энергетической отраслей, судостроении, автомобилестроении и других видов производств. Это обусловлено широким спектром физико-механических характеристик КМ, а так же высокой их стойкостью к температурам и агрессивным средам. Однако, не смотря на значительные преимущества КМ, при их использовании возникает ряд проблем, которые связаны с обеспечением качества изготавливаемых изделий. В первую очередь, это относится к механической обработке КМ: сверление, фрезерование, точение, шлифование. При этом проблемы обеспечения качества изделий из КМ при выполнении данных операций обусловлены, прежде всего, склонностью КМ к хрупкому разрушению.

Исследованиям процессов механической обработки КМ посвящено большое количество работ. Они направлены на оптимизацию технологических режимов обработки КМ и разработку методов их контроля и диагностики. При проведении таких исследований используются различные методы, среди которых широкое распространение имеет метод акустической эмиссии (АЭ). Применение метода АЭ обусловлено высокой его чувствительностью и малой инерционностью к разрушению КМ. Это позволяет получать значительные объемы информации о процессах, которые происходят в поверхностных слоях КМ при их механической обработке. Однако значительное количество факторов, влияющих на формируемое акустическое излучение (физико-механические характеристики КМ, скорость механической обработки, глубина резания или объем разрушаемого материала, износ резального инструмента и другие), приводят к сложностям в интерпретации изменения параметров регистрируемого излучения. Следствием этого является ограниченность применения метода АЭ при контроле и диагностике технологических процессов механической обработки КМ.

Решение данной проблемы требует, в первую очередь, развития теоретических исследований с созданием моделей и моделирования формируемого акустического излучения, с учетом действия различных факторов. Одним из таких факторов является скорость механической обработки КМ. При этом необходимо учитывать и модели разрушения КМ. Безусловно, что определенные закономерности изменения параметров акустического излучения с их экспериментальным подтверждением позволят решить проблему контроля и диагностики технологических процессов механической обработки КМ.

Анализ источников и публикаций

Метод АЭ, как показывают обзоры научных публикаций [1–3], широко используется при исследовании процессов механической обработки материалов. Опубликованные результаты практически рассматривают все виды механической обработки (сверление, точение, фрезерование, шлифование) и широкий спектр обрабатываемых материалов (материалы с кристаллической структурой и КМ) [4–10]. Однако большая часть работ касается механической обработки материалов с кристаллической структурой.

В основе проводимых исследований лежат представления о различных источниках акустиче-

© Филоненко С.Ф.

ского излучения при выполнении операций механической обработки материалов. К таким видам сигналов АЭ относят: непрерывные сигналы, формируемые при работе острого или затупленного инструмента; кратковременные (дискретные) сигналы, формируемые при скалывании стружки и разрушении режущего инструмента [11]. Данные представления формируют и направления исследований, которые связаны с оптимизацией параметров, контролем и мониторингом технологических процессов механической обработки материалов, включая контроль и мониторинг состояния режущего инструмента (износ и разрушение). Практически все опубликованные работы относятся к экспериментальным исследованиям сигналов АЭ. При этом теоретических исследований АЭ при механической обработке материалов мало.

Данные экспериментальных исследований показывают, что регистрируемые сигналы АЭ при механической обработке материалов представляют собой непрерывные сигналы с сильно изрезанной формой [4, 6, 10, 12]. Такой вид сигналов определяет способы анализа регистрируемой информации – анализ средних, среднеквадратических значений амплитуд, площади под сигналами или их накопленных значений, энергии (счета энергии), счета сигналов при введении порога ограничения, а так же спектров сигналов АЭ на временных интервалах. В проведенных исследованиях рассмотрены результаты анализа формы, амплитудных и энергетических параметров регистрируемых сигналов АЭ, а так же низкочастотных и высокочастотных пиков их спектров при изменении параметров механической обработки материалов: обрабатываемого материала; скорости его обработки; глубины резания; износа резального инструмента; угла резания и других параметров. Однако полученные зависимости касаются отельных материалов, не всегда являются устойчивыми и согласуются друг с другом. При этом теоретические исследования акустического излучения при механической обработке материалов практически отсутствуют.

В работе [10] рассмотрены результаты моделирования сигналов АЭ, которые формируются при изменении скорости механической обработки материалов с кристаллической структурой, в соответствии с разработанной моделью акустического излучения. Модель построена на существующих представлениях [13], что основными процессами, протекающими при резании, являются последовательные процессы пластического деформирования и разрушения материалов, т.е. процессы, которые являются источниками акустического излучения [14]. Проведенные теоретические исследования позволили получить закономерности изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Так же показано, что ожидаемые закономерности хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В общем случае модель результирующего сигнала АЭ при механической обработке КМ без учета износа резального инструмента рассмотрена в работе [15] в виде

$$U_p(t)=\sum_i U_R(t-t_j), \qquad (1)$$

где t_j – моменты времени появления импульсных сигналов АЭ U_R, возникающих при преобладающем термоактивационном разрушении определенных площадок КМ.

Момент времени появления каждого последующего сигнала АЭ можно записать в виде

$$t_j = j\Delta t_j \qquad (2)$$

где $j\Delta t_j$ – интервал времени между началом формирования последующего импульсного сигнала АЭ по отношению к предыдущему.

В виде модели импульсного сигнала АЭ использована модель сигнала [16], формируемого при термоактивационном разрушении КМ

$$U_R(t)=u_0\alpha t e^{-\chi(t_0-t)_e^{\frac{1}{\tau_0\chi}\left(e^{-\chi(t_0-t)}-e^{\chi t_0}\right)}}, \qquad (3)$$

где τ_0 – параметр, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов решетки твердого тела;

α – скорость изменения приложенной нагрузки;

t – текущее время;

$u_0=\frac{N_0}{\tau_0}\beta\delta_s$ – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении заданной площади КМ, состоящей из N_0 элементов (начального количества элементов);

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.

Исследования [15] проводились при условии, что разрушение поверхностного слоя КМ при его механической обработке протекает последователь-

ным образом. Проведенные исследования [15] показали, что в процессе механической обработки КМ формируемый результирующий сигнал АЭ является непрерывным сигналом. Полученные результаты согласуются с данными экспериментальных исследований при различных видах механической обработке материалов [4, 8, 17]. Такой сигнал АЭ можно характеризовать средним уровнем и его статистическими характеристиками.

В выражение для импульсного сигнала АЭ (3) входит ряд параметров, которые должны влиять на параметры результирующего сигнала АЭ при механической обработке КМ. Одним из таких параметров является скорость механической обработки (нагружения) КМ. Безусловно, интерес представляет ее влияние на параметры результирующего сигнала АЭ.

Формулирование цели статьи

В работе будет проведено моделирование результирующих сигналов АЭ во времени при преобладающем термоактивационном разрушении КМ в зависимости от скорости его механической обработки. Будет проведен анализ амплитудных параметров сигналов АЭ и их статистических характеристик. Будут определены закономерности их изменения при изменении скорости механической обработки КМ, а так же чувствительность амплитудных параметров АЭ.

Результаты исследований

Согласно (1), с учетом (2) и (3), проведем моделирование результирующих сигналов АЭ в относительных единицах в зависимости от скорости механической обработки КМ. Моделирование проведем при следующих условиях. Параметры, входящие в выражение (2) приведем к безразмерным величинам, а время нормировано на t_0. Будем считать, что разрушается единичная площадь материала, т.е. глубина резания, от которой зависит площадь разрушения, являются постоянной величиной. Амплитуду сигналов будем нормировать на значение u_0. Величину $\chi=\frac{\gamma\alpha}{kT}$ приведем к единичному нормированному значению. При таких условиях $\chi=\alpha$. Значение параметра τ_0 примем равным $\tilde{\tau}_0=10^{-7}$. Величину $\tilde{\chi}$ или $\tilde{\alpha}$ будем изменять в диапазоне значений от 20 до 60 с шагом приращения 10.

Скорость механической обработки КМ будет определять длительность процесса разрушения заданной площади КМ и временные параметры импульсных сигналов АЭ, т.е. их длительность. В идеальном случае для заданных параметров механической обработки КМ интервалы времени Δt_j появления импульсных сигналов АЭ, согласно (2), будут одинаковыми. Однако на длительность протекания последовательных процессов разрушения КМ во времени будет оказывать влияние различные факторы. Например, дисперсность свойств обрабатываемого КМ, нестабильность скорости вращения заготовки, скорости продольной подачи или другие. В этом случае, момент времени t_j можно записать в виде

$$t_j = j\Delta t_j \pm \delta \qquad (4)$$

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

Расчеты импульсных сигналов АЭ, согласно (3), показывают, что увеличение скорости приводит к увеличению амплитуды и уменьшению длительности формируемых сигналов АЭ. Исходя из этого, для заданных скоростей значения примем равными: $\tilde{\chi}$=20-$\Delta\tilde{t}_j$=0,1; $\tilde{\chi}$=30-$\Delta\tilde{t}_j$=0,08; $\tilde{\chi}$= 40 - $\Delta\tilde{t}_j$= =0,06; $\tilde{\chi}$=50-$\Delta\tilde{t}_j$=0,04; $\tilde{\chi}$=60-$\Delta\tilde{t}_j$=0,03. Значение $\tilde{\delta}$ для $\tilde{\chi}$=20 будем изменять в диапазоне величин от 0 до 0,16 произвольным образом. Для других значений $\tilde{\chi}$ величина $\tilde{\delta}$ будем уменьшать пропорционально уменьшению $\Delta\tilde{t}_j$.

Моделирование результирующих сигналов АЭ для принятых условий в относительных единицах в виде зависимостей изменения их амплитуды во времени показаны на рис. 1. Графики на рис. 1 построены по результатам расчета 4000 значений амплитуд для каждого результирующего сигнала АЭ. При построении графиков рис. 1 текущее время нормировано на время развития процесса разрушения поверхности КМ при его механической обработке.

Из рис. 1 видно, что с возрастанием $\tilde{\chi}$ происходит возрастание среднего уровня амплитуды $\tilde{\tilde{U}}$ результирующих сигналов АЭ и величины его разброса. Результаты статистического анализа данных с расчетами среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и дисперсии $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ в относительных единицах для каждого значения $\tilde{\chi}$ показали следующее.

При $\tilde{\chi}$ = 20 средний уровень амплитуды $\tilde{\tilde{U}}$ результирующего сигнала АЭ составляет $\tilde{\tilde{U}}$ = 0,00017, а его стандартное отклонение $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и дисперсия $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ соответственно, равны: $S_{\tilde{\tilde{U}}}$= = 2,511·10^{-6}; $s_{\tilde{\tilde{U}}}$= 6,31·10^{-12}. При увеличении $\tilde{\chi}$ в

1,5 раза (от 20 до 30) значения $\tilde{\tilde{U}}$, $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ возрастают, соответственно, в 1,58 раза, в 3,0 раза и в 8,8 раз. Если $\tilde{\chi}$ возрастает 2 раза до $\tilde{\chi}$ =40, то значения $\tilde{\tilde{U}}$, $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ увеличиваются, соответственно, в 2,2 раза, в 6,58 раз и в 43,34 раза. При увеличении $\tilde{\chi}$ в 2,5 раза до $\tilde{\chi}$ = 50 значения $\tilde{\tilde{U}}$, $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ возрастают в 2,74 раза, в 11,57 раза и в 133,88 раза. При увеличении $\tilde{\chi}$ в 3 раза до $\tilde{\chi}$ = 60 значения $\tilde{\tilde{U}}$, $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ и $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ возрастают в 3,58 раза, в 17,56 раза и в 308,32 раза.

Зависимости изменения среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и дисперсии при возрастании $\tilde{\chi}$ приведены на рис. 2.

Обработка данных с аппроксимацией полученных зависимостей (рис. 2) показала, что зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ с возрастанием $\tilde{\chi}$ хорошо описывается линейной функцией вида

$$\tilde{\tilde{U}} = a + b\bar{\chi}, \qquad (5)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения которых составляют: a=-3,324·10^{-6}; b = 1,009·10^{-6}.

При описании данных (рис. 2, *а*) зависимостью (5) коэффициент корреляции R и стандартное отклонение SD, соответственно, составляют: R = 0,99975; SD =4,15315·10^{-7}.

Зависимости изменения стандартного отклонения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и его дисперсии (рис. 2, *б, в*) от $\tilde{\chi}$ носят нелинейный характер возрастания. Они хорошо описываются функцией вида

$$\tilde{Q} = c \cdot b^{\bar{\chi}}, \qquad (6)$$

где c и d аппроксимирующего выражения.

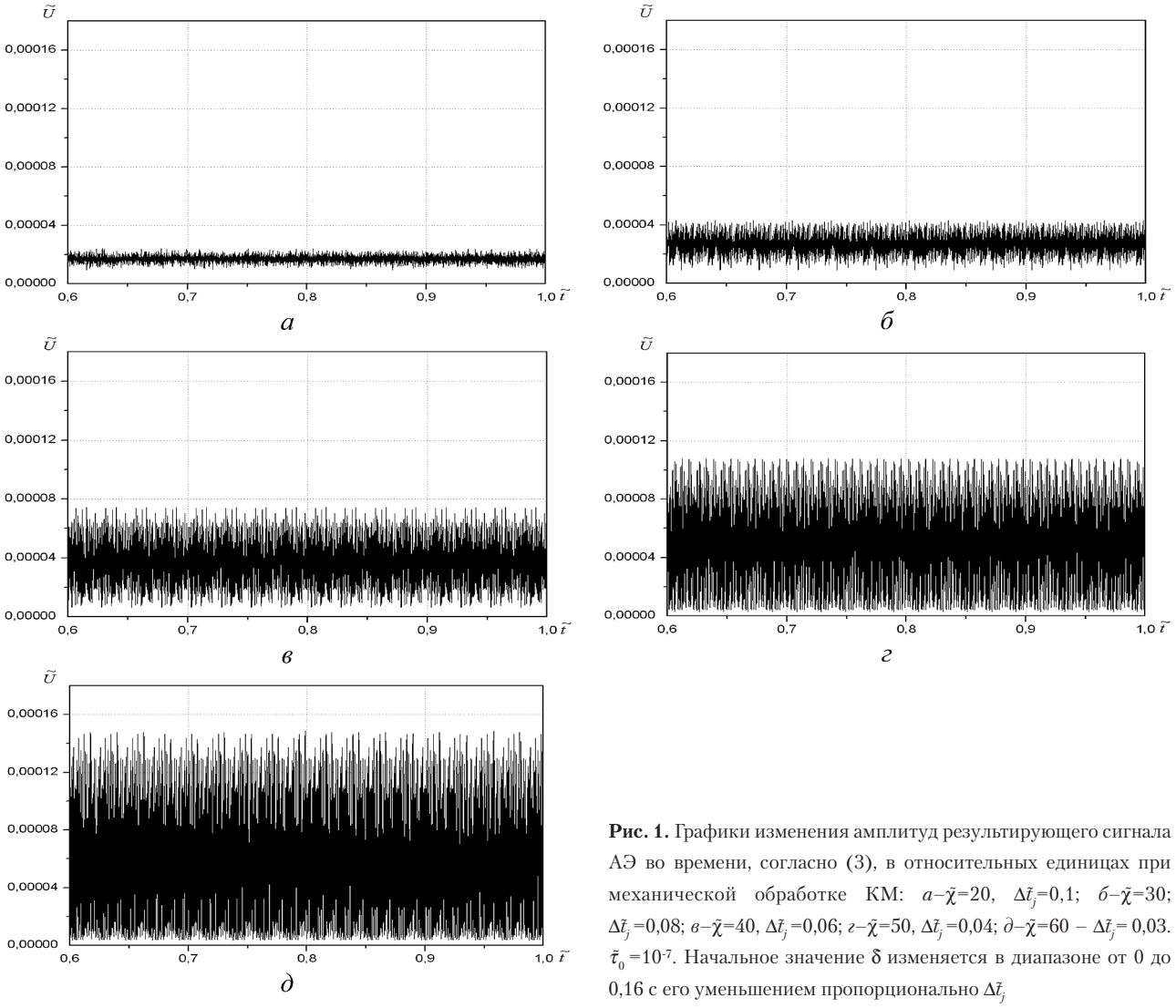
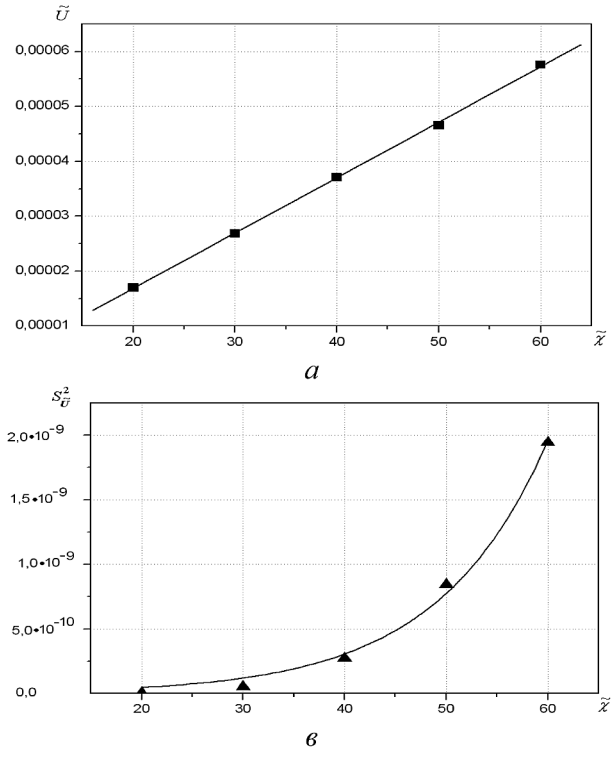


Рис. 1. Графики изменения амплитуд результирующего сигнала АЭ во времени, согласно (3), в относительных единицах при механической обработке КМ: *а*–$\tilde{\chi}$=20, $\Delta\tilde{t}_j$=0,1; *б*–$\tilde{\chi}$=30; $\Delta\tilde{t}_j$=0,08; *в*–$\tilde{\chi}$=40, $\Delta\tilde{t}_j$=0,06; *г*–$\tilde{\chi}$=50, $\Delta\tilde{t}_j$=0,04; *д*–$\tilde{\chi}$=60 – $\Delta\tilde{t}_j$= 0,03. $\tilde{\tau}_0$ =10^{-7}. Начальное значение δ изменяется в диапазоне от 0 до 0,16 с его уменьшением пропорционально $\Delta\tilde{t}_j$



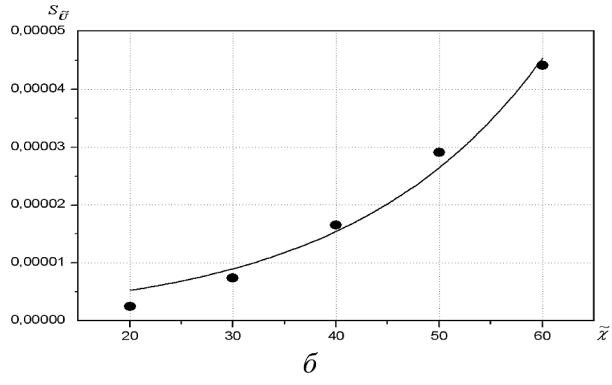


Рис. 2. Зависимости изменения среднего уровня амплитуды (*а*), его стандартного отклонения (*б*) и дисперсии (*в*) при возрастании параметра $\tilde{\chi}$

Значения коэффициентов *c* и *d* аппроксимирующего выражения (6) составляют: для зависимости изменения стандартного отклонения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ – $c = 1{,}8 \cdot 10^{-6}$, d=1,0552; для зависимости изменения дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ – $c = 7{,}537 \cdot 10^{-12}$, d=1,0971. При этом коэффициент детерминации R^2 и остаточная дисперсия SD^2 при описании зависимостей рис. 2, *б, в* выражением (6), соответственно, составляют: для зависимости изменения стандартного отклонения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ – $R^2 = 0{,}98288$, $SD^2 = 6{,}492 \cdot 10^{-12}$; для зависимости изменения дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ – $R^2 = 0{,}99535$, $SD^2 = 4{,}0624 \cdot 10^{-12}$.

На рис. 3 показаны результаты обработки процентного прироста среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии при возрастании $\tilde{\chi}$ по отношению к их начальным значениям при $\tilde{\chi}$=20.

Результаты проведенных исследований показывают, что наиболее чувствительным амплитудным параметром АЭ при возрастании $\tilde{\chi}$ является дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Как видно из рис. 3 с увеличением $\tilde{\chi}$ дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ имеет максимальный процентный прирост.

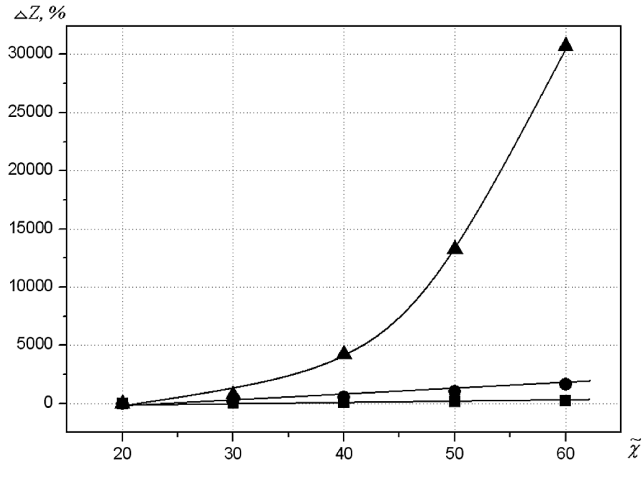


Рис. 3. Графики изменения процентного прироста среднего уровня амплитуды $\tilde{\tilde{U}}$ (■), его стандартного отклонения $s_{\tilde{\tilde{U}}}$ (●) и дисперсии $s^2_{\tilde{\tilde{U}}}$ (▲)в зависимости от при механической обработке КМ для термоактивационной модели акустического излучения

Заключение

Рассмотрены результаты моделирования результирующего сигнала АЭ при механической обработке КМ для термоактивационной модели формирования акустического излучения. Показано, что при механической обработке КМ

результирующий сигнал АЭ является непрерывным сигналом. Он характеризуется некоторым средним уровнем амплитуды и величиной его разброса. Результаты моделирования показали, что при возрастании скорости механической обработки КМ происходит возрастание среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. При этом средний уровень амплитуды возрастает по линейному закону. Стандартное отклонение и дисперсия среднего уровня амплитуды возрастают не линейным образом. Проведена статистическая обработка данных с определением процентного прироста среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и дисперсии результирующего сигнала АЭ для термоактивационной модели формирования акустического излучения при возрастании скорости механической обработки КМ. Показано, что наиболее чувствительным параметром к возрастанию скорости механической обработки КМ является дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. В тоже время интерес представляет исследование закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при изменении скорости механической обработки КМ.

Список литература

[1] Dongre P.R. Tool Condition Monitoring In Various Machining Operations Use of Acoustic Signature Analysis/ P.R. Dongre1, S.S. Chiddarwar, V. S. Deshpande // Int. J. on Mechanical Engineering and Robotics. – 2013. – V.1. – No1. – P. 34-38

[2] Huo P. On-Line Tool Condition Detection Based on Acoustic Signal/P. Huo, M. Zhang, L. Gao, R. Li// Int. J. of Applied Science and Technology Vol. 4, No. 4; July 2014. – P. 202-207

[3] Hassan Y. Acoustic Emission Signal Analysis and Artificial Intelligence Techniques in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis: A Review/ Y. Hassan, R. Abd Rahman, R. Ishak//J. Teknologi, Sciences and Engineering. – 2014. – V.69. – No2. – P. 121–126

[4] Sudha A. J. AE Waveform analysis of Delamination in GFRP Composite materials during drilling/A. J.Sudha, B. S. Sampathkumar and C.A. Vijaya// Int. J. of Engineering and Technology. – 2009. – V.1. – No.1. – P. 63-66.

[5] Kopa J. Acoustic emission in drilling carbon steel and nodular gray iron/J. Kopa , S. Sali //J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – V.19. – No1. – P. 91-95

[6] Nesluљan M. Analysis of chip formation during hard turning through acoustic emission /M. Nesluљan, M. Љipek, J. Mrazik// Materials Engineering. – 2012. – N019. – P. 1–11

[7] Mukhopadhyay C. K. Statistical Analysis of Acoustic Emission Signals Generated During Turning of a Metal Matrix Composite/ C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj, S. Venugopal// J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. – 2012. – Vl.34. – No.2. – P. 145-154

[8] Mcleay T. Failure Mode Analysis to Define Process Monitoring Systems/ T. Mcleay, M. S. Turner//Journal of Machine Engineering. – 2011. – V. 11. – No. 4. – P. 118-129

[9] Devendiran S. Condition monitoring on grinding wheel wear using wavelet analysis and decision tree C4.5 algorithm/S. Devendiran, K. Manivannan//International Journal of Engineering and Technology. – 2013. – V.5. – No5. – P. 4010-4024.

[10] Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при изменении скорости обработки материалов точением/С.Ф. Филоненко, Т.В.Нимченко, Т.Н.Косицкая // Технологические системы. – 2012. – № 2 (59) . – С. 80-88.

[11] Dhale A. Acoustic emission method for selection of optimum cutting parameters in turning using different fluids: A Review/A. Dhale, F. Khan//Int. J. of innovative research and development. – 2013. – V.2. – No7. – P. 185-188

[12] Lu P. Short-time Fourier transform method in AE signal Analysis for diamond coating failure Monitoring in Machining applications/P. Lu, Y.Kevin Chou, R.G. Tomthpson // Proceedings of the ASME2010 Manufacturing Science and Technology MSEC2010 (12-15 October 2010, Erie, Pennsylvania, USA). – P. 1-10.

[13] Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М: Машиностр.,1976. – 400 с.

[14] Araujo A. J. M. M. Investigation of the role of dislocation motion in the generation of acoustic emission from metal cutting /A. J. M. M. Araujo, S. J. Wilcox, R. L. Reuben// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Manufacture. – 2009. – V.223. – Part B. – P. 1507-1518.

[15] Filonenko S. Acoustic emission model with themoactivative destruction of composite material surface/ S. Filonenko// Proceedings of the National Aviation University. – 2015. – N1 (62). – P. 53–58

[16] Филоненко С.Ф. Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала/ С.Ф. Филоненко, В.М.Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – №2(46). – С. 17-25.

[17] Qin F. Delamination wear of nano-diamond coated cutting tools in composite machining/ F. Qin, J. Hu, Y.K. Chou,, R.G. Thompson //Wear. – 2009. – V.267. – P. 991–995

Filonenko S.F.
National Aviation University, Director of the Institute of Information-Diagnostic Systems. Ukraine, Kiev

ACOUSTIC EMISSION AT ALTERATION OF COMPOSITE MATERIALS MACHINING SPEED

The simulation of acoustic emission resultant signals at composite materials machining for thermoactivative model of acoustic radiation is conducted. Are determined of regularity change of resultant signals amplitude parameters in velocity function of composite materials machining. The description of the obtained legitimacies with their statistical characteristics is conducted. The sensitivity of acoustic emission amplitude parameters to an alteration of composite materials machining speed is rotined.

Keywords: acoustic emission; composite material; resulting signal amplitude; machining; regularity parameter.

References

[1] Dongre P.R. Tool Condition Monitoring In Various Machining Operations Use of Acoustic Signature Analysis/ P.R. Dongre1, S.S. Chiddarwar, V. S. Deshpande // Int. J. on Mechanical Engineering and Robotics. – 2013. – V.1. – No1. – P. 34-38

[2] Huo P. On-Line Tool Condition Detection Based on Acoustic Signal/P. Huo, M. Zhang, L. Gao, R. Li// Int. J. of Applied Science and Technology Vol. 4, No. 4; July 2014. – P. 202-207

[3] Hassan Y. Acoustic Emission Signal Analysis and Artificial Intelligence Techniques in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis: A Review/ Y. Hassan, R. Abd Rahman, R. Ishak//J. Teknologi, Sciences and Engineering. – 2014. – V.69. – No2. – P. 121–126

[4] Sudha A. J. AE Waveform analysis of Delamination in GFRP Composite materials during drilling/A. J. Sudha, B. S. Sampathkumar and C.A. Vijaya// Int. J. of Engineering and Technology. – 2009. – V.1. – No.1. – P. 63-66.

[5] Kopa J. Acoustic emission in drilling carbon steel and nodular gray iron/J. Kopa , S. Sali //J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – V.19. – No1. – P. 91-95

[6] Nesluљan M. Analysis of chip formation during hard turning through acoustic emission /M. Nesluљan, M. Љipek, J. Mrazik// Materials Engineering. – 2012. – N019. – P. 1–11

[7] Mukhopadhyay C. K. Statistical Analysis of Acoustic Emission Signals Generated During Turning of a Metal Matrix Composite/ C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj, S. Venugopal// J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. – 2012. – Vl.34. – No.2. – P. 145-154

[8] Mcleay T. Failure Mode Analysis to Define Process Monitoring Systems/ T. Mcleay, M. S. Turner//Journal of Machine Engineering. – 2011. – V. 11. – No. 4. – P. 118-129

[9] Devendiran S. Condition monitoring on grinding wheel wear using wavelet analysis and decision tree C4.5 algorithm/ S. Devendiran, K. Manivannan//International Journal of Engineering and Technology. – 2013. – V.5. – No5. – P. 4010-4024.

[10] Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия при изменении скорости обработки материалов точением/ С.Ф. Филоненко, Т.В.Нимченко, Т.Н.Косицкая // Технологические системы. – 2012. – № 2 (59) . – С. 80-88.

[11] Dhale A. Acoustic emission method for selection of optimum cutting parameters in turning using different fluids: A Review/A. Dhale, F. Khan//Int. J. of innovative research and development. – 2013. – V.2. – No7. – P. 185-188

[12] Lu P. Short-time Fourier transform method in AE signal Analysis for diamond coating failure Monitoring in Machining applications/P. Lu, Y.Kevin Chou, R.G. Tomthpson // Proceedings of the ASME2010 Manufacturing Science and Technology MSEC2010 (12-15 October 2010, Erie, Pennsylvania, USA). – P. 1-10.

[13] Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М: Машиностр.,1976. – 400 с.

[14] Araujo A. J. M. M. Investigation of the role of dislocation motion in the generation of acoustic emission from metal cutting /A. J. M. M. Araujo, S. J. Wilcox, R. L. Reuben// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Manufacture. – 2009. – V.223. – Part B. – P. 1507-1518.

[15] Filonenko S. Acoustic emission model with themoactivative destruction of composite material surface/ S. Filonenko// Proceedings of the National Aviation University. – 2015. – N1 (62). – P. 53–58

[16] Филоненко С.Ф. Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала/ С.Ф. Филоненко, В.М.Калита, Т.В. Нимченко // Технологические системы. – 2009. – №2(46). – С. 17-25.

[17] Qin F. Delamination wear of nano-diamond coated cutting tools in composite machining/ F. Qin, J. Hu, Y.K. Chou,, R.G. Thompson //Wear. – 2009. – V.267. – P. 991–995