

## РОЗДІЛ II. ТЕХНОЛОГІЇ

# МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 620.179:534.6

*Сергей Филоненко*

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗНОСЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ИНСТРУМЕНТА С НЕУПРАВЛЯЕМОЙ ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ

*Сергій Філоненко*

### ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ЗНОСІ КОМПОЗИЦІЙНОГО ІНСТРУМЕНТУ З НЕКЕРОВАНОЮ ГЛУБИНОЮ РІЗАННЯ

*Sergii Filonenko*

### ACOUSTIC EMISSION ENERGY PARAMETERS AT COMPOSITE TOOL WEAR WITH A NOT CONTROLLED CUTTING DEPTH

Проведено моделювання енергії акустичного випромінювання при зносі інструменту з композиційного матеріалу для випадку механічної обробки композиційного матеріалу з некерованою глибиною різання. Показано, що зростання зносу інструменту супроводжується зменшенням енергетичних параметрів акустичного випромінювання. Визначено статистичні енергетичні параметри сигналів акустичної емісії у випадку зростання зносу інструменту. Показано, що найбільш чутливим енергетичним параметром акустичного випромінювання є дисперсія середнього рівня енергії сигналів акустичної емісії.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, композиционный материал, энергия, механическая обработка, износ, статистические характеристики.

Рис.: 2. Табл.: 1. Библ.: 14.

Проведено моделювання енергії акустичного випромінювання у разі зносу інструменту з композиційного матеріалу для випадку механічної обробки композиційного матеріалу з некерованою глибиною різання. Показано, що зростання зносу інструменту супроводжується зменшенням енергетичних параметрів акустичного випромінювання. Визначено статистичні енергетичні параметри сигналів акустичної емісії у випадку зростання зносу інструменту. Показано, що найбільш чутливим енергетичним параметром акустичного випромінювання є дисперсія середнього рівня енергії сигналів акустичної емісії.

**Ключові слова:** акустична емісія, композиційний матеріал, енергія, механічна обробка, знос, статистичні характеристики.

Рис.: 2. Табл.: 1. Библ.: 14.

The simulation of acoustic radiation energy at tool wear from composite material for a case of composite material machining with a not controlled cutting depth is conducted. It is shown, that the increasing of tool wear is accompanied by decreasing of acoustic radiation energy parameters. The statistical energy parameters of acoustic emission signals are determined at increasing of tool wear. It is shown, that the most sensing acoustic radiation energy parameter is the acoustic emission signals energy average level dispersion.

**Key words:** acoustic emission, composite material, energy, machining, wear, statistical characteristics.

Fig.: 2. Tabl.: 1. Bibl.: 14.

**Постановка проблеми.** Контроль и мониторинг состояния режущего инструмента является одной из проблем обеспечения качества изделий, изготавливаемых методами механической обработки материалов. Особое значение эта проблема имеет при обработке композиционных материалов (КМ).

Для исследования технологических процессов механической обработки КМ используется метод акустической эмиссии (АЭ). Его применение основано на высокой чувствительности метода к процессам деформирования и разрушения материалов. Протекание этих процессов определяется условиями взаимодействия обрабатываемого и обрабатывающего материалов. Изменение условий их взаимодействия приводит к изменению параметров АЭ. Результаты анализа данных изменений направлены на разработку методов контроля и мониторинга состояния режущего инструмента. Однако на акустическое излучение влияют различные факторы. К ним относятся технологические факторы процесса механической обработки, а так же свойства КМ. Их наличие приво-

дит к значительному усложнению проблемы контроля и мониторинга состояния обрабатываемого инструмента.

Для оценки влияния различных факторов на АЭ значение имеют теоретические исследования. Такие исследования, прежде всего, направлены на интерпретацию закономерностей изменения акустического излучения. Они позволяют определить чувствительность параметров АЭ к изменению параметров технологического процесса и условий взаимодействия обрабатываемого и обрабатывающего КМ, определить особенности влияния процессов деформирования и разрушения пары взаимодействующих материалов на акустическое излучение. Результаты исследований являются основой в разработке методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для управления технологическими процессами механической обработки материалов, включая и КМ, проводятся комплексные исследования с поиском закономерностей изменения различных анализируемых параметров – сил резания, температуры, износа обрабатываемого инструмента, звука, вибраций, АЭ, шероховатости обработанной поверхности и других характеристик [1–5].

Одним из направлений исследований является анализ АЭ при износе и повреждении режущего инструмента [6–8]. Полученные результаты показывают, что износ или повреждение инструмента приводит к изменению параметров сигналов АЭ. Данные изменения могут использоваться для мониторинга состояния инструмента. В тоже время, параметры сигналов АЭ при возрастании износа инструмента имеют сложный и противоречивый характер изменения. В работе [8] отмечено, что с возрастанием времени механической обработки КМ происходит возрастание износа режущего инструмента и сопровождается возрастанием среднеквадратического значения (СКЗ) амплитуды сигнала АЭ. Выделение полосы частот для обработки АЭ позволяет использовать анализ СКЗ сигнала для мониторинга состояния инструмента. Необходимость использования анализа амплитуд сигналов АЭ в определенной полосе частот для оценки состояния инструмента показана и в работе [9]. При этом отмечено, что увеличение износа инструмента приводит к возрастанию амплитуд высокочастотной составляющей в спектре регистрируемого сигнала АЭ. Анализ коэффициента или индекса, характеризующего скорость изменения данных амплитуд, может использоваться для мониторинга состояния режущего инструмента и качества обработанной поверхности. Для контроля и мониторинга износа инструмента может использоваться и анализ изменения накопленного СКЗ амплитуд сигналов АЭ [10]. Согласно полученным данным, возрастание износа сопровождается резким увеличением наклона или скорости накопления СКЗ амплитуд сигналов АЭ.

В работе [11] показано, что при увеличении износа инструмента происходит возрастание СКЗ амплитуд сигналов АЭ. Такое изменение СКЗ амплитуды наблюдается для всех исследованных скоростей механической обработки. В тоже время, в работе [12] отмечено, что возрастание износа приводит к уменьшению  $b$  параметра амплитудного  $\beta$ -распределения. Уменьшение амплитуды основной несущей частоты в спектре сигнала АЭ при повреждении инструмента показано в работе [6]. Однако зависимости уменьшения среднего значения амплитуды сигнала АЭ и его стандартного отклонения при увеличении износа инструмента имеют сложный и не устойчивый характер. Такой же характер изменения имеют и статистические параметры амплитудных распределений сигналов АЭ (коэффициент асимметрии и коэффициент остроты распределения). При этом наблюдается возрастание СКЗ амплитуд сигналов АЭ. Уменьшение СКЗ амплитуды сигнала АЭ при износе и повреждении инструмента показано в работе [12]. Так же отмечено, что происходит уменьшение амплитуды низкочастотной и возрастание амплитуды высокочастотной составляющих в спектре сигнала АЭ.

Теоретические исследования АЭ при износе обрабатываемого инструмента и контролируемой глубине резания рассмотрены в работе [13; 14]. При исследованиях энергии результирующего сигнала АЭ была представлена в виде

$$E_p(t) = \sum_j E_{jM}(t - t_j) + \sum_i E_{iM}(t - t_i), \quad (1)$$

где  $t_j = j\Delta t_j \pm \delta_1$ ,  $t_i = i\Delta t_i \pm \delta_2$  – моменты времени появления сигналов АЭ  $E_{jM}$  и  $E_{iM}$  соответственно при разрушении площадок обрабатываемого КМ и износе (разрушении) обрабатываемого КМ;  $j$  – номер разрушаемой площадки обрабатываемого КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ  $E_{jM}$  ( $j = 0, \dots, n$ );  $\Delta t_j$  – интервал времени между началом формирования последующего импульсного сигнала АЭ  $E_{jM}$  по отношению к предыдущему;  $\delta_1$  – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ  $E_{jM}$ ;  $i$  – номер разрушаемой площадки обрабатываемого КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ  $E_{iM}$  ( $i = 0, \dots, m$ );  $\Delta t_i$  – интервал времени между началом формирования последующего импульсного сигнала АЭ  $E_{iM}$  по отношению к предыдущему;  $\delta_2$  – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ  $E_{iM}$ ;  $E_{jM} \sim U_{jM}^2$ ;  $U_{jM}$  – амплитуда  $j$ -го сигнала АЭ;  $E_{iM} \sim U_{iM}^2$ ;  $U_{iM}$  – амплитуда  $i$ -го сигнала АЭ.

При этом энергия импульсных сигналов АЭ  $E_{jM}$  и  $E_{iM}$  определялась по выражениям

$$E_{jM}(t) = \Delta t_k \sum_{\ell} U_{jM\ell}^2(\ell \cdot \Delta t_k), \quad (2)$$

$$E_{iM}(t) = \Delta t_k \sum_{\ell} U_{iM\ell}^2(\ell \cdot \Delta t_k), \quad (3)$$

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

Результаты исследований [13; 14] показали, что с возрастанием износа инструмента и контролируемой глубине резания происходит возрастание амплитудных и энергетических параметров АЭ. Однако возрастание энергетических параметров АЭ опережает возрастание ее амплитудных параметров. При этом наибольшую чувствительность к увеличению износа инструмента имеет дисперсия среднего уровня энергии сигналов АЭ.

В реальных технологических процессах увеличение износа обрабатываемого инструмента сопровождается уменьшением глубины резания, т. е. глубина резания является неуправляемой.

Для случая неуправляемой глубины резания, с учетом подходов, рассмотренных в работах [13; 14], возможно провести анализ влияния износа обрабатываемого инструмента на энергетические параметры сигналов АЭ для случая неуправляемой глубины резания.

**Нерешенные части проблемы.** Одним из параметров, необходимых для контроля и управления технологическими процессами механической обработки КМ, является износ режущего инструмента. Его увеличение приводит к изменению условий пары взаимодействующих материалов (обрабатываемый и обрабатывающий). Изменение условий взаимодействия будет влиять на формируемое акустическое излучение. Определение влияния износа инструмента на параметры АЭ является основой в разработке методов контроля и управления технологическими процессами. С данной точки зрения

значение имеют теоретические исследования. Моделирование АЭ с определением влияния износа инструмента на закономерности изменения ее параметров, с учетом неуправляемой глубины резания процесса механической обработки КМ, направлены на определение чувствительности и информативности параметров сигналов АЭ, что необходимо для разработки методов контроля и управления технологическими процессами. Такие исследования сокращают затраты на эксперименты и обеспечивают повышение достоверности их результатов.

Одним из наиболее емких параметров акустического излучения является энергия сигналов АЭ. Моделирование энергии акустического излучения при переходе от нормального к изношенному состоянию обрабатываемого инструмента из КМ, определение влияния износа на энергетические параметры сигналов АЭ при механической обработке КМ представляет не только научный, но и практический интерес.

**Цель статьи.** Целью работы является исследование влияния износа обрабатываемого инструмента из КМ на энергетические параметры акустического излучения при механической обработке КМ с неуправляемой глубиной резания для случая преобладающего механического разрушения его поверхностного.

**Изложение основного материала.** Моделирование энергии акустического излучения при износе инструмента, возникающего в процессе механической обработки КМ с неуправляемой глубиной резания, будем рассматривать для следующих условий. Обработка КМ до момента времени  $t_0$  происходит без износа инструмента из КМ. При этом энергия акустического излучения формируется за счет преобладающего механического разрушения площадок обрабатываемого КМ. С момента времени  $t_0$  возникает износ инструмента или разрушение его элементарных площадок, согласно модели FBM (fiber bundle model). При таких условиях энергия акустического излучения формируется за счет появления сигналов АЭ при протекании двух процессов – разрушения обрабатываемого и обрабатываемого КМ. В общем случае, как и в работе [14], энергия результирующего акустического излучения описывается выражением (1), а энергия импульсных сигналов АЭ  $E_{jM}$  и  $E_{iM}$ , соответственно, выражениям (2) и (3). Импульсные сигналы АЭ  $U_{jM}$  и  $U_{iM}$  в выражениях (2) и (3) формируются при разрушении элементарных площадок обрабатываемого и обрабатываемого КМ

$$U_j(t) = u_0 \alpha v_0 e^{r\alpha t} e^{-\frac{v_0}{r\alpha}(e^{r\alpha t} - 1)}, \quad (4)$$

$$U_i(t) = U_0 V_0 \sigma e^{R\sigma} e^{-\frac{t}{t_0} - V_0 \int_0^t e^{R\sigma} dt}, \quad (5)$$

где  $u_0$  – максимальное упругое смещение при мгновенном разрушении заданной площади обрабатываемого КМ, состоящей из  $N_0$  одиночных элементов;  $\alpha$  – скорость нагружения;  $v_0, r$  – постоянные, определяющие свойства обрабатываемого КМ;  $U_0$  – максимальное упругое смещение при мгновенном разрушении заданной площади обрабатываемого КМ, состоящей из  $N_1$  одиночных элементов;  $\sigma = \alpha t(1 - \alpha t)(1 - g\sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0(1 - \alpha t_0)(1 - g\sqrt{\alpha t_0})$ ;  $V_0, R$  – постоянные, зависящие от характеристик обрабатываемого КМ;  $t, t_0$  – текущее время и время начала разрушения элементов КМ;  $g$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров элементов КМ.

Основным условием моделирования энергии акустического излучения является отсутствие контроля глубины резания КМ, т. е. при заданных технологических парамет-

рах (скорость механической обработки, глубина резания, физико-механические характеристики обрабатываемого и обрабатывающего КМ) увеличение износа инструмента приводит к пропорциональному уменьшению глубины резания обрабатываемого КМ. Площадки разрушения обрабатываемого и обрабатывающего КМ определяются, соответственно, количеством разрушаемых одиночных элементов  $N_0$  и  $N_1$ , т. е. пропорциональны величинам  $u_0$  и  $U_0$  в выражениях (4) и (5). При расчетах энергии акустического излучения, согласно (1), (2) и (3), примем следующие значения параметров  $u_0$  и  $U_0$  в относительных единицах. При отсутствии износа инструмента:  $\tilde{u}_0=1$ ,  $\tilde{U}_0=0$ . При износе инструмента, который возникает в момент времени  $t_0$ , значения параметров  $u_0$  и  $U_0$  в относительных единицах примем равными:  $\tilde{u}_0=0,9$ ,  $\tilde{U}_0=0,1$ ;  $\tilde{u}_0=0,8$ ,  $\tilde{U}_0=0,2$ ;  $\tilde{u}_0=0,7$ ,  $\tilde{U}_0=0,3$ ;  $\tilde{u}_0=0,6$ ,  $\tilde{U}_0=0,4$ .

При моделировании параметры, которые входят в выражения (1),... (5), приведем к безразмерным величинам. Будем считать, что дисперсность свойств обрабатывающего КМ меньше дисперсности свойств обрабатываемого КМ, т. е.  $r < R$ . Значения параметров  $\alpha$ ,  $\nu_0$ ,  $r$ ,  $V_0$  и  $R$  в относительных единицах примем равными:  $\tilde{\alpha} = 10$ ;  $\tilde{\nu}_0 = 1000000$ ;  $\tilde{r} = 10000$ ;  $\tilde{V}_0=1000000$ ;  $\tilde{R}=14000$ . Время появления износа инструмента  $t_0$ , в относительных единицах, примем равным  $\tilde{t}_0 = 0,0001$ , а значение коэффициента  $g$  –  $\tilde{g}=0,1$ . Для заданных значений  $\tilde{\alpha}$ ,  $\tilde{t}_0$  и  $\tilde{g}$  величина параметра  $\tilde{\sigma}_0$  будет равна:  $\tilde{\sigma}_0=0,0009958408846174917$ . Исходя из длительности формируемых сигналов АЭ  $U_{jM}$  и  $U_{iM}$  величины  $\Delta t_j$  и  $\Delta t_i$ , примем равными  $\Delta \tilde{t}_j=0,0000015$ ;  $\Delta \tilde{t}_i=0,0000015$ . Начальные значения параметров  $\tilde{\delta}_1$  и  $\tilde{\delta}_2$  будем изменять в диапазоне величин, соответственно, от 0 до 0,0000049 и от 0 до 0,0000049 произвольным образом. При расчетах энергии сигналов АЭ, согласно (2) и (3), величину  $\Delta t_k$  примем равной  $\Delta \tilde{t}_k=0,0000002$ . При этом будем проводить расчеты 5000 значений энергий сигнала АЭ для каждой пары значений параметров  $u_0$  и  $U_0$ .

Результаты моделирования в виде зависимостей изменения энергии сигналов АЭ во времени в относительных величинах показаны на рис. 1.

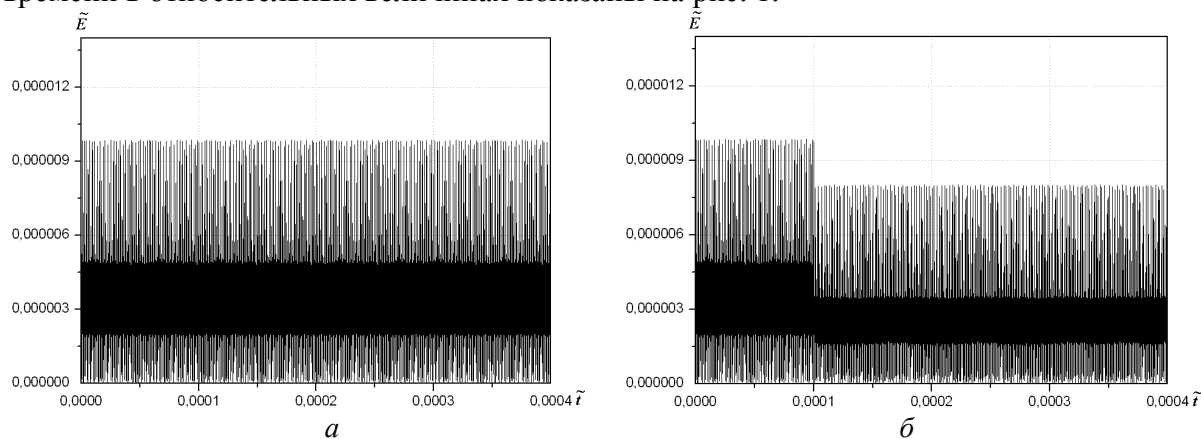


Рис. 1. Изменение энергии АЭ во времени в относительных единицах при механической обработке КМ. Интервалы времени: 0...0,0001 – отсутствие износа инструмента; 0,0001...0,0004 – наличие износа инструмента. Значения параметров  $\tilde{u}_0$  и  $\tilde{U}_0$ : а -  $\tilde{u}_0=1$ ,  $\tilde{U}_0=0$ ; для рисунков б–д – на интервале 0...0,0001:  $\tilde{u}_0=1$ ,  $\tilde{U}_0=0$ ; на интервале 0,0001...0,0004: б -  $\tilde{u}_0=0,9$ ,  $\tilde{U}_0=0,1$ ; в -  $\tilde{u}_0=0,8$ ,  $\tilde{U}_0=0,2$ ; г -  $\tilde{u}_0=0,7$ ,  $\tilde{U}_0=0,3$ ; д -  $\tilde{u}_0=0,6$ ,  $\tilde{U}_0=0,4$

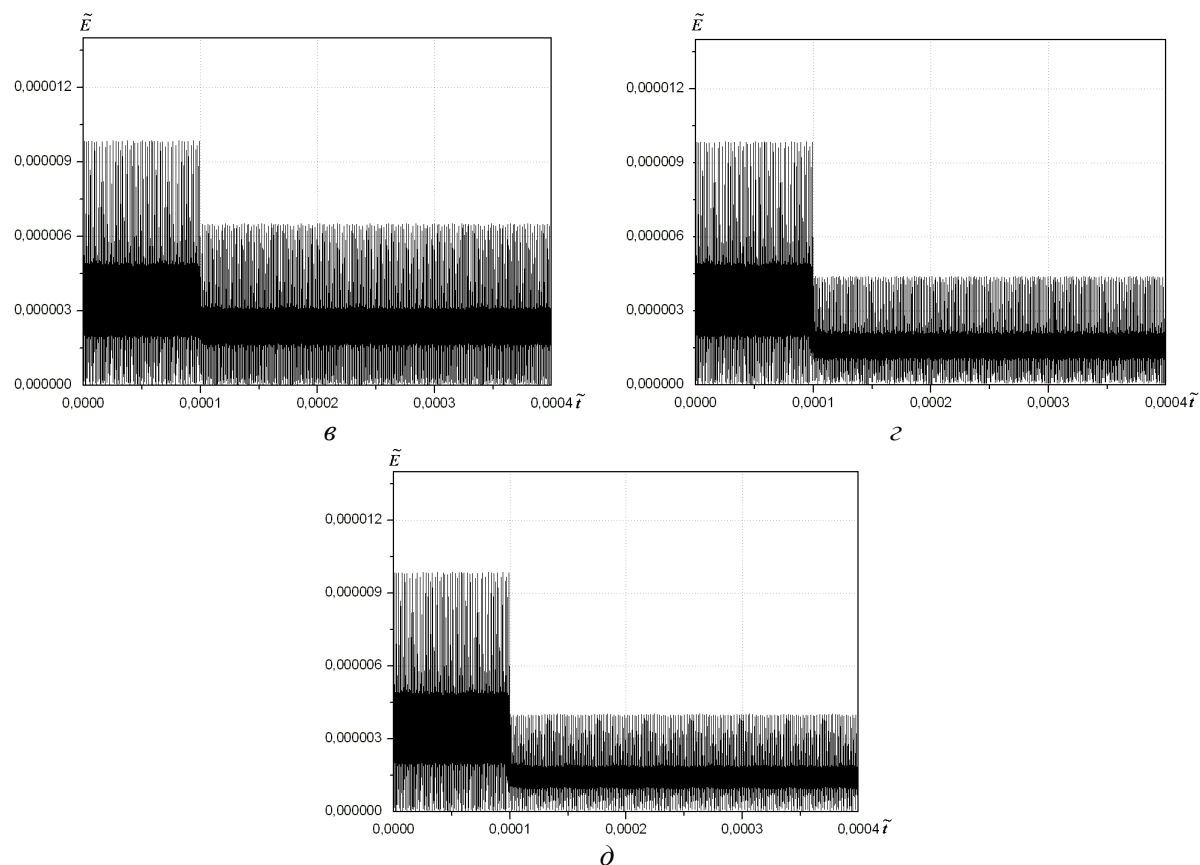


Рис. 1. Окончание (см. также с. 28)

Из рис. 1 видно, что возрастание износа инструмента из КМ для случая неуправляемой глубины резания не приводит к изменению характера акустического излучения. При этом наблюдается уменьшение среднего уровня энергии сигналов АЭ и величины его разброса.

Энергетические параметры сигналов АЭ при возрастании износа инструмента приведены в табл., где приняты следующие обозначения:  $\tilde{E}$  – средний уровень энергии АЭ;  $s_{\tilde{E}}$  – стандартное отклонение среднего уровня энергии АЭ;  $s_{\tilde{E}}^2$  – дисперсия среднего уровня энергии АЭ;  $\tilde{U}_0$  – параметр, характеризующий увеличение износа обрабатываемого инструмента.

Таблица

Энергетические параметры акустического излучения при возрастании износа обрабатываемого инструмента и неуправляемой глубине резания

$\tilde{y}_0$	$\tilde{U}_0$	$\tilde{E}$	$s_{\tilde{E}}$	$s_{\tilde{E}}^2$
1,0	0	$3,19429 \cdot 10^{-6}$	$2,6312 \cdot 10^{-6}$	$6,92323 \cdot 10^{-12}$
0,9	0,1	$2,42363 \cdot 10^{-6}$	$2,13738 \cdot 10^{-6}$	$4,5684E \cdot 10^{-12}$
0,8	0,2	$2,09179 \cdot 10^{-6}$	$1,814 \cdot 10^{-6}$	$3,2906 \cdot 10^{-12}$
0,7	0,3	$1,72395 \cdot 10^{-6}$	$1,37911 \cdot 10^{-6}$	$1,90194 \cdot 10^{-12}$
0,6	0,4	$1,55429 \cdot 10^{-6}$	$1,07206 \cdot 10^{-6}$	$1,14931 \cdot 10^{-12}$

Из табл. видно, что при возрастании износа обрабатываемого инструмента и неуправляемой глубине резания происходит падение всех энергетических параметров результирующих сигналов АЭ.

Для оценки чувствительности энергетических параметров сигналов АЭ проведем обработку данных (табл.) с определением процентного их уменьшения при увеличении износа инструмента, по отношению к их начальным значениям при отсутствии износа инструмента. Результаты расчетов показаны на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $\Delta \tilde{Z} \%$  – процентное уменьшение среднего уровня энергии сигнала АЭ, его стандартного отклонения или дисперсии;  $\tilde{y}_0$  – параметр, характеризующий глубину механической обработки материала;  $\tilde{U}_0$  – параметр, характеризующий износ обрабатываемого инструмента.

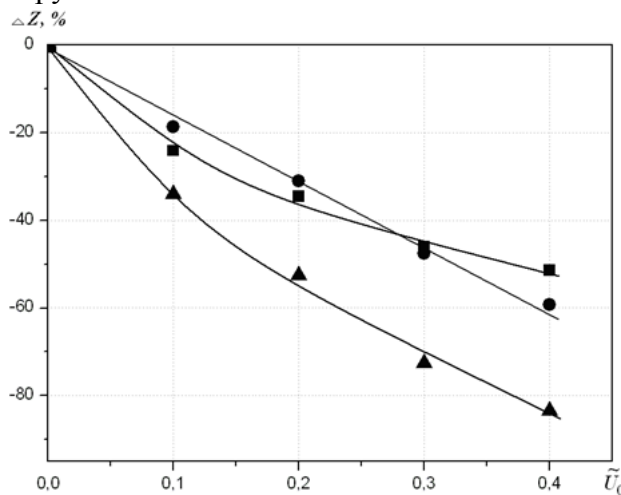


Рис. 2. Изменение процентного уменьшения среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  сигналов АЭ (■), его стандартного отклонения  $s_{\tilde{E}}^2$  (●) и дисперсии  $s_{\tilde{E}}^2$  (▲) при механической обработке КМ в зависимости от износа обрабатываемого инструмента с неуправляемой глубиной резания

Полученные результаты показывают, что при механической обработке КМ для преобладающего механического разрушения его поверхности и неуправляемой глубины резания увеличение износа инструмента должно приводить к уменьшению статистических энергетических параметров сигналов АЭ (табл., рис. 1, рис. 2). При этом процентное уменьшение дисперсии среднего уровня энергии сигналов АЭ опережает процентное уменьшение среднего уровня энергии и его стандартного отклонения. Действительно, при увеличении износа инструмента до  $\tilde{U}_0=0,3$  процентное уменьшение среднего уровня энергии сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии, по отношению к их значениям при  $\tilde{U}_0=0$  составляют соответственно:  $-46,03$ ;  $-47,59$  и  $-72,53$  %. При увеличении износа до  $\tilde{U}_0=0,4$  процентное уменьшение энергетических параметров сигналов АЭ уже составляют  $-51,34$ ;  $-59,26$  и  $-83,40$  % соответственно.

Уменьшение энергетических параметров сигнала АЭ при возрастании износа обрабатываемого инструмента, очевидно, обусловлено тем, что падение энергетических параметров сигналов АЭ при уменьшении площади разрушения обрабатываемого КМ опережает возрастание энергетических параметров сигналов АЭ при увеличении износа обрабатываемого КМ.

**Выводы.** Проведено моделирование излучения энергии сигналов АЭ, формируемых в процессе механической обработки КМ, при условии отсутствия и износе обрабатываемого инструмента для случая неуправляемой глубины резания. Показано, что увеличение износа инструмента не влияет на характер акустического излучения, однако приводит к уменьшению среднего уровня энергии сигналов АЭ и величины его разброса. Определены значения статистических энергетических параметров сигналов АЭ при

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

отсутствии и износе инструмента из КМ. Показано, что возрастание износа инструмента приводит к уменьшению всех энергетических параметров сигналов АЭ. При этом с возрастанием износа инструмента скорость изменения среднего уровня энергии сигналов АЭ уменьшается, а скорость изменения его стандартного отклонения и дисперсии увеличивается. Проведены расчеты процентного уменьшения энергетических параметров сигналов АЭ при возрастании износа инструмента, по отношению к их значениям при отсутствии износа. Показано, что наибольшую чувствительность к износу имеет дисперсия среднего уровня энергии сигналов АЭ. Процентное уменьшение дисперсии среднего уровня энергии сигналов АЭ опережает процентное уменьшение среднего уровня энергии и его стандартного отклонения

Полученные результаты могут использоваться при разработке методов контроля, мониторинга и управления технологическими процессами механической обработки КМ. В первую очередь, это касается методов контроля состояния режущего инструмента в роботизированных технологических процессах, а так же управления технологическими процессами с использованием нейронных сетей. Дальнейшие исследования АЭ необходимо провести с определением чувствительности амплитудно-энергетических параметров АЭ к износу режущего инструмента при условии неконтролируемой глубины резания КМ.

**Список использованных источников**

1. *Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review* / M. Chandrasekaran, M. Muralidhar, C. Murali Krishna, U. S. Dixit // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 46. – Pp. 445–464.
2. *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. – Vol. 98. – Pp. 59–68.
3. *Siddhpura A. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process* / A. Siddhpura, R. Paurobally // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 65, No. 1. – Pp. 371–393.
4. *Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review* / S. Dutta, S. K. Pal, S. Mukhopadhyay, R. Sen // *Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2013. – Vol. 6. – Pp. 212–232.
5. *Teti R. Advanced IT Methods of Signal Processing and Decision Making for Zero Defect Manufacturing in Machining* / R. Teti // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 28. – Pp. 3–15.
6. *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 // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*. – 2012. – Vol. 3, No. 3. – Pp. 547–555.
7. *Fractal analysis of cutting force and acoustic emission signals during CFRP machining* / X. Rimpaulta, J. F. Chatelainb, J. E. Klemberg-Sapiehac, M. Balazinski // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – Pp. 143–146.
8. *Tool condition monitoring using multiple sensors approach in the microendmilling of aluminium alloy (AA1100)* / M. Prakash, M. Kanthababu, S. Gowri, R. Balasubramaniam, J. R. Jegaraj // *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) (12–14 December, 2014, IIT Guwahati, Assam, India)*. – Pp. 394-1–394-6.
9. *Development of Condition Monitoring System for Micro Milling of PZT Deposited Si Wafer* / L. F. Chang, M. C. Lu, K. H. Chen, C. C. Wu // *9th international workshop on microfactories (IWMF2014, October 5-8, 2014, Honolulu, USA)*. – 2014. – Pp. 139–145.
10. *Giriraj B. Prediction of progressive tool wear using acoustic emission technique and artificial neural network* / B. Giriraj // *Journal of Civil Engineering Science*. – 2012. – Vol. 1, No. 1-2. – Pp. 43–46.
11. *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. and Eng.* – 2012. – Vol. 34, No. 2. – Pp. 145–154.
12. *Delamination wear of nano-diamond coated cutting tools in composite machining* / F. Qin, J. Hu, Y. K. Chou, R.G. Thompson // *Wear*. – 2009. – Vol. 267. – Pp. 991–995.



13. Филоненко С. Ф. Влияние износа режущего инструмента при контролируемой глубине резания на акустическую эмиссию / С. Ф. Филоненко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/9 (78). – С. 47–50.

14. Filonenko S. F. Acoustic energy at controlled cutting depth of composite material / S. F. Filonenko // Electronics and Control Systems. – 2016. – No. 3 (49). – Pp. 93–99.

### References

1. Chandrasekaran, M., Muralidhar, M., Murali Krishna, C., Dixit, U.S. (2010). Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, pp. 445–464.

2. Karimi, N.Z., Heidary, H., Minak, G., Ahmadi, M. (2013). Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates. *Composite Structures*, vol. 98, pp. 59–68.

3. Siddhpura, A., Paurobally, R. (2013). A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, issue 1, pp. 371–393.

4. Dutta, S., Pal, S.K., Mukhopadhyay, S., Sen, R. (2013). Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 6, pp. 212–232.

5. Teti, R. (2015). Advanced IT Methods of Signal Processing and Decision Making for Zero Defect Manufacturing in Machining. *Procedia CIRP*, vol. 28, pp. 3–15.

6. Fadare, D.A., Sales, W.F., Bonney, J., Ezugwu, E.O. (2012). Influence of cutting parameters and tool wear on acoustic emission signal in high-speed turning of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, issue 3, pp. 547–555.

7. Rimpaulta, X., Chatelainb, J.F., Klemberg-Sapiehac, J.E., Balazinski, M. (2016). Fractal analysis of cutting force and acoustic emission signals during CFRP machining. *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 143–146.

8. Prakash, M., Kanthababu, M., Gowri, S., Balasubramaniam, R., Jegaraj, J.R. (2014). Tool condition monitoring using multiple sensors approach in the microendmilling of aluminium alloy (AA1100). *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) (12 -14 December, 2014, IIT Guwahati, Assam, India)*, pp. 394-1–394-6.

9. Chang, L.F., Lu, M.C., Chen, K.H., Wu, C.C. (2014). Development of Condition Monitoring System for Micro Milling of PZT Deposited Si Wafer. *9th international workshop on microfactories (IWMF2014, October 5-8, 2014, Honolulu, USA)*, pp. 139–145.

10. Giriraj, B. (2012). Prediction of progressive tool wear using acoustic emission technique and artificial neural network. *Journal of Civil Engineering Science*, vol. 1, issue 1-2, pp. 43–46.

11. Mukhopadhyay, C. K., Jayakumar, T., Raj, B., Venugopal, S. (2012). Statistical Analysis of Acoustic Emission Signals Generated During Turning of a Metal Matrix Composite. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.*, vol. 34, issue 2, pp. 145–154.

12. Qin, F., Hu, J., Chou, Y.K., Thompson, R.G. (2009). Delamination wear of nano-diamond coated cutting tools in composite machining. *Wear*, vol. 267, pp. 991–995.

13. Filonenko, S. F. (2015). Vliyanie iznosa rezhushchego instrumenta pri kontroliruemoy glubine rezaniya na akusticheskuyu ehmissiyu [Influencing of cutting tool wearing at a controlled cutting depth on acoustic Emission]. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, issue 6/9 (78), pp. 47–50 (in Russian).

14. Filonenko, S.F. (2016). Acoustic energy at controlled cutting depth of composite material. *Electronics and Control Systems*, issue 3(49), pp. 93–99.

**Филоненко Сергей Федорович** – доктор технических наук, профессор, директор Института информационно-диагностических систем, Национальный авиационный университет (просп. Комарова, 1, г. Киев, 03058, Украина).

**Філоненко Сергій Федорович** – доктор технічних наук, професор, директор Інституту інформаційно-діагностичних систем, Національний авіаційний університет (просп. Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна).

**Filonenko Sergii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director the Institute of informational-diagnostic systems National Aviation University (1 Komarova Str., 03058 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** fils0101@gmail.com

**Scopus Author ID:** 6602742195