

**С.Ф. Филоненко**, д-р техн. наук

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

**С.Ф. Філоненко**, д-р техн. наук

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

### МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ У РАЗІ ЗМІНИ ГЛИБИНИ РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

**Sergey Filonenko**, Doctor of Technical Sciences

National Aviation University, Kiev, Ukraine

### SIMULATION OF ACOUSTIC EMISSION LEGITIMACIES DURING THE CHANGE OF COMPOSITE MATERIAL CUTTING DEPTH

*Получены закономерности изменения энергетических параметров акустического излучения в зависимости от глубины резания при механической обработке композиционного материала для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя. Проведено описание закономерностей изменения среднего уровня энергии сигналов акустической эмиссии, его стандартного отклонения и дисперсии от глубины резания. Показано, что наиболее чувствительным параметром акустической эмиссии к глубине резания композиционного материала является дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала акустической эмиссии.*

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

*Отримано закономірності зміни енергетичних параметрів акустичного випромінювання залежно від глибини різання під час механічного оброблення композиційного матеріалу для термоактиваційної моделі руйнування поверхневого прошарку. Проведено опис закономірностей зміни середнього рівня енергії сигналів акустичної емісії, його стандартного відхилення і дисперсії від глибини різання. Показано, що найбільш чутливим параметром акустичної емісії до глибини різання композиційного матеріалу є дисперсія середнього рівня енергії результирующего сигналу акустичної емісії.*

**Ключові слова:** акустична емісія, композиційний матеріал, результирующий сигнал, амплітуда, енергія, механічне оброблення, статистичні характеристики.

*The regularity of acoustic radiation energy parameters change depending on cutting depth at machine work of composite material for thermoactivative model of surface layer destruction are obtained. The description of legitimacy change of acoustic emission signals energy average level, its standard deviation and dispersion from a cutting depth is conducted. It is noted, that the most sensing parameters of acoustic emission to a cutting depth of composite material is the dispersion of acoustic emission energy average level resultant signal.*

**Key words:** acoustic emission, composite material, resultant signal, amplitude, energy, machining, statistical characteristics.

**Постановка проблемы.** Акустическая эмиссия (АЭ) широко используется при исследовании процессов механической обработки материалов с кристаллической структурой и композиционных материалов (КМ). Исследования направлены на оптимизацию параметров технологических процессов механической обработки для получения изделий заданного качества, а так же на разработку методов их контроля, диагностики и мониторинга. При этом разрабатываются и методы контроля с использованием нейронных сетей.

Как показывают результаты исследований, по сравнению с традиционными методами (измерение сил резания, температуры, вибраций и других параметров), метод АЭ обладает высокой чувствительностью к внутренним процессам, которые происходят в структуре материалов при их деформировании и разрушении. Однако большое количество факторов, определяющих технологический процесс механической обработки материалов, усложняет интерпретацию регистрируемой информации и анализ их влияния на параметры сигналов АЭ. Это приводит к неоднозначности в закономерностях изменения параметров АЭ и ограниченному практическому использованию метода АЭ при разработке методов контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов механической обработки материалов с традиционной структурой и КМ. Значительное

количество факторов влияет и на достоверность разработанных узкоспециализированных АЭ методов контроля и диагностики, а также приводит к усложнению экспериментальных исследований и возрастанию временных затрат на их выполнение.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как показывают обзорные публикации, для исследования процессов механической обработки материалов используется метод АЭ [1–3]. Проводимые исследования направлены на оптимизацию технологических параметров механической обработки, а так же разработку методов их контроля и мониторинга, включая контроль и мониторинг состояния режущего инструмента. В основе проводимых исследований лежат представления об источниках акустического излучения [1] при деформировании и разрушении материалов. К таким источникам относят: пластическую деформацию и разрушение обрабатываемого материала; трение стружки по передней грани; трение инструмента по обрабатываемой поверхности; разрушение стружки; соударение стружки с обрабатываемой поверхностью; фазовые превращения; разрушение обрабатывающего инструмента и другие. В тоже время в экспериментальных исследованиях регистрируются непрерывные сигналы АЭ с сильно изрезанной формой и выбросами амплитуды [4–6]. Непрерывный процесс акустического излучения связывают с деформированием и разрушением поверхностного слоя обрабатываемого материала при работе режущего инструмента в нормальном или изношенном состоянии, а выбросы амплитуды регистрируемых сигналов АЭ – с разрушением (повреждением) режущего инструмента.

При исследовании процессов механической обработки КМ проводят анализ влияния технологических параметров на акустическое излучение. Одним из таких параметров является глубина резания. Однозначное влияние глубины резания на параметры экспериментальных сигналов АЭ показано в ряде работ при выполнении различных видов механической обработки КМ [7–10]. При этом, как правило, проводят анализ среднего или среднеквадратического значения (СКЗ) амплитуд, а также статистических амплитудных параметров регистрируемых сигналов АЭ. Результаты проведенных исследований показывают различный характер закономерностей изменения амплитудных параметров АЭ при возрастании глубины резания. Полученные закономерности являются противоречивыми и неустойчивыми. В работах [7; 8] показано, что изменение СКЗ и среднего значения амплитуд регистрируемых сигналов АЭ, его стандартного отклонения, коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения амплитуд при возрастании глубины резания имеют сложный характер изменения. В тоже время в работах [9; 10] получено, что возрастание СКЗ амплитуд сигналов АЭ происходит линейным образом. Аналогичные результаты получены и в ряде других работ [11; 12].

В работах [13; 14] рассмотрены результаты теоретических исследований амплитудных характеристик АЭ при изменении глубины резания для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя КМ. По результатам проведенных исследований и обработки данных моделирования получены зависимости изменения среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии при возрастании глубины резания КМ. Показано, что закономерности изменения среднего уровня амплитуды результирующих сигналов АЭ и его стандартного отклонения хорошо описываются линейными функциями. В тоже время дисперсия среднего уровня амплитуды возрастает нелинейным образом и хорошо описывается степенной функцией.

Интерес представляет получение и описание закономерностей изменения энергетических параметров результирующего сигнала АЭ и определение их чувствительности к глубине резания КМ.

**Нерешенные части проблемы.** Для оценки влияния различных факторов на параметры АЭ и повышения достоверности методов контроля процессов механической об-

работки КМ безусловное значение имеют теоретические исследования. Такие исследования должны базироваться на моделях формирования акустического излучения при механической обработке КМ с учетом влияния технологических параметров и физико-механических характеристик обрабатываемого и обрабатывающего материалов. Моделирование закономерностей акустического излучения и закономерностей изменения его параметров, с учетом действия влияющих факторов, является основой выбора оптимальных параметров механической обработки КМ и разработки методов контроля и мониторинга технологических процессов изготовления изделий.

Одним из параметров процесса механической обработки КМ является глубина резания. Определение закономерностей изменения энергетических параметров акустического излучения при изменении глубины резания с их математическим описанием для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя КМ, безусловно, представляет научный и практический интерес.

**Цель статьи.** Целью работы является исследование и описание закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при возрастании глубины резания КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя.

**Изложение основного материала.** Проведем моделирование энергии акустического излучения при изменении глубины резания КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя. Моделирование проведем при условии, что в процессе механической обработки происходит последовательное деформирование и разрушение элементарных площадок поверхностного слоя КМ. При этом деформирование элементарных площадок, которые имеют одинаковую и постоянную площадь, происходит в области упругости до разрушения, а разрушение каждой площадки сопровождается формированием одиночного импульса АЭ. Последовательное разрушение элементарных площадок во времени приводит к последовательному излучению импульсных сигналов АЭ, которые в совокупности формируют результирующий сигнал АЭ. Моделирование энергии акустического излучения проведем по выражению вида

$$E_p(t) = \sum_j E_{jR}(t - t_j), \quad (1)$$

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 ( $j=0, 1, \dots, n$ );  $\delta$  – случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ;  $E_{jR} = U_{jR}^2$ ;  $U_{jR}$  – амплитуды  $j$ -го сигнала АЭ.

Модель импульсного сигнала АЭ  $U_R$  для термоактивационного разрушения поверхностного слоя КМ рассмотрена в работе [15].

По результатам проведенного моделирования проведена статистическая обработка данных с определением среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ, стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ и дисперсии среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ. Результаты расчетов приведены в табл., где 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.

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	$4,1238 \cdot 10^{-13}$	$3,33727 \cdot 10^{-13}$	$1,11374 \cdot 10^{-25}$

Согласно полученным данным (табл.), на рис. 1 показаны зависимости изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии в зависимости от глубины резания КМ.

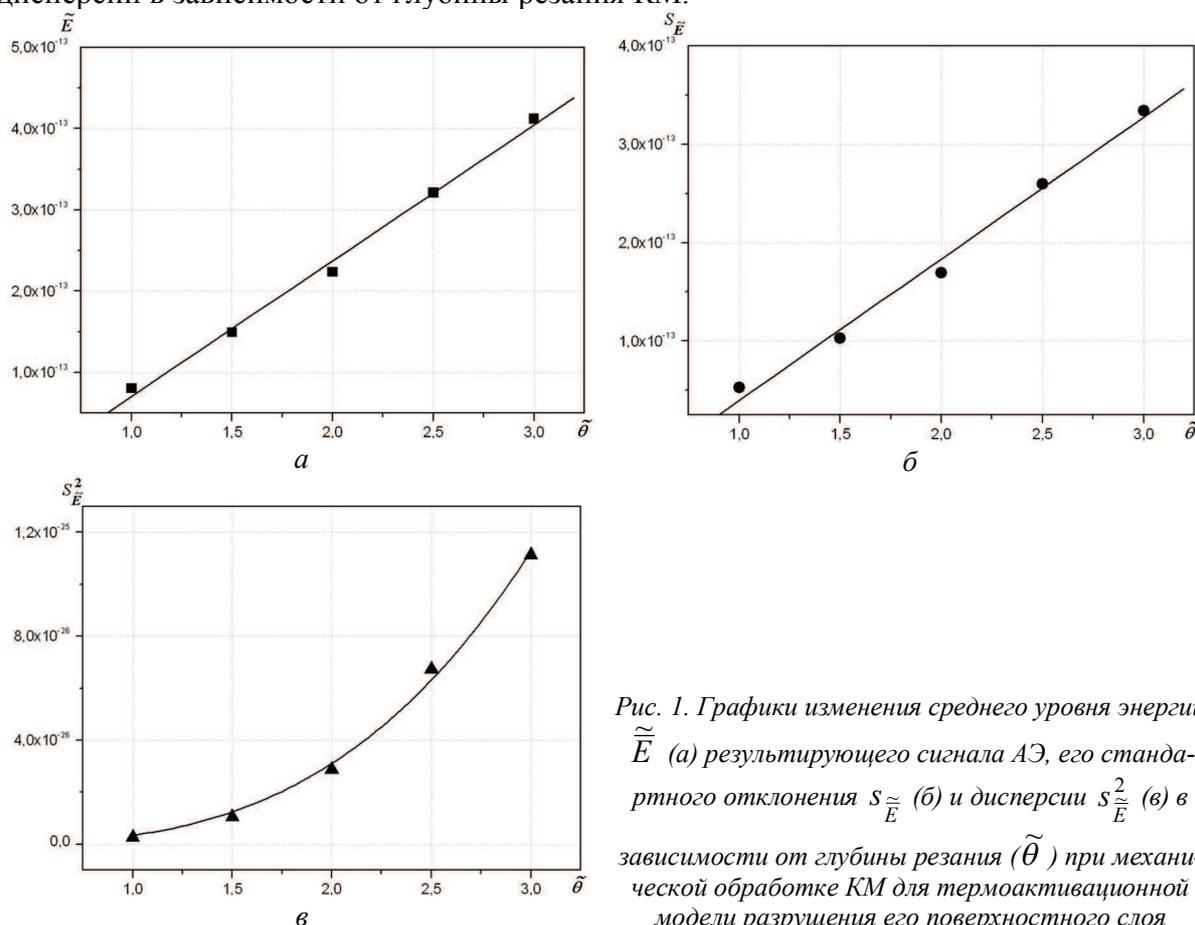


Рис. 1. Графики изменения среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  (а) результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения  $S_{\tilde{E}}$  (б) и дисперсии  $S_{\tilde{E}}^2$  (в) в зависимости от глубины резания ( $\tilde{\theta}$ ) при механической обработке КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя

Из рис. 1 видно, что при увеличении площади разрушения поверхностного слоя КМ зависимости изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и его стандартного отклонения имеют линейный характер возрастания, а дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ возрастает нелинейно.

Статистическая обработка данных с аппроксимацией полученных зависимостей показала, что изменение среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и его стандартного отклонения (рис. 1, а, б) хорошо описываются функцией вида

$$\tilde{Z} = a + b\tilde{\theta}, \quad (2)$$

где  $\tilde{Z}$  – энергетический параметр результирующего сигнала АЭ – средний уровень энергии или его стандартное отклонение;  $a$  и  $b$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  аппроксимирующего выражения (2) составляют: для зависимости изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ -  $a = -9,6302 \cdot 10^{-14}$ ;  $b = 1,66924 \cdot 10^{-13}$ ; для зависимости изменения стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ  $a = -1,03684 \cdot 10^{-13}$ ;  $b = 1,43707 \cdot 10^{-13}$ . При описании зависимостей рис. 1,  $a$ ,  $b$  выражением (2) коэффициенты корреляции  $R$  и остаточная дисперсия  $SD^2$  составляют: для зависимости изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ -  $R = 0,99732$ ,  $SD^2 = 1,11822 \cdot 10^{-14}$ ; для зависимости изменения стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ -  $R = 0,99524$ ,  $SD^2 = 1,28394 \cdot 10^{-14}$ .

Статистическая обработка данных с аппроксимацией зависимости изменения дисперсии  $s_{\tilde{E}}^2$  среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ (рис. 1,  $\epsilon$ ) показала, что зависимость хорошо описывается выражением вида

$$s_{\tilde{E}}^2 = m \tilde{\theta}^n, \tag{3}$$

где  $m$  и  $n$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  аппроксимирующего выражения (3) составляют:  $m = 3,4372 \cdot 10^{-27}$ ;  $n = 3,17786$ .

При описании зависимости рис. 1,  $\epsilon$  выражением (3) коэффициент детерминации  $R^2$  и остаточная дисперсия  $SD^2$  составляют:  $R^2 = 0,99649$ ,  $SD^2 = 9,522 \cdot 10^{-54}$ .

Для определения чувствительности энергетических параметров результирующих сигналов АЭ к изменению глубины резания КМ при его механической обработке проведена обработка данных с построением зависимостей изменения процентного прироста среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Результаты обработки данных в виде зависимостей изменения процентного прироста среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии ( $\Delta Z$ ) от глубины резания КМ, по отношению к их начальным значениям при  $\tilde{\theta} = 1$ , показаны на рис. 2.

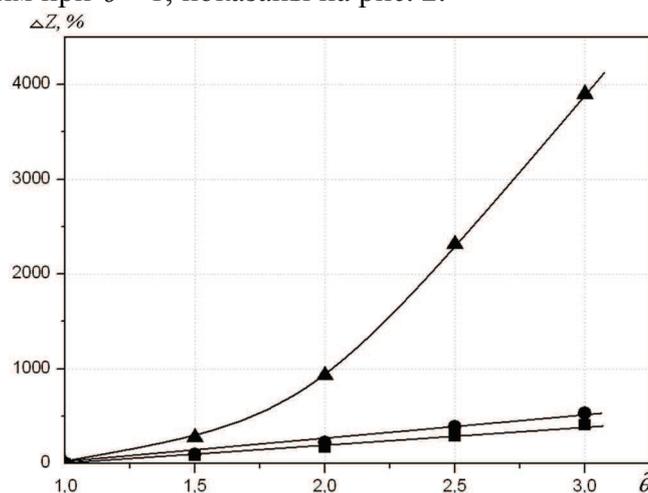


Рис. 2. Графики изменения процентного прироста среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  (■) результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения  $s_{\tilde{E}}$  (●) и дисперсии  $s_{\tilde{E}}^2$  (▲) в зависимости от глубины резания ( $\tilde{\theta}$ ) при механической обработке КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя

Полученные результаты показывают, что для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя при увеличении глубины резания КМ следует ожидать возрастания среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Однако наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ (рис. 2). Процентный прирост дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ является максимальным. Действительно, при возрастании глубины резания (площади разрушения поверхностного слоя) КМ в 2,5 раза (до  $\tilde{\theta}=2,5$ ) процентный прирост среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения  $s_{\tilde{E}}$  и дисперсии  $s_{\tilde{E}}^2$ , соответственно, составляют: 297,12, 391,84 и 2319,07 %. При возрастании  $\tilde{\theta}$  в 3,0 раза (до  $\tilde{\theta}=3,0$ ) процентный прирост  $\tilde{E}$ ,  $s_{\tilde{E}}$  и  $s_{\tilde{E}}^2$ , соответственно, составляют: 410,01, 532,45 и 3899,87 %.

**Выводы.** Проведено исследование закономерностей изменения энергетических параметров акустического излучения при механической обработке КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя в зависимости от глубины резания. Выполнена статистическая обработка данных с аппроксимацией зависимостей изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии при возрастании глубины резания. Показано, что зависимости изменения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и его стандартного отклонения хорошо описываются линейными функциями, а зависимость изменения дисперсии среднего уровня энергии – степенной функцией. При описании зависимостей получены значения коэффициентов корреляции и детерминации, а также остаточных дисперсий. Сделана обработка данных с определением процентного прироста энергетических параметров АЭ при возрастании глубины резания КМ. Показано, что наиболее чувствительным параметром АЭ при увеличении глубины резания является дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Процентный прирост дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ значительно опережает процентный прирост среднего уровня энергии и его стандартного отклонения.

Полученные результаты показывают, что анализ дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ может использоваться в качестве основного параметра при разработке методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ с определением глубины резания КМ.

В тоже время интерес представляет исследование энергетических параметров акустического излучения при изменении физико-механических характеристик обрабатываемого КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя.

#### Список использованных источников

1. Kovač, P. A review of machining monitoring systems / P. Kovač, I. Mankova, M. Gostimirović, M. Sekulić, B. Savković // Journal of production engineering. – 2011. – Vol. 14. – No 1. – P. 1–6.
2. Dongre P. R. Tool condition monitoring in various machining operations & use of acoustic signature analysis / P. R. Dongre, S. S. Chiddarwar, V. S. Deshpande // International Journal on Mechanical Engineering and Robotics (IJMER). – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 34–38.
3. Jaber A. A. The State of the Art in Research into the Condition Monitoring of Industrial Machinery / A. A. Jaber, R. Bicker // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2014. – V. 4. – No. 3. – P. 1986–2001.
4. 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. – Vol. 267. – P. 991–995.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. *Lu P.* An investigation into interface behavior and delamination wear for diamond-coated cutting tools / P. Lu // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the department of mechanical engineering (The university of Alabama). – 2013. – 155 p.
6. *Teti R.* Advanced IT methods of signal processing and decision making for zero defect manufacturing in machining / R. Teti // *Procedia CIRP.* – 2015. – Vol. 28. – P. 3–15.
7. *Ronald B. A.* Studies on grooving of dispersion strengthened metal matrix composites / B. A. Ronald, L. Vijayaraghavan, R. Krishnamurthy // *Materials forum.* – 2007. – Vol. 31. – P. 102–109.
8. *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. – Vol. 3. – No3. – P. 547–555.
9. *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. – Vol. 1. – No. 1–2. – P. 43–46.
10. *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.
11. *Mcleay T.* Failure mode analysis to define process monitoring systems / T. Mcleay, M. S. Turner // *Journal of Machine Engineering.* – 2011. – Vol. 11. – No. 4. – P. 118–129.
12. *Hase A.* Acoustic Emission Signal during Cutting Process on Super-Precision Micro-Machine Tool / A. Hase // *Proceedings of Global Engineering, Science and Technology Conference (3–4 October, 2013, Bay View Hotel, Singapore).* – 2013. – P. 1–12.
13. *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.
14. *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.
15. *Filonenko S.* Acoustic emission model with thermoactivative destruction of composite material surface / S. Filonenko // *Proceedings of the National Aviation University.* – 2015. – № 1 (62). – P. 57–62.