

*Сергей Филоненко***ОПИСАНИЕ ЭНЕРГИИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА***Сергій Філоненко***ОПИС ЭНЕРГИИ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБРОБЛЮВАНОВОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ***Sergey Filonenko***THE DESCRIPTION OF ACOUSTIC RADIATION ENERGY DURING THE CHANGE OF PROPERTIES OF MACHINED COMPOSITE MATERIAL**

*Проведен анализ энергетических параметров акустической эмиссии в зависимости от свойств композиционного материала при его механической обработке для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя. Определены и описаны закономерности изменения энергетических параметров акустической эмиссии при возрастании параметра, характеризующего свойства композиционного материала. Показано, что наибольшую чувствительность к изменению свойств композиционного материала имеет дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала акустической эмиссии.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, композиционный материал, результирующий сигнал, термоактивационная модель, энергетические параметры, механическая обработка.

*Рис.: 2. Табл.: 1. Библ.: 13.*

*Проведено аналіз енергетичних параметрів акустичної емісії залежно від властивостей композиційного матеріалу при його механічному обробленні для термоактиваційної моделі руйнування поверхневого прошарку. Визначено та описано закономірності зміни енергетичних параметрів акустичної емісії під час зростання параметра, що характеризує властивості композиційного матеріалу. Показано, що найбільшу чутливість до зміни властивостей композиційного матеріалу має дисперсія середнього рівня енергії результирующего сигнала акустичної емісії.*

**Ключові слова:** акустична емісія, композиційний матеріал, результирующий сигнал, термоактиваційна модель, енергетичні параметри, механічне оброблення.

*Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 13.*

*The analysis of acoustic emission energy parameters is conducted depending on properties of composite material machining for thermoactivative model of surface layer destruction. Are determined and are described of regularity change of acoustic emission energy parameters at ascending parameter describing property of composite material. Is showed, that the greatest sensitivity to change of composite material properties there is dispersion of acoustic emission resultant signal average level of energy.*

**Key words:** acoustic emission, composite material, resultant signal, thermoactivative model, energy parameters, machining.

*Fig.: 2. Tabl.: 1. Bibl.: 13.*

**Постановка проблемы.** Композиционные материалы (КМ) находят широкое применение в различных изделиях. Это обусловлено их высокими физико-механическими характеристиками, стойкостью к высоким температурам и агрессивным средам. Однако КМ чувствительны к микродефектам, появление которых влияет на несущую способность изделий. В связи с этим при механической обработке КМ внимание уделяется разработке методов контроля и мониторинга технологических процессов с использованием традиционных и нетрадиционных методов исследований. К таким методам относится метод акустической эмиссии (АЭ).

Применение метода АЭ основано на его высокой чувствительности малой инерционности к процессам, происходящим в поверхностных слоях обрабатываемого КМ. Это позволяет получать значительные объемы информации. В тоже время большое число влияющих технологических факторов, а также физико-механические характеристики КМ усложняют интерпретацию изменения акустического излучения и его параметров. Экспериментальные закономерности изменения параметров АЭ, как правило, имеют частное приложение. Во многих случаях они являются не устойчивыми и противоречивыми, что ограничивает практическое применение метода АЭ для контроля и диагностики технологических процессов механической обработки КМ. В данном аспекте значение имеют теоретические исследования АЭ при механической обработке КМ, которые связаны с установлением закономерностей изменения параметров акустического излучения

(амплитудных и энергетических) при действии различных факторов. Это позволяет проводить направленные эксперименты с решением проблемы разработки методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ.

Одним из факторов, влияющим на энергетические параметры АЭ, являются физико-механические характеристики КМ. Определение закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при механической обработке КМ с изменением его свойств для преобладающего термоактивационного разрушения поверхностного, безусловно, представляет научный и практический интерес.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Высокая чувствительность метода АЭ к процессам, происходящим в поверхностных слоях различных материалов при их механической обработке (точение, фрезерование, сверление), показана во всех опубликованных экспериментальных исследованиях [1–4]. При этом показано, что технологические параметры механической обработки материалов, включая и КМ, влияют на параметры регистрируемой АЭ.

В работе [5] исследовано влияние скорости механической обработки, скорости продольной подачи резца и глубины резания при точении алюминиевого сплава на среднее и среднеквадратическое значения (СКЗ) амплитуд сигналов АЭ, а также их статистические характеристики. Показано, что возрастание скорости обработки приводит к увеличению амплитудных параметров АЭ. Однако возрастание скорости продольной подачи резца и глубины резания имеют не однозначное влияние на амплитудные параметры АЭ. В работе [6] при выполнении операции фрезерования титанового сплава получено, что возрастание скорости резания, скорости продольной подачи фрезы и глубины резания приводит к возрастанию среднего значения амплитуды регистрируемого сигнала АЭ. В тоже время в работе [7] отмечено, что при фрезеровании алюминиевого композита с возрастанием скорости обработки происходит уменьшение среднего значения амплитуды сигнала АЭ. Однако при возрастании скорости продольной подачи резца и глубины резания происходит увеличение среднего значения амплитуды сигнала АЭ. Аналогичное влияние глубины резания на АЭ получено и в работе [8] при фрезеровании титанового композита. При сверлении КМ в работе [9] показано, что с возрастанием скорости подачи инструмента происходит увеличение среднеквадратического значения (СКЗ) амплитуды сигнала АЭ. Возрастание скорости обработки КМ приводит к падению СКЗ АЭ. Аналогичный результат получен и в работе [10], где показано, что с возрастанием скорости обработки КМ происходит падение энергии регистрируемых сигналов АЭ.

Работ, связанных с исследованием влияния физико-механических характеристик КМ на АЭ, практически нет. Можно отметить работу [9], где проведен анализ влияния процентного содержания в КМ углеродного нановолокна на СКЗ сигнала АЭ. При этом показано, что чем выше содержание в КМ углеродного нановолокна, тем меньше СКЗ регистрируемого сигнала АЭ. Такие закономерности получены для различных значений скорости пода инструмента и скорости обработки КМ.

Теоретические исследования амплитудных характеристик сигналов АЭ при механической обработке для термоактивационной и механической моделей разрушения поверхностного слоя КМ при изменении его свойств проведены в работах [11; 12]. Проведенные исследования показали, что при разрушении поверхностного слоя КМ сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал. Такой сигнал можно характеризовать средним уровнем амплитуды и величиной его разброса. При этом влияние свойств КМ на АЭ как для термоактивационного, так и механического разрушения поверхностного слоя однотипно. Показано, что с возрастанием параметров, которые характеризуют физико-механические характеристики КМ, происходит уменьшение амплитудных характеристик сигналов АЭ – среднего уровня амплитуды, его стандартного отклонения и

дисперсии. При этом определено, что уменьшение дисперсии среднего уровня амплитуды сигналов АЭ опережает уменьшение среднего уровня амплитуды и его стандартного отклонения. Моделирование энергии акустического излучения при механической обработке КМ для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя рассмотрено в работе [13]. Было показано, что с возрастанием параметра, характеризующего физико-механические характеристики КМ, наблюдается уменьшение энергии акустического излучения.

В тоже время интерес представляет исследование закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при механической обработке КМ с изменением его физико-механических характеристик КМ для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя. Такие исследования позволят определить чувствительность энергетических параметров АЭ к изменению свойств обрабатываемого КМ.

**Нерешенные части проблемы.** Для обеспечения достоверности контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки КМ значение имеют теоретические исследования акустического излучения с учетом влияния различных факторов. Такими факторами являются параметры технологического процесса механической обработки, а также свойства обрабатываемого и обрабатывающего КМ. Оптимизация параметров механической обработки КМ и разработка методов их контроля предполагают получение и описание закономерностей изменения амплитудных и энергетических параметров АЭ при действии различных факторов, а также определение чувствительности параметров АЭ.

Одним из параметров, влияющим на АЭ при механической обработке, являются физико-механические характеристики КМ. Получение и описание закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при изменении свойств обрабатываемого КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя, а также определение чувствительности энергетических параметров АЭ к изменению свойств обрабатываемого КМ, безусловно, представляет научный и практический интерес.

**Цель статьи.** Целью работы является исследование закономерностей изменения энергетических параметров АЭ в зависимости от физико-механических характеристик обрабатываемого КМ для термоактивационной модели разрушения его поверхностного слоя.

**Изложение основного материала.** Для анализа закономерностей изменения энергетических параметров сигналов АЭ при изменении физико-механических характеристик обрабатываемого КМ для термоактивационного разрушения его поверхностного слоя будем использовать данные моделирования энергии акустического излучения, которые получены в работе [13]. В табл. приведены результаты статистической обработки энергетических параметров акустического излучения по данным проведенного моделирования, при условиях, рассмотренных в работе [13]. В табл. приняты следующие обозначения:  $\tilde{\tau}_0$  – параметр, характеризующий физико-механические характеристики 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.

На рис 1. показаны зависимости изменения среднего уровня энергии сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии при изменении параметра  $\tilde{\tau}_0$ , характеризующего физико-механические характеристики КМ. Зависимости рис. 1 построены по данным, приведенным в табл.

Энергетические статистические характеристики результирующих сигналов АЭ при возрастании  $\tilde{\tau}_0$

$\tilde{\tau}_0$	$\tilde{E}$	$S_{\tilde{E}}$	$S_{\tilde{E}}^2$
$1,0 \cdot 10^{-7}$	$8,08568 \cdot 10^{-14}$	$5,27677 \cdot 10^{-14}$	$2,78443 \cdot 10^{-27}$
$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2,17156 \cdot 10^{-14}$	$1,73688 \cdot 10^{-14}$	$3,01676 \cdot 10^{-28}$
$2,0 \cdot 10^{-7}$	$1,19714 \cdot 10^{-14}$	$9,61907 \cdot 10^{-15}$	$9,25266 \cdot 10^{-29}$
$2,5 \cdot 10^{-7}$	$7,53761 \cdot 10^{-15}$	$5,89897 \cdot 10^{-15}$	$3,47978 \cdot 10^{-29}$
$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,00381 \cdot 10^{-15}$	$4,05458 \cdot 10^{-15}$	$1,64396 \cdot 10^{-29}$

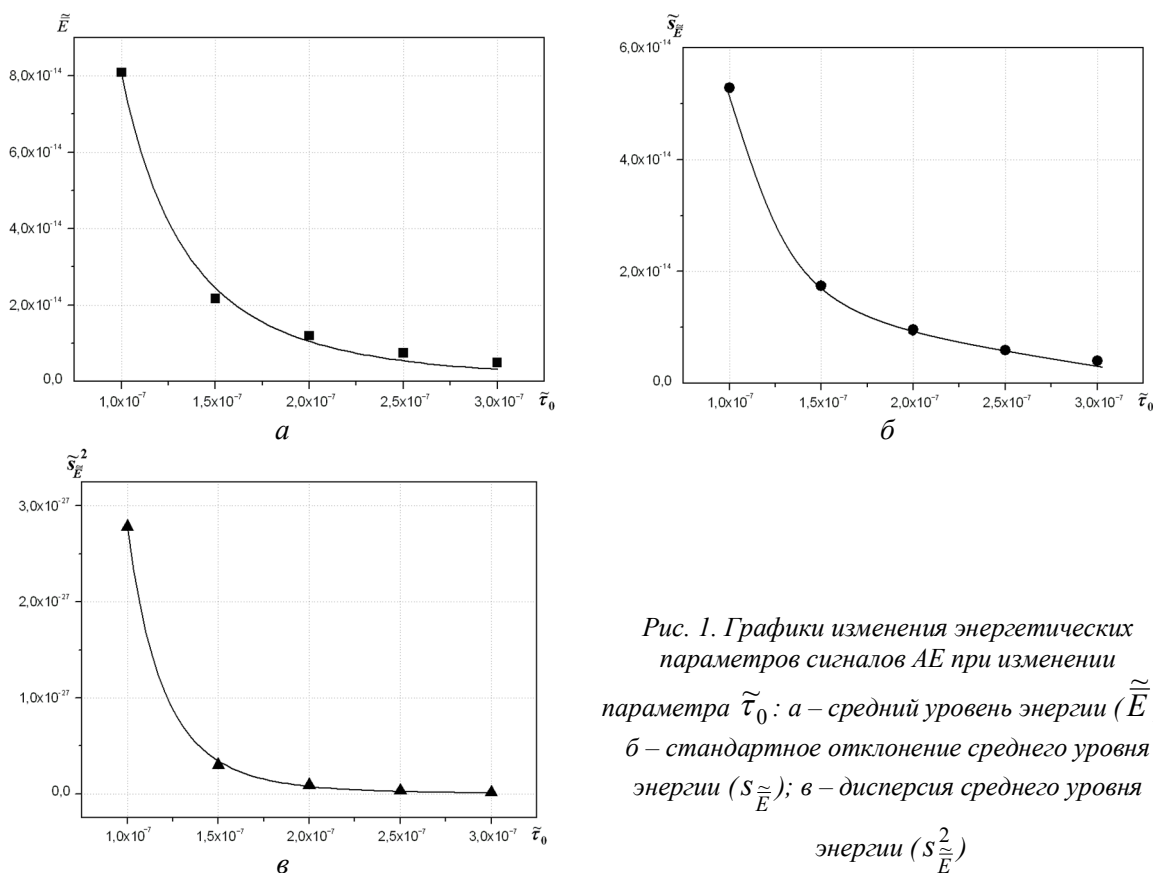


Рис. 1. Графики изменения энергетических параметров сигналов АЭ при изменении параметра  $\tilde{\tau}_0$ : а – средний уровень энергии ( $\tilde{E}$ ); б – стандартное отклонение среднего уровня энергии ( $S_{\tilde{E}}$ ); в – дисперсия среднего уровня энергии ( $S_{\tilde{E}}^2$ )

Полученные результаты (рис. 1) показывают, что возрастание значения  $\tilde{\tau}_0$  приводит к падению энергетических параметров результирующего сигнала АЭ – среднего уровня энергии, его стандартного отклонения и дисперсии. При этом закономерности падения энергетических параметров сигналов АЭ имеют нелинейный характер изменения. Статистическая обработка полученных данных с их аппроксимацией показала, что зависимости изменения среднего уровня энергии сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии хорошо описываются выражением вида

$$\tilde{D}_{\tilde{E}} = a \tilde{\tau}_0^b, \tag{1}$$

где  $\tilde{D}_{\tilde{E}}$  – энергетический параметр сигналов АЭ (средний уровень энергии сигнала АЭ, стандартное отклонение среднего уровня энергии сигнала АЭ или дисперсия среднего уровня энергии сигнала АЭ);

$a, b$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Критерием выбора аппроксимирующего выражения (1) для описания зависимостей, показанных на рис. 1, является минимум остаточной дисперсии.

Значения коэффициентов аппроксимирующего выражения (1) составляют: для среднего уровня энергии сигналов АЭ –  $a = 2,3061 \cdot 10^{-34}$ ,  $b = -2,93464$ ; для стандартного отклонения среднего уровня энергии сигналов АЭ –  $a = 2,8205 \cdot 10^{-32}$ ,  $b = -2,61013$ ; для дисперсии среднего уровня энергии сигналов АЭ –  $a = 1,8775 \cdot 10^{-63}$ ,  $b = -5,1672$ .

Статистическая обработка данных при аппроксимации зависимостей (рис. 1) выражением (1) показала, что значения коэффициентов детерминации  $R^2$  составляют: для среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ –  $R^2=0,99565$ ; для стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ  $s_{\tilde{E}} - R^2=0,99745$ ; для дисперсии среднего уровня энергии результирующих сигналов АЭ  $s_{\tilde{E}}^2 - R^2=0,99965$ .

Для определения чувствительности энергетических параметров сигналов АЭ к изменению физико-механических характеристик КМ при его механической обработке для термоактивационного разрушения поверхностного слоя проведем расчеты процентного падения среднего уровня энергии сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии, по отношению к их значениям при  $\tilde{\tau}_0=1,0 \cdot 10^{-7}$ . Результаты проведенных расчетов показаны на рис. 2, где  $\Delta Z$  – представляет анализируемый энергетический параметр сигналов АЭ.

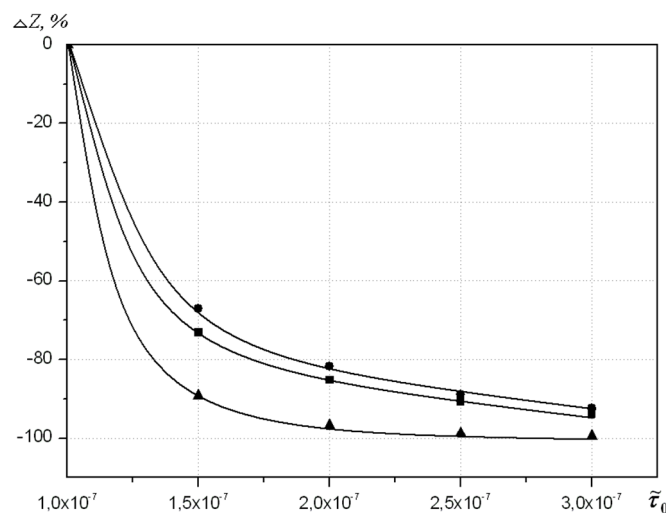


Рис. 2. Графики изменения процентного падения среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  (■) результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения  $s_{\tilde{E}}$  (●) и дисперсии  $s_{\tilde{E}}^2$  (▲) в зависимости от параметра  $\tilde{\tau}_0$ , характеризующего физико-механические характеристики КМ, при его механической обработке для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя

Из полученных результатов (рис. 2) видно, что с возрастанием значения  $\tilde{\tau}_0$ , характеризующего физико-механические характеристики КМ, процентное падение среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ опережает процентное падение стандартного отклонения среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. В тоже время процентное падение дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ опережает процентное падение среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и его стандартного отклонения. Действительно, как показывают проведенные расчеты, при  $\tilde{\tau}_0=1,5 \cdot 10^{-7}$  процентное падение среднего уровня энергии результирующего сиг-

нала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии, по отношению к их значениям при  $\tilde{\tau}_0 = 1,0 \cdot 10^{-7}$ , составляет: 73,14315, 67,08436, 89,16561 %. При  $\tilde{\tau}_0 = 1,5 \cdot 10^{-7}$  процентное падение анализируемых параметров составляет соответственно: 93,81151, 92,31617 и 99,40959 %.

Результаты проведенных исследований показывают, что наибольшую чувствительность к возрастанию параметра, характеризующего физико-механические характеристики КМ, имеет дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Уменьшение дисперсии среднего уровня энергии сигнала АЭ опережает уменьшение среднего уровня энергии и его стандартного отклонения.

**Выводы.** Проведена обработка энергетических параметров акустического излучения с построением закономерностей их изменения в зависимости от свойств КМ при его механической обработке для термоактивационной модели разрушения поверхностного слоя. Выяснено, что при возрастании параметра, характеризующего физико-механические характеристики КМ, зависимости изменения энергетических параметров сигналов АЭ имеют нелинейный характер падения. Статистическая обработка данных с аппроксимацией полученных зависимостей показала, что изменение среднего уровня энергии сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии хорошо описываются степенной функцией. Получены зависимости изменения процентного падения среднего уровня энергии сигналов АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии в зависимости от свойств КМ по отношению к их начальным значениям. Показано, что наибольшую чувствительность к возрастанию параметра, характеризующего физико-механические характеристики КМ, имеет дисперсия среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Уменьшение дисперсии среднего уровня энергии сигнала АЭ опережает уменьшение среднего уровня энергии сигнала АЭ и его стандартного отклонения. Проведенные исследования показывают, что анализ дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ можно использовать при разработке методов контроля и мониторинга технологических процессов механической обработки для контроля неравномерности свойств обрабатываемого КМ.

В тоже время интерес представляет исследование энергии акустического излучения при механической обработке КМ с изменением его физико-механических характеристик для механической модели разрушения поверхностного слоя.

#### Список использованных источников

1. *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.
2. *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. and Eng.* – 2012. – Vol. XXXIV, No.2. – P. 145–154.
3. *Ren Q.* High-order interval type-2 Takagi-Sugeno-Kang fuzzy logic system and its application in acoustic emission signal modeling in turning process / Q. Ren, M. Balazinski, L. Baron // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2012. – Vol. 63. – P. 1057–1063.
4. *Prakash M.* Tool Condition Monitoring using Multiple Sensors Approach in the Micro end milling of Aluminium Alloy (AA1100) / M. Prakash, M. Kanthababu, S. Gowri, R. Balasubramaniam, J.R. Jegaraj // 5-th Int. and 26-th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (December 12–14, 2014, IIT Guwahati, Assam, India). – 2014. – P. 394–1–394–6.
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, E. O. Ezugwu // *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*. – 2012. – Vol. 3 (3). – P. 547–555.
6. *Thepsonthi T.* Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing / T. Thepsonthi // A dissertation submitted to the Graduate School-New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey. – 2014. – 246 p.

7. *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.
8. *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.
9. *Rajakumari P. T.* Online monitoring of drilling carbon fiber reinforced polymeric nanocomposite laminates using acoustic emission technique / P. T. Rajakumari // A thesis submitted by in partial fulfillment for the requirement of award of the degree of doctor of philosophy faculty of mechanical engineering (Anna university, Chennai). – 2013. – 171 p.
10. *Andoh P. Y.* Development of a control strategy for monitoring the delaminating damage in drilling of carbon composite laminates / P. Y. Andoh, F. Davis, S. Owusu-Ofori // Journal of Science and Technology. – 2010. – Vol. 30, No.2. – P. 142–156.
11. *Filonenko S.* Simulation of acoustic emission in composite material machining with regard to its physical and mechanical characteristics / S. Filonenko, T. Nimchenko // Visnyk of Chernihiv State Technological University. – 2015. – № 2 (78). – P. 44–50.
12. *Филоненко С. Ф.* Влияние свойств обрабатываемого композиционного материала на акустическую эмиссию / С. Ф. Филоненко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 5 (74). – С. 60–64.
13. *Филоненко С. Ф.* Влияние свойств обрабатываемого композиционного материала на энергетические параметры акустической эмиссии / С. Ф. Филоненко // Вісник інженерної академії України. – 2015. – № 4. – С. 187–192.

**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 Sergey** – Doctor of Technical Sciences, professor, director of the Institute of Informational-Diagnostic Systems, National Aviation University (1 Komarova Av., 03058 Kyiv, Ukraine).

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

УДК 620.178

*Владимир Анисимов, Владимир Анисимов, Александр Чуприна*

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ**

*Володимир Анісімов, Володимир Анісімов, Олександр Чуприна*

## **ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ТОЧІННЯ**

*Vladimir Anisimov, Vladimir Anisimov, Alexandr Chuprina*

## **PROGRESSIVE RESEARCH DIRECTIONS IN THE SPHERE OF CUTTING FORCES MEASUREMENT IN TURNING**

Существует большое количество методов исследования усилия резания, которые в большинстве являются эмпирическими. Систематизированы методики исследования усилия резания. Представлены реализованные авторами концептуальные решения для измерения усилия резания при точении. Предложены новые направления разработки и конструкции устройств для измерения усилия резания при точении.

**Ключевые слова:** усилие резания, точение, измерение, резец, тензодатчик.

*Рис.:5. Библ.:5.*

Існує велика кількість методів дослідження зусилля різання, які в більшості є емпіричними. Систематизовано методики дослідження зусилля різання. Представлено реалізовані авторами концептуальні рішення для вимірювання зусилля різання під час точіння. Запропоновано нові напрямки розроблення та конструкції пристроїв для вимірювання зусилля різання під час точіння.

**Ключові слова:** зусилля різання, точіння, вимірювання, різець, тензодатчик.

*Рис.:5. Бібл.:5.*