

УДК 620.179:534.6

С.Ф. Филоненко, д.т. н., профессор

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛОЩАДИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСНОГО СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Проведено моделювання результуючих сигналів акустическої емісії при механіческій обробці в залежності від площі руйнування поверхносного слою композиційного матеріала для термоактиваційної моделі акустического излучения. Определено влияние площади разрушения поверхностного слоя композиционного материала на закономерности изменения амплитудных параметров акустической эмісії. Показано, что при общем возрастании амплитудных параметров акустической эмісії наибольшее возрастание имеет дисперсия среднего уровня амплитуды результующего сигнала акустической эмісії.

***Ключевые слова:** акустическая эмісія, композиційний матеріал, результуючий сигнал, амплітуда, механіческая обробка, площа руйнування.*

Постановка проблеми. Метод акустической эмісії (АЭ) находит все большее распространение в исследованиях механіческой обробки различных материалов, включая и композиційные материалы (КМ). Его применение обусловлено высокой чувствительностью метода к процессам деформирования и руйнування поверхносного слою КМ, значительными объемами получаемой информации и малой инерционностью метода к изменению развивающихся процессов. Проводимые исследования направлены на оптимізацию режимов механіческой обробки КМ, а также разработку методов контроля, диагностики и мониторинга состояния режущего инструмента.

Не смотря на значительные преимущества метода АЭ, результаты проводимых экспериментальных исследований показывают сложный характер акустического излучения, которое видоизменяется во времени в процессе механіческой обробки КМ. Интерпретация закономерностей данного изменения представляет значительные трудности. Это обусловлено, прежде всего, влиянием большого количества факторов, к которым относятся параметры технологического процесса механіческой обробки КМ (скорости резания и продольной подачи резца, глубина резания и другие), а также физико-механіческие механіческие характеристики обрабатываемого и обрабатывающего материалов. Кроме того, результующее акустическое излучение при механіческой обробке КМ формируется при наличии различных источников АЭ, включая и процессы трения обрабатывающего и обрабатываемого материалов. Безусловно, вклад данных источников излучения в результующий сигнал АЭ различен. Однако исследование их влияния также представляет значительные трудности. Существующие проблемы приводят к ограниченному применению метода АЭ в задачах контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов механіческой обробки КМ.

С данной точки зрения, значение имеют теоретические исследования АЭ, которые должны базироваться на моделях и моделировании акустического излучения при механіческой обробке КМ с учетом действия различных факторов. Такие исследования позволят определить закономерности изменения акустического излучения, с учетом преобладающего влияния того или другого фактора, а также преобладающего механизма руйнування поверхносного слою КМ. Одним из таких факторов является глубина резания КМ, которая связана с площадью руйнування поверхносного слою КМ. Безусловно, определение ее влияния на АЭ представляет научный и практический интерес.

Анализ источников и публикаций

Метод АЭ используется при проведении исследований процессов сверления, точения, фрезерования материалов с различной структурой, включая и КМ [1 - 3]. Исследования направлены на поиск закономерностей акустического излучения и разработки критериев для контроля, диагностики и мониторинга технологических процессов механіческой обробки материалов. В первую очередь, это касается мониторинга состояния режущего инструмента и его поломки.

Результаты проведенных исследований показывают сложный характер акустического излучения. Регистрируемые сигналы АЭ являются непрерывными сигналами с сильно изрезанной формой

[4 - 6]. Такой вид сигналов АЭ определяет методы обработки и анализируемые параметры акустического излучения. К таким параметрам относят: средние или среднеквадратические значений амплитуд регистрируемых сигналов АЭ; площадь под сигналами или ее накопленные значения; счет энергии (энергия) сигналов АЭ; счет количества сигналов над порогом ограничения; спектры сигналов АЭ в области низких и высоких частот на временных интервалах анализа и другие. Обработка данных параметров осуществляют с их привязкой к параметрам механической обработки материалов (скорость резания, глубины резания, износ режущего инструмента, угол резания и другие) с использованием статистических методов анализа. Полученные эмпирические закономерности изменения параметров АЭ в зависимости от действия различных факторов (для различных обрабатываемых материалов и технологических процессов их механической обработки), как показывают результаты экспериментальных исследований, имеют сложный характер изменения [7 - 10]. Однако полученные закономерности имеют ограниченное применение. Во многих случаях они не являются устойчивыми и противоречат друг другу.

Теоретические исследования АЭ при механической обработке материалов касаются только материалов с кристаллической структурой. В таких исследованиях используются два подхода. Первый из них базируется на предположении того, что энергия АЭ пропорциональна энергии, которая затрачивается на резание материала [11]. Работа (W), которая затрачивается на пластическую деформацию при резании, определяется выражением вида

$$W = \sigma \dot{\epsilon} V, \quad (1)$$

де V – объем материала, который вступает в пластическую деформацию; σ - действующее напряжение; $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации.

Считая, что между работой на пластическую деформацию и энергией АЭ существует прямо пропорциональная связь, то среднеквадратическое значение амплитуды сигналу АЭ можно описать выражением вида

$$RMS^2 = C_1 (\sigma \dot{\epsilon} V), \quad (2)$$

где C_1 - коэффициент пропорциональности.

С учетом данных предположений и параметров резания, в работе [11] получено выражения для среднеквадратического значения амплитуды сигналу АЭ при резании материалов в виде

$$RMS = C_1 C_2 \left\{ \tau_k t' v \left(\frac{\cos \gamma}{\sin \varphi \cos(\varphi - \gamma)} f + \frac{1}{3} (\ell + 2\ell_1) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где τ_k - напряжение сдвига; t' - глубина резания; v - скорость резания; φ - угол сдвига; γ - передний угол инструмента; ℓ - длина зоны контакта инструмент-стружка; ℓ_1 - длина зоны сцепления стружки с инструментом; f – скорость поперечной подачи; C_1 , C_2 - постоянные коэффициенты.

Модель (3) не имела достаточного согласования с результатами экспериментальных исследований и была уточнена в работе [12]. Однако многие экспериментальные исследования показали слабое согласование или отсутствие связи предложенной модели с закономерностями изменения среднеквадратического значения амплитуды сигналу АЭ при механической обработке материалов.

Второй подход в теоретических исследованиях АЭ при резании материалов основан на том, что при резании материалов основными источниками АЭ являются пластическая деформация и разрушение [13]. Тогда микро-модели сигналов АЭ, которые формируются при деформировании и разрушении материала, могут быть использованы при построении модели акустического излучения при резании материала. Такой подход использован в работах [14, 15] для модели результирующего сигнала АЭ, формируемого при механической обработке материалов с кристаллической структурой, и в работе [16] для термоактивационной модели результирующего сигнала АЭ, формируемого при механической обработке КМ.

Исследования по моделированию акустического излучения, проведенные в работе [16], показали, что в процессе механической обработки КМ, формируемый результирующий сигнал АЭ должен представлять собой непрерывный сигнал с сильно изрезанной формой. Полученный результат согласуется с данными экспериментальных исследований при различных видах механической обработки КМ [5, 17].

Согласно исследованиям [16], параметры формируемого сигнала АЭ зависят от ряда факторов. Одним из таких факторов является глубина резания или площадь разрушения поверхностного слоя КМ при его механической обработке. Безусловно, интерес представляет исследование ее влияния 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 площади разрушения его поверхностного слоя. Будет проведен анализ амплитудных параметров сигналов АЭ и их статистических харак-

теристик. Будет показано влияние площади разрушения поверхностного слоя КМ при его механической обработке на возрастание амплитудных параметров АЭ.

Результаты исследований. В работе [16] модель результирующего сигнала АЭ при механической обработке для преобладающего термоактивационного разрушения поверхностного слоя КМ без учета износа обрабатывающего инструмента представлена в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_R(t-t_j), \quad (4)$$

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

При построении модели результирующего сигнала АЭ (4) предполагалось, что при механической обработке КМ на малых промежутках времени происходит последовательное разрушение во времени площадок поверхностного слоя одинаковой площади. Такое условие соответствует постоянным параметрам технологического процесса механической обработки КМ, т.е. постоянным величинам глубины и скорости резания, а также скорости продольной подачи обрабатывающего инструмента. Также считалось, что разрушение каждой площадки КМ приводит к формированию акустического излучения в виде импульсного сигнала АЭ. Для термоактивационной модели формирования акустического излучения при разрушении площадки КМ, состоящей из N_0 элементарных элементов, импульсный сигнал АЭ U_R описывается выражением вида

$$U_R(t) = u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0-t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} (\dot{a}^{-\chi(t_0-t)} - \dot{a}^{\chi t_0})}, \quad (5)$$

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 элементарных элементов; β - коэффициент пропорциональности между напряжением разрушения и амплитудой

одиночного импульса возмущения при разрушении одного элементарного элемента; $\delta_s = \int_{t-\frac{\delta}{2}}^{t+\frac{\delta}{2}} a(\tau) d\tau$; δ -

длительность одиночного импульса возмущения при разрушении одного элементарного элемента; $a(\tau)$ -

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 КМ; k - постоянная Больцмана; T - температура; γ - структурно чувствительный коэффициент.

При наличии факторов, влияющих на длительность процесса разрушения площадок КМ, таких как: дисперсность свойств обрабатываемого КМ, нестабильность скорости вращения заготовки, нестабильность скорости продольной подачи или другие, моменты времени t_j появления импульсных сигналов АЭ U_R при последовательном разрушении площадок поверхностного слоя КМ можно представить в виде

$$t_j = j \Delta t_j \pm \delta_R, \quad (6)$$

где Δt_j - интервал времени между началом формирования последующего импульсного сигнала АЭ по отношению к предыдущему; j - номер разрушаемой площадки КМ или номер формируемого импульсного сигнала АЭ; δ_R - случайная составляющая в моменте времени появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ, которая обусловлена нестабильностью процесса разрушения площадок КМ.

В выражение (5) входит параметр N_0 , который определяет площадь разрушения площадки КМ. Для учета площади разрушаемых площадок КМ выражение (3) запишем виде

$$U_R(t) = u_0 \theta \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi} (\tilde{a}^{-\chi(t_0 - t)} - \tilde{a}^{\chi t_0})}, \quad (7)$$

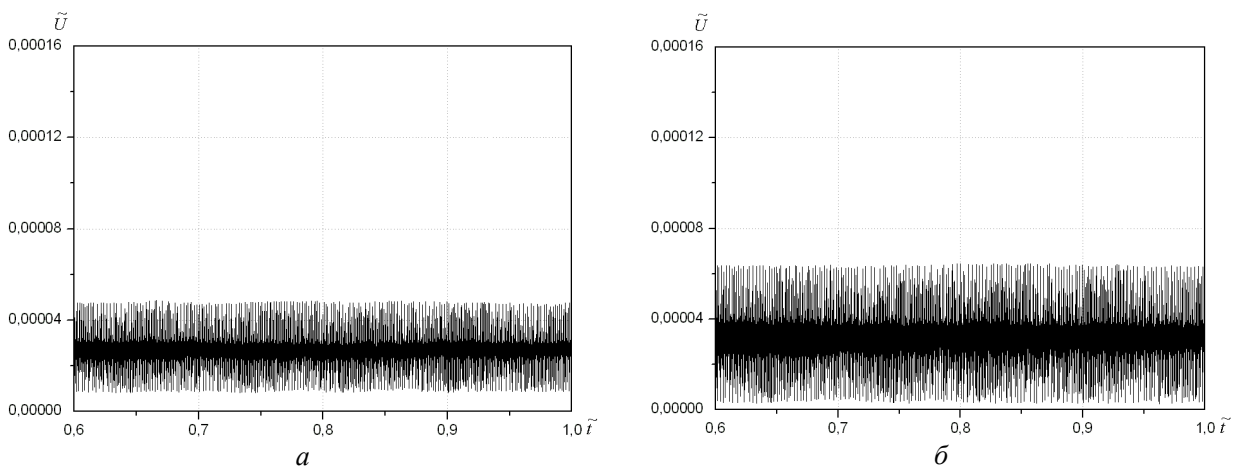
где $u_0 = \frac{1}{\tau_0} \beta \delta_s$; $\theta = N_0 / N_T$ - N_0 - начальное значение количества элементов КМ; N_T - текущее значение количества элементов КМ.

При расчетах амплитуд результирующих сигналов АЭ будем считать, что происходит увеличение площади разрушения площадки КМ, величина которой определяется увеличением глубины резания, т.е. будет происходить увеличение количества элементов N_T , по отношению к начальному количеству элементов N_0 , или будет увеличиваться значение θ . При моделировании значение θ в относительных величинах будем изменять от $\tilde{\theta} = 1$ до $\tilde{\theta} = 3$ с шагом приращения 0,5.

Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (4), с учетом (6) и (7), в относительных единицах в зависимости от площади разрушения поверхностного слоя КМ. При моделировании параметры, входящие в выражение (7), приведем к безразмерным величинам, а время будет нормировано на t_0 . Будем считать, что при начальных условиях для некоторой глубины резания разрушается единичная площадь площадки КМ, т.е. начальное значение $\tilde{\theta} = 1$. Амплитуду сигналов будем нормировать на значение u_0 . Величину $\frac{\gamma}{kT}$ 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 $\tilde{\alpha}$ примем равной $\tilde{\chi} = 30$.

Значение $\Delta \tilde{t}_j$ примем исходя из расчета длительности импульсного сигнала АЭ, согласно (7). Исходя из расчета длительности импульсного сигнала АЭ для заданной скорости $\tilde{\chi} = 30$, значение $\Delta \tilde{t}_j$ примем равным $\Delta \tilde{t}_j = 0,08$. Значение $\tilde{\delta}_R$ для $\tilde{\chi} = 30$ будем изменять в диапазоне величин от 0 до 0,12 произвольным образом.

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.



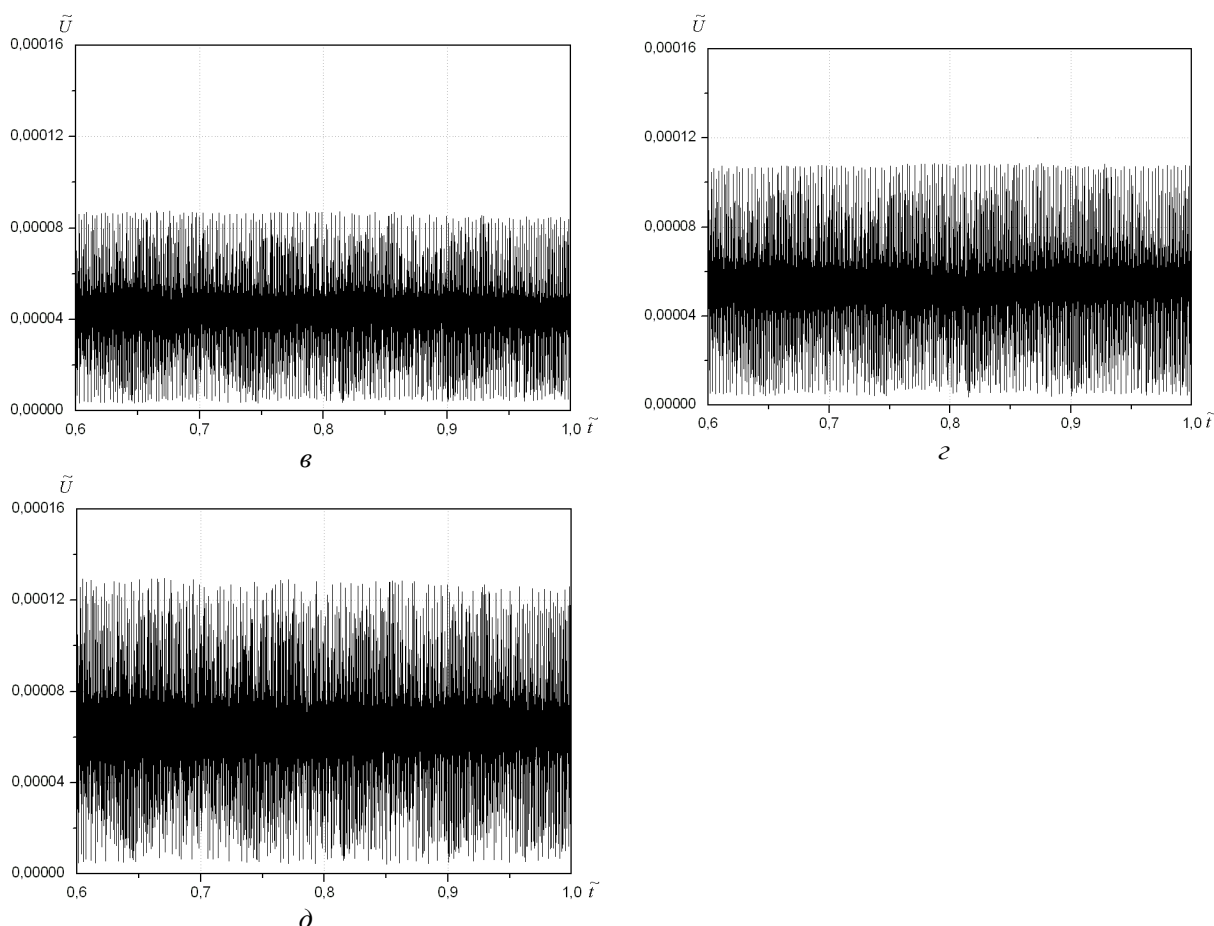


Рис. 1 – Графики изменения амплитуд результирующего сигнала АЭ во времени, согласно (4), в относительных единицах при механической обработке для разной площади разрушения поверхностного слоя КМ. Параметры моделирования: $\tilde{\chi} = 30$; $\Delta\tilde{t}_j = 0,08$; $\tilde{\tau}_0 = 10^{-7}$; $\tilde{\delta}_R$ изменяется в диапазоне от 0 до 0,12.

Площадь разрушения КМ в относительных единицах: а - $\tilde{\theta} = 1$; б - $\tilde{\theta} = 1,5$; в - $\tilde{\theta} = 2$; г - $\tilde{\theta} = 2,5$; д - $\tilde{\theta} = 3$

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

При $\tilde{\theta} = 1$ средний уровень амплитуды \tilde{U} результирующего сигнала АЭ составляет $\tilde{U} = 0,0000269$, а его стандартное отклонение $s_{\tilde{U}}$ и дисперсия $s_{\tilde{U}}^2$, соответственно, равны: $s_{\tilde{U}} = 9,299 \cdot 10^{-6}$; $s_{\tilde{U}}^2 = 8,648 \cdot 10^{-11}$. При увеличении $\tilde{\theta}$ в 1,5 раза (от 1 до 1,5) значения \tilde{U} , $s_{\tilde{U}}$ и $s_{\tilde{U}}^2$ возрастают, соответственно, в 1,28 раза, в 1,5 раза и в 2,25 раз. Если $\tilde{\theta}$ возрастает 2 раза до $\tilde{\theta} = 2$, то значения \tilde{U} , $s_{\tilde{U}}$ и $s_{\tilde{U}}^2$ увеличиваются, соответственно, в 1,58 раз, в 2,0 раза и в 4,0 раза. При увеличении $\tilde{\theta}$ в 2,5 раза до $\tilde{\theta} = 2,5$ значения \tilde{U} , $s_{\tilde{U}}$ и $s_{\tilde{U}}^2$ возрастают в 1,92 раза, в 2,5 раза и в 6,25 раз. При увеличении $\tilde{\theta}$ в 3 раза до $\tilde{\theta} = 3$ значения \tilde{U} , $s_{\tilde{U}}$ и $s_{\tilde{U}}^2$ возрастают в 2,3 раза, в 3,0 раза и в 9,0 раз.

Результаты проведенных исследований показывают, что возрастание площади разрушения поверхностного слоя КМ приводит к общему возрастанию всех амплитудных параметров результирующих

сигналов АЭ. Однако наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ.

Заключение. Рассмотрены результаты моделирования результирующих сигналов АЭ при механической обработке КМ для термоактивационной модели формирования акустического излучения в зависимости от площади разрушения поверхностного слоя. Показано, что при возрастании площади разрушения поверхностного слоя КМ не наблюдается изменений в характере акустического излучения. Результирующие сигналы АЭ являются непрерывным сигналом с сильно изрезанной формой. Результаты моделирования показали, что возрастание площади разрушения поверхностного слоя КМ приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Статистический анализ полученных данных показал, что возрастание площади разрушения поверхностного слоя КМ приводит к общему возрастанию всех амплитудных параметров результирующих сигналов АЭ. Однако наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. В тоже время интерес представляет исследование закономерностей изменения энергетических параметров АЭ при изменении скорости механической обработки КМ.

Список литературы

1. Jawahir I.S. Surface integrity in materials removal processes: Recent advances/ I.S. Jawahir, E. Brinksmeier, R.M. Saoubi, D.K. Aspinwall, J.C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A.D. Jayal//CIRP Annals - Manufacturing technology.-2011.-v.60.-P.603-626.
2. 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
3. Hassan Y. Acoustic Emission Signal Analysis and Artificial Intelligence Techniques in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis: A Review /Y. Hassan, R. A. Rahman, R. Ishak// Jurnal Teknologi, Sciences and Engineering.-2014.-v. 69.-No2.-P. 121-126
4. Lu P. Short- time Fourier transform method in AE signal analysis for diamond coating failure monitoring in machining application/P. Lu, Y. Kevin Chou, R.G. Tomthpson// Proceedings of the ASME 2010 Int. Manufacturing Science and Engineering Conf. MSEC 2010 (12 - 15 October, 2010, Erie, Pennsylvania, USA).-P.1-8.
5. 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
6. Neslušán M. Analysis of chip formation during hard turning through acoustic emission /M. Neslušán, M. Šipek, J. Mrazik// Materials Engineering.-2012.-N019.-P.1-11
7. Kopač J. Acoustic emission in drilling carbon steel and nodular gray iron/J. Kopač, S. Sali//J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.-2006.-v.-No1.-P.91-95
8. 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.-V. XXXIV.-No. 2.-P. 145-154.
9. Bhuiyann M.S.H. An innovative approach to monitor the chip formation effect on tool state using acoustic emission in turning/ M.S.H. Bhuiyann, I.A.Choudhury, Y.Nukman// International Journal of Machine Tools & Manufacture.-2012.-v.58.-P.19-28/
10. Lu P. An investigation into interface behavior and delamination wear for diamond-coated cutting tool/P. Lu//A dissertation submitted in partial fulfillment for degree of doctor of philosophy in the department of mechanical engineering in the graduate school of the university of Alabama, USA.-2013.-177 p.
11. Teti R. Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting /R.Teti, D.A. Dornfeld // ASME J. of Eng. for Indu.-1989.-V.111.-P. 229 - 237.
12. Liu J. J. Modeling and analysis of acoustic emission in diamond turning/ J. J. Liu, D. A. Dornfeld //J. of Manu. Sci. and Eng.-1996.-V.118.-P. 199-207.
13. 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.
14. Філоненко С.Ф Акустична емісія при механічній обробці матеріалів точінням /С.Ф. Філоненко, Т.В. Німченко// Технологіческие системы.-2011.-№ 3 (56) .-С.50-56
15. Філоненко С.Ф Акустическая эмиссия при изменении скорости обработки материалов точением /С.Ф. Філоненко, Т.В. Німченко, Т.Н. Косицкая// Технологіческие системы.-2011.-№ 4 (57) .-С.80-88
16. Filonenko S. Acoustic emission model with thermoactivative destruction of composite material surface/S. Filonenko// Proceedings of the National Aviation University.-2015.-N1 (62).-P. 53-58
17. 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.