

УДК 620.179:534.6

Филоненко С.Ф., Нимченко Т.В., Косицкая Т.Н.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

**ВКЛАД СОСТАВЛЯЮЩИХ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ СИГНАЛ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ****Анотація**

*Розглянуто результати розрахунків параметрів імпульсних сигналів акустичної емісії при деформуванні і руйнуванні оброблюваного матеріалу і змінної площі руйнування композиційного матеріалу. Показано, що зростання площі руйнування композиційного матеріалу приводить до поступового зростання параметрів формованого сигналу, які перевищують параметри сигналів від деформування і руйнування оброблюваного матеріалу. Проведено моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються при механічній обробці матеріалів точінням, коли відсутнє і відбувається руйнування композиційного матеріалу. Розглянуто вплив внеску сигналів АЕ від руйнування композиційного матеріалу в результуючий сигнал, що формується при механічній обробці матеріалів точінням.*

**Abstract**

*The calculation of pulse signals parameters of acoustic emission at deforming and destruction of a processed material and changeable area of destruction a composite are reviewed. Is shown, that the ascending of the destruction area of composite results to gradual ascending of a reshaped signal parameters, which one surpass parameters of signals from deforming and destruction of a of a processed material. The simulation of resulting acoustic emission signals from cutting at machine work of materials is conducted, when misses and there is a destruction of composite material. Influencing the contribution of acoustic emission signal from destruction of composite material in a resultsng signal reshaped at cutting machine work of materials is reviewed.*

**Постановка проблемы**

При изготовлении разнообразных деталей широко используются операции механической обработки материалов точением. При этом процесс взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой деталью сопровождается различными физико-механическими явлениями. Они используются

не только для исследования процессов резания, но и для разработки методов их контроля и диагностики.

Одним из таких явлений является акустическая эмиссия (АЭ). Изучение явления АЭ при деформировании и разрушении материалов показало его высокую чувствительность к процессам, протекающим в структуре материалов на микро и макро уровнях. Это явилось основой широкого использования метода в исследовании различных процессов, в том числе и процессов механической обработки материалов точением. При этом интенсивность исследований явления АЭ непрерывно возрастает. Однако исследования, проводимые в области АЭ, показали существование целого ряда проблем. Проблемы, прежде всего, связаны с интерпретацией АЭ информации. Это обусловлено сложностью самого явления АЭ, высокой чувствительностью метода к протекающим микропроцессам, разнообразием закономерностей акустического излучения, имеющих частное приложение и другими. Кроме того, существуют и различные теоретические подходы к описанию формирования сигналов АЭ (стохастические, расчетно-аналитические, физические), которые предполагают рассмотрение различных параметров АЭ.

Подобные проблемы в полной мере относятся и к АЭ, сопровождающей процессы механической обработки материалов точением. При этом проблема интерпретации АЭ усложняется динамикой развивающихся процессов, наличием пары взаимодействующих и различных по своей структуре материалов — обрабатываемая деталь — режущий инструмент, которые могут вносить свой вклад в акустическое излучение. Безусловно, что в этом случае важное значение приобретают теоретические исследования. Они позволяют не только описывать закономерности акустического излучения с оценками влияния различных факторов, но разрабатывать методы контроля и диагностики процесса резания и режущего инструмента.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Результаты опубликованных исследований по изучению явления АЭ при механической обработке материалов точением показывают, что существует два основных направления в приложении

метода. Первое из них, связано с разработкой методов контроля и диагностики состояния режущего инструмента [1–4] (износ, образование трещин, скалывание, разрушение). Второе направление, связано с контролем и диагностикой самого процесса резания [5–9] (формирование различных видов стружки, влияние параметров технологического процесса на акустическое излучение и другое). При проведении таких исследований стремятся к некоторой детализации возможных источников акустического излучения (первичная и вторичные зоны деформации, зона износа и другие), а так же к представлению возможного вида излучения (непрерывное или дискретное). Однако, в конечном итоге, в исследованиях основное внимание уделяется анализу закономерностей изменения среднеквадратического значения амплитуды (root-mean-square – RMS) [6, 7]. При этом и теоретические исследования направлены на описание RMS с учетом технологических параметров обработки материалов точением [4, 10, 11]. Следует отметить, что в аналитических выражениях, описывающих RMS, фигурирует значительное количество технологических параметров, таких как: напряжение сдвига; глубина резания; угол резания; скорость резания; длина зоны контакта инструмент-стружка; передний угол инструмента; затухание сигнала между зоной сдвига, границей контакта стружки с инструментом, зоной датчика и ряд других. Однако, в большинстве случаев, при выводе подобных выражений практически не используются физические представления о процессах развивающихся в материале при их деформировании и разрушении.

В тоже время, как отмечено в работах [2, 4], исследователями показано, что при механической обработке материалов точением значимыми являются два основных источника акустического излучения – пластическое деформирование и разрушение обрабатываемого материала, а так же возможное разрушение режущего инструмента. Это соответствует существующим представлениям о том, что основными процессами, протекающими при резании материалов, являются последовательные процессы их пластического деформирования и разрушения [12]. Основываясь на этих представлениях в работах [13, 14] рассмотрена модель и результаты моделирования результирующего сигнала АЭ при деформировании и разрушении материала в процессе механической обработки материала точением. При этом показано, что результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал, который характеризуется некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса. Полученный результат согласуется с результатами экспериментальных исследований [15–17].

При рассмотрении модели результирующего сигнала АЭ в работах [13, 14] предполагалось, что

не происходит разрушение (изнашивание) режущего инструмента, т.е. отсутствует вклад данного процесса в формируемый результирующий сигнал АЭ. Исследование такого вклада в закономерности изменения параметров результирующего сигнала АЭ является важным, с точки зрения контроля и диагностики процессов механической обработки материалов точением.

### Задачи исследований

В работе будет проведено моделирование сигналов АЭ, формируемых при протекании процесса пластической деформации в заданном объеме обрабатываемого материала и его разрушении, а также при разрушении поверхностного слоя обрабатываемого (композиционного) материала с заданной площадью. Будет проведен анализ отношения параметров формируемых сигналов АЭ при постепенном возрастании площади разрушения композиционного материала (КМ). Так же будет проведено моделирование результирующего сигнала АЭ, формируемого при механической обработке материалов точением при отсутствии и разрушении обрабатываемого материала. Будут показаны закономерности изменения его параметров при возрастании площади разрушения поверхностного слоя КМ.

### Результаты исследований

В работах [13, 14], как отмечено выше, при рассмотрении модели и моделировании результирующего сигнала АЭ рассматривались две составляющие процесса механической обработки материалов точением, которые вносят вклад в результирующий сигнал АЭ. При этом предполагалось, что вклад в АЭ от разрушения обрабатываемого инструмента отсутствует. В дальнейшем, будем считать, что в качестве обрабатываемого инструмента используется КМ. При наличии составляющей от разрушения КМ результирующий сигнал АЭ можно записать в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_d(t - t_j) + \sum_i U_T(t - t_i) + \sum_k U_{km}(t - t_k), \quad (1)$$

где  $U_p$ ,  $U_d$ ,  $U_T$ ,  $U_{km}$  – соответственно, результирующий сигнал АЭ и сигналы АЭ, которые формируются при протекании пластической деформации и разрушения обрабатываемого материала, а так же сигнал АЭ, который формируется при разрушении обрабатываемого (КМ) материала;  $t_j$ ,  $t_i$ ,  $t_k$  – соответственно, моменты времени появления сигналов АЭ  $U_d$  и  $U_T$  от пластической деформации и разрушения обрабатываемого материала, а так же  $U_{km}$  – от разрушения КМ.

Согласно существующим представлениям, процессы деформирования и разрушения обрабатываемого материала происходят последовательным образом, т.е. пластическая деформация обрабатываемого материала предшествует его разрушению. Если предположить, что данные процессы предшествуют разрушению КМ, то можно считать, что формирование сигналов АЭ  $U_d$ ,  $U_T$  и  $U_{km}$  происходит последовательным образом. При таких условиях для моментов времени часу  $t_j$ ,  $t_i$  и  $t_k$  будет выполняться соотношение  $t_j < t_i < t_k$ . При этом для заданных режимов механической обработки материалов точением (заданной скорости вращения детали, глубины резания, скорости поперечной подачи) моменты времени  $t_j$ ,  $t_i$  и  $t_k$  будут иметь некоторую случайную составляющую, что может быть обусловлено вариацией объемов материала, вступающего в пластическую деформацию, и площади разрушения обрабатываемого и обрабатывающего материала. Это может быть учтено при моделировании результирующих сигналов АЭ.

Для проведения такого моделирования проведем сравнительные оценки в деформировании и разрушении обрабатываемого материала и линейного износа (разрушения поверхностного слоя) обрабатываемого материала. Как показывают исследования процессов механической обработки материалов точением с использованием инструментов на основе КМ, их линейный износ происходит на достаточно длительных интервалах времени. Например, при обработке детали из стали ХВГ с использованием четырехгранной пластины марки Т15К6 при глубине резания 0,4 мм на длине 21 мм линейный износ составил 0,1 мм. Если считать, что такой износ КМ происходит постепенно и равномерно, то при скорости поперечной подачи 0,1 мм/об за один оборот детали линейный износ будет составлять 0,0005 мм. При диаметре детали 32 мм за один ее оборот по образующей поверхности будет снято 50,24 мм обрабатываемого материала. Без учета глубины резания, т.е. объема материала, который вступает в пластическую деформацию, и площади его разрушения, даже при таких расчетах на 1 мм снимаемого материала приходится  $10^{-5}$  мм износа или разрушения поверхностного слоя КМ. При этом объем материала режущего инструмента, который разрушается в единицу времени, значительно меньше обрабатываемого материала. Вероятно, что при таких условиях, вклад сигналов  $U_d$  от деформирования и  $U_T$  разрушения обрабатываемого материала, а так же сигнала  $U_{km}$  от разрушения КМ в результирующий сигнал АЭ  $U_p$  может значительно различаться между собой. Это обусловлено тем, что при принятых условиях протекания процессов параметры сигналов АЭ (амплитуда, энергия, длительность) будут значительно отличаться друг от друга.

Проведем моделирование сигналов АЭ  $U_d$ ,  $U_T$  и  $U_{km}$  для следующих сценариев развития процессов деформирования и разрушения. Будем считать, что нагружение материалов осуществляется с постоянной скоростью. При этом объем обрабатываемого материала, который вступает в пластическую деформацию, и площадь его разрушения являются постоянными. Их значения в относительных величинах примем равными единице. В соответствии с проведенными оценками, будем считать, что разрушение КМ значительно меньше, чем обрабатываемого материала, и его величина постепенно возрастает.

Математические выражения для сигналов АЭ  $U_d$  и  $U_T$ , в соответствии с работой [13], имеют вид

$$U_d(t) = u_0 \alpha t \exp(-B\alpha t), \quad (2)$$

$$U_T(t) = U_0 \alpha^3 t^2 \exp(-b\alpha t), \quad (3)$$

где  $u_0 = a_0 M \frac{v_D}{\ell} \delta_D$ ,  $a_0$  — амплитудное значение

одиночного импульса возмущения, формируемого одиночной подвижной дислокацией;  $\delta_D$  — средняя длительность одиночного импульса возмущения при движении дислокации;  $v_D$  — скорость движения дислокации;  $\ell$  — расстояние, которое проходит дислокация;  $M$ ,  $B$  — параметры, зависящие от физико-механических характеристик материала (характеризуют распределение плотности подвижных дислокаций от деформации для определенного объема материала);  $\alpha$  — скорость нагружения (деформирования);  $U_0 = N_0 c k_1 \delta_s$ ;  $N_0$  — общее число разрушаемых микро-объемов в определенной площади;  $k_1$  — коэффициент пропорциональности;  $\delta_s$  — средняя длительность одиночного импульса возмущения при разрушении элементарного объема;  $c$ ,  $b$  — коэффициенты, зависящие от физико-механических характеристик материала (характеризуют распределение разрушаемых элементарных объемов по прочности).

Для сигнала АЭ  $U_{km}$ , согласно [18], будем использовать выражение, полученное при термоактивационном разрушении КМ

$$U_{km}(t) = \frac{1}{\tau_0} u_1 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} \times \left( -\frac{1}{\tau_0 \chi} (e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0}) \right) \times e^{\tau_0 \chi}, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — параметр, который по величине совпадает с периодом тепловых колебаний атомов решетки

твердого тела  $\chi = \frac{\gamma \alpha}{kT}$ ;  $t_0 = \frac{U_1}{\gamma \alpha}$ ;  $U_1$  — начальная



энергия активации процесса разрушения;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $\gamma$  – структурно чувствительный коэффициент;  $\alpha$  – скорость нагружения материала;  $u_1 = N_1 \beta \delta_1$  – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении  $N_1$  элементов КМ;  $N_1$  – исходное количество элементов КМ, которые разрушаются;  $\beta$  – постоянная;  $\delta_1$  – средняя длительность одиночного импульса возмущения при разрушении одиночного элемента КМ.

При проведении расчетов изменения сигналов АЭ  $U_d$  и  $U_T$  во времени параметры, которые входят в выражения (2) и (3), будут приведены к безраз-

мерным величин. Значения параметров  $b$ ,  $B$  и  $\tilde{\alpha}$

примем равными:  $b = 15$ ;  $B = 10$ ;  $\tilde{\alpha} = 150$ . При этом, как отмечено выше, объем обрабатываемого материала, который вступает в пластическую деформацию, и площадь его разрушения примем равными единице. Время будет представлено в относительных единицах. При проведении расчетов сигнала АЭ  $U_{km}$  во времени параметры, которые входят в выражение (4), так же будут приведены к безразмерным величинам. Время будет нормирова-

но на  $\tau_0$ , а параметр  $\chi$  на  $\frac{\gamma}{kT}$ . При таких условиях

$\tilde{\chi} = \tilde{\alpha}$ . Значения параметров  $\tau_0$ ,  $\tilde{\chi}$  и  $(1/\tau_0)$  примем

равными:  $\tau_0 = 1000000$ ;  $\tilde{\chi} = 150$ ;  $(1/\tau_0 \tilde{\chi}) = 666666$ .

При моделировании сигналу АЭ, согласно (4), будем считать, что площадь разрушения КМ значительно меньше площади разрушения обрабатываемого материала. Обозначим ее как  $D_{km}$ . Значе-

ние  $\tilde{D}_{km}$ , по отношению к площади разрушения обрабатываемого материала, в относительных единицах примем равными: 0,001, 0,005, 0,01, 0,1, 0,5 и 1,0. Результаты проведенных расчетов сигналов АЭ в относительных единицах, согласно (2), (3) и (4), показаны на рис. 1 в виде графиков

$$\tilde{U}_D(t) = U_D(t) / u_0, \quad \tilde{U}_T(t) = U_T(t) / U_0 \quad \text{и}$$

$\tilde{U}_{km}(t) = U_{km}(t) / u_1$  для значений  $\tilde{D}_{km}$ , равных: 0,001, 0,01, 0,1 и 1,0. В табл. 1 и табл. 2 приведены результаты расчетов параметров формируемых сигналов АЭ, где приняты следующие обозначения:

$\tilde{D}_D$ ,  $\tilde{D}_T$ ,  $\tilde{D}_{km}$  – относительные объем и площади разрушения обрабатываемого и КМ материалов;

$\tilde{U}_D$ ,  $\tilde{E}_D$ ,  $\tilde{S}_D$ ,  $\tilde{\tau}_D$  – максимальная амплитуда, энер-

гия, площадь под кривой и длительность сигнала АЭ при протекании в обрабатываемом материале пластической деформации;  $\tilde{U}_T$ ,  $\tilde{E}_T$ ,  $\tilde{S}_T$ ,  $\tilde{\tau}_T$  – максимальная амплитуда, энергия, площадь под кривой и длительность сигнала АЭ при разрушении обрабатываемого материала;  $\tilde{U}_{km}$ ,  $\tilde{E}_{km}$ ,  $\tilde{S}_{km}$ ,  $\tilde{\tau}_{km}$  – максимальная амплитуда, энергия, площадь под кривой и длительность сигнала АЭ при разрушении КМ.

Результаты проведенных расчетов показывают, что для принятых начальных условий моделирования, когда величины объема и площади разрушения обрабатываемого материала в относительных единицах приняты равными единице, а площадь разрушения КМ в относительных единицах составляет 0,001, т.е. 1000 раз меньше, максимальная амплитуда формируемого сигнала АЭ для КМ (рис. 1, а) в 59,6 раза меньше амплитуды сигнала от пластической деформации и в 584,7 раза меньше амплитуды сигнала от разрушения обрабатываемо-

го материала. Энергия  $\tilde{E}_{km}$  в 1837,4 раза меньше

энергии  $\tilde{E}_D$  и в 163320,5 раза меньше энергии  $\tilde{E}_T$ .

Площадь  $\tilde{S}_{km}$  в 33 раза меньше площади  $\tilde{S}_D$  и в 293,1 раза меньше площади  $\tilde{S}_T$ . При этом длитель-

ность  $\tilde{\tau}_{km}$  в 1,15 раз больше длительности  $\tilde{\tau}_D$  и в

1,02 раза меньше длительности  $\tilde{\tau}_T$ . При возрастании площади разрушения КМ в 5 раз, т.е. до 0,005 (табл. 2), максимальная амплитуда формируемого

сигнала АЭ  $\tilde{U}_{km}$  в 12,0 раз меньше амплитуды  $\tilde{U}_D$

и в 116,8 раз меньше амплитуды  $\tilde{U}_T$ . Энергия  $\tilde{E}_{km}$

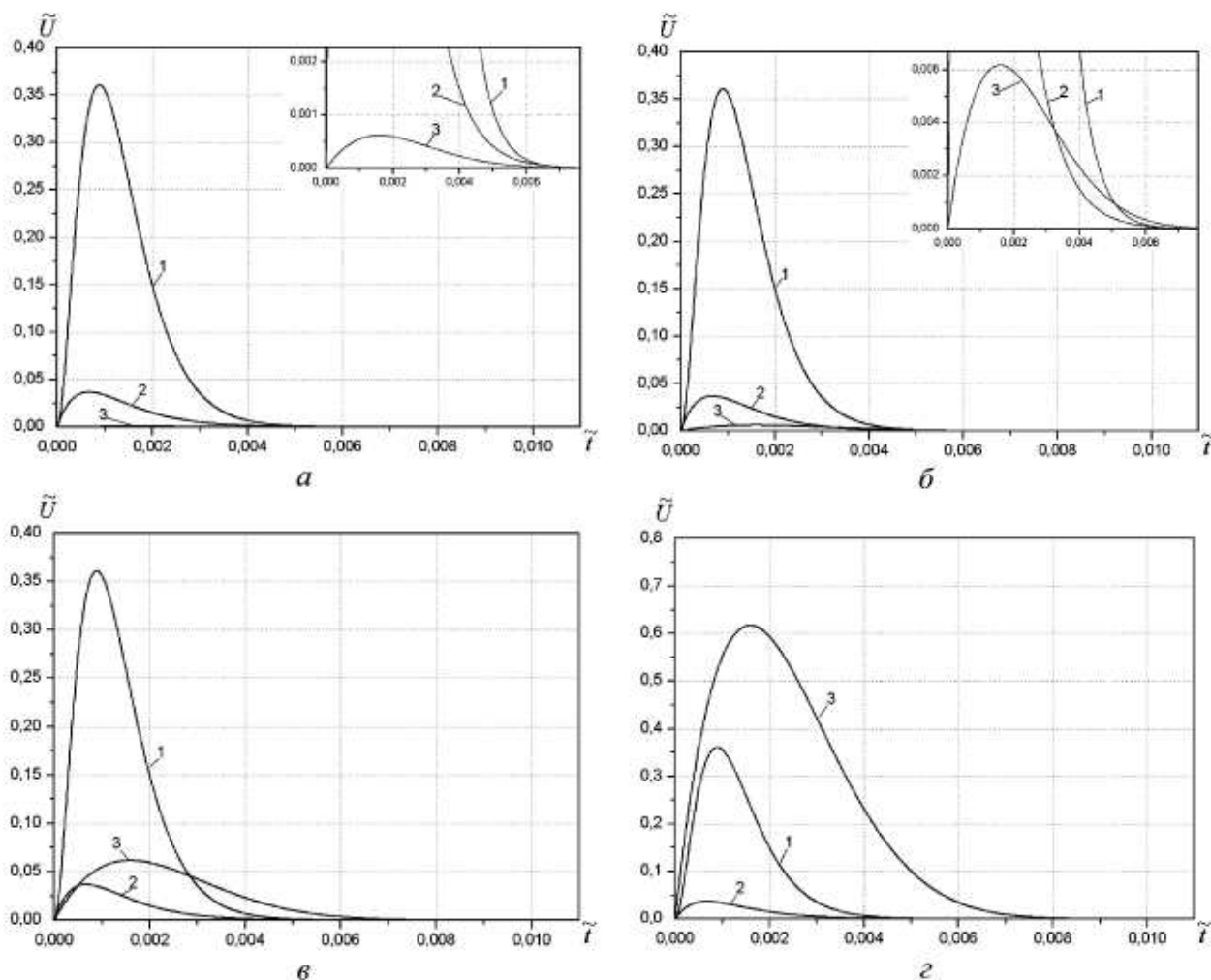
в 73,4 раза меньше  $\tilde{E}_D$  и в 6526,3 раза меньше  $\tilde{E}_T$ .

Площадь  $\tilde{S}_{km}$  в 6,6 раза меньше площади  $\tilde{S}_D$  и в 58,6 раза меньше площади  $\tilde{S}_T$ . Длительность  $\tilde{\tau}_{km}$  в

1,4 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_D$  и в 1,2 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_T$ .

При дальнейшем возрастании площади разрушения КМ наблюдается постепенное возрастание параметров формируемого сигнала АЭ. Так при

$\tilde{D}_{km} = 0,01$  максимальная амплитуда  $\tilde{U}_{km}$  в 6,0 раз



**Рисунок 1** – Сигналы АЭ при деформировании и разрушении обрабатываемого материала и разрушения КМ во времени в относительных единицах:

1 – сигнал  $U_T$  от разрушения обрабатываемого материала, согласно (3); 2 – сигнал  $U_d$  от пластической деформации обрабатываемого материала, согласно (2); 3 – сигнал  $U_{km}$  от разрушения КМ, согласно (4).

Значения параметров моделирования:  $b=15$ ;  $B=10$ ;  $\tilde{\alpha}=150$ ;  $\tau_0=1000000$ ;  $\tilde{\chi}=150$ ;  $(1/\tau_0 \tilde{\chi})=666666$ .

При моделировании сигнала АЭ 3 (рис. 1), согласно (4), считалось, что площадь разрушения КМ меньше площади разрушения обрабатываемого материала. Ее величина в относительных единицах составляла:  $a=0,001$ ;  $б=0,01$ ;  $в=0,1$ ;  $г=1$

меньше амплитуды  $\tilde{U}_D$  и в 58,5 раза меньше амплитуды  $\tilde{U}_T$  (рис. 1, б, табл. 1, табл. 2). Энергия  $\tilde{E}_{km}$  в 18,4 раза меньше энергии  $\tilde{E}_D$  и в 1633,4 раза меньше энергии  $\tilde{E}_T$ . Площадь  $\tilde{S}_{km}$  в 3,3 раза меньше площади  $\tilde{S}_D$  и в 29,3 раза меньше площади  $\tilde{S}_T$ . Длительность  $\tilde{\tau}_{km}$  в 1,5 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_D$  и в 1,3 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_T$ . При  $\tilde{D}_{km}=0,1$  максимальная амплитуда  $\tilde{U}_{km}$  уже в 1,7

раз больше амплитуды  $\tilde{U}_D$  и в 5,9 раза меньше амплитуды  $\tilde{U}_T$  (рис. 1, в, табл. 1, табл. 2). Энергия  $\tilde{E}_{km}$  в 5,4 раза больше энергии  $\tilde{E}_D$  и в 16,3 раза меньше энергии  $\tilde{E}_T$ . Площадь  $\tilde{S}_{km}$  в 3,1 раза больше площади  $\tilde{S}_D$  и в 2,9 раза меньше площади  $\tilde{S}_T$ . Длительность  $\tilde{\tau}_{km}$  в 1,73 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_D$  и в 1,5 раза больше длительности  $\tilde{\tau}_T$ .

Из полученных результатов видно, что при  $\tilde{D}_{km}=0,1$



уже наблюдается превышение параметров сигнала АЭ от разрушения КМ сигнала от пластической деформации обрабатываемого материала. Это, безусловно, будет приводить к возрастанию вклада такого сигнала в результирующий сигнал АЭ, согласно (1), который формируется при обработке материала точением. Полученные результаты так же показывают (рис. 1, табл. 2), что дальнейшее увеличение  $\tilde{D}_{km}$  до 0,5 и 1 приводит к значительному возрастанию параметров сигнала АЭ от разрушения КМ, а его вклад в результирующий сигнал АЭ, согласно (1), становится преобладающим.

Результаты такого моделирования результирующих сигналов АЭ, согласно (1), во времени в относительных единицах, показаны на рис. 2. Моделирование проводилось по сценариям формирования результирующего сигнала АЭ в процессе механической обработки материала точением, когда при деформировании и разрушении обрабатываемого материала отсутствует разрушение КМ, а так же оно сопровождается постепенным непрерывным разрушением некоторой площади КМ. Другими словами, исследовалось влияние возрастания площади разрушения КМ на результирующий сигнал АЭ. При проведении расчетов результирующего

Таблица 1

Параметры сигналов АЭ при деформировании и разрушении обрабатываемого материала в относительных единицах

$\tilde{D}_D, \tilde{D}_T$	$\tilde{U}_D$	$\tilde{E}_D$	$\tilde{S}_D$	$\tilde{\tau}_D$	$\tilde{U}_T$	$\tilde{E}_T$	$\tilde{S}_T$	$\tilde{\tau}_T$
1	0,03679	0,16667	6,6665	0,00431	0,3609	14,8148	59,2592	0,00503

Таблица 2

Параметры сигналов АЭ при разрушении композиционного материала в относительных единицах

$\tilde{D}_{km}$	$\tilde{U}_{km}$	$\tilde{E}_{km}$	$\tilde{S}_{km}$	$\tilde{\tau}_{km}$
0,001	$6,172 \cdot 10^{-4}$	$9,071 \cdot 10^{-5}$	0,2022	0,00494
0,005	0,00309	0,00227	1,0112	0,00595
0,01	0,00617	0,00907	2,0223	0,00634
0,1	0,06171	0,90704	20,2233	0,00745
0,5	0,30857	22,6761	101,1163	0,00814
1,0	0,61715	90,7044	202,2326	0,00845

Действительно, если рассматривать процесс механической обработки материалов точением, то разница параметров формируемых сигналов АЭ, которые соответствуют процессам, протекающим в обрабатываемом и КМ материалах, будет влиять на результирующий сигнал АЭ. При этом форма и параметры результирующего сигнала АЭ будут зависеть не только от параметров индивидуальных сигналов, но и условий их перекрытия во времени. Такие условия непосредственно связаны с параметрами процесса резания, которые определяются объемом обрабатываемого материала, вступающего в пластическую деформацию, и его разрушением, а так же разрушением КМ, и, безусловно, скоростью протекания данных процессов. По сути, рассматриваемые параметры формируют определенный сценарий протекания процессов деформирования и разрушения, и, как следствие, определенный сценарий формирования результирующего сигнала АЭ.

Проведем моделирование результирующего сигнала АЭ, согласно (1), для следующих сценариев развития процессов при механической обработке материала точением: отсутствие разрушения КМ ( $U_{km}(t)=0$ ); при малой площади непрерывного разрушения КМ; при мгновенном разрушении значительной площади КМ.

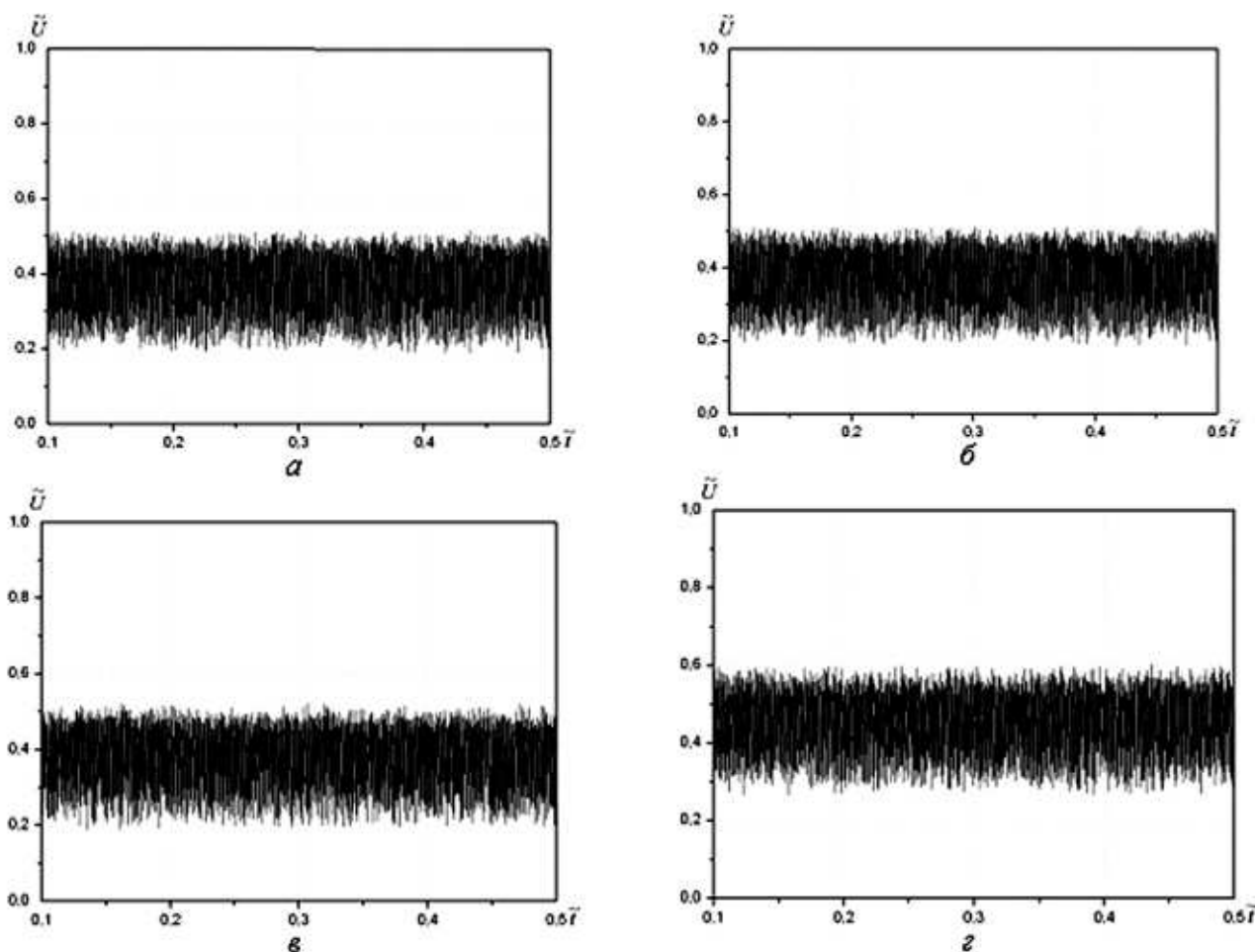
сигнала АЭ параметры, которые входят в выражения (2), (3) и (4), приведены к безразмерным величинам. Значения параметров  $b, B, \tilde{\alpha}, \tau_0, \tilde{\chi}$  и  $(1/\tau_0 \tilde{\chi})$  были приняты равными:  $b=15; B=10; \tilde{\alpha} = 150; \tau_0 = 1000000; \tilde{\chi} = 150; (1/\tau_0 \tilde{\chi}) = 666666$ .

Время представлено в относительных величинах. Промежутки времени между появлением индивидуальных сигналов  $U_d$  и  $U_T$  в относительных величинах задавались в виде  $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00175 + \tilde{\delta}$ , где значение  $\tilde{\delta}$  изменялась в диапазоне величин от 0,0 до 0,0003 произвольным образом. При этом считалось, что объем материала, вступающего в пластическую деформацию, и площадь разрушения обрабатываемого материала являются постоянными и в относительных величинах равны единице. При непрерывном разрушении КМ промежутки времени между появлениями сигналов АЭ  $U_{km}$  был принят равным

$\Delta \tilde{t}_{ii} = 0,0025 + \tilde{\delta}$ . Увеличение промежутка времени появления сигнала АЭ от разрушения КМ обуслов-

лено принятой последовательностью протекания процессов (деформирование и разрушение обрабатываемого материала и разрушение КМ), а так же тем, что длительность сигнала АЭ  $U_{km}$  практически больше длительности сигналов АЭ  $U_d$  и  $U_T$ . При моделировании площадь разрушения КМ, по отношению к площади разрушения обрабатываемого материала изменялась в диапазоне величин от 0,001 до 0,5. На рис. 2 показаны графики результирующих сигналов АЭ при условии отсутствия разрушения КМ (рис. 2, а), т.е.  $\tilde{D}_{km}=0$ , и при непрерывном разрушении КМ для значений  $\tilde{D}_{km}=0,001$  (рис. 2, б),  $\tilde{D}_{km}=0,005$  (рис. 2, в),  $\tilde{D}_{km}=0,1$  (рис. 2, г). В табл. 3 приведены результаты обработки пара-

метров результирующих сигналов АЭ в относительных величинах для значений  $\tilde{D}_{km}$ , равных: 0,0; 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5. В табл. 3 приняты следующие обозначения:  $\tilde{U}_p, \tilde{U}_{pmed}, s_{\tilde{U}}^2, s_{\tilde{U}}$  — соответственно, средний уровень и медиана амплитуды результирующего сигнала АЭ, его дисперсия и стандартное отклонение;  $\tilde{E}_p, \tilde{E}_{pmed}, s_{\tilde{E}}^2, s_{\tilde{E}}$  — соответственно, средний уровень и медиана энергии результирующего сигнала АЭ, его дисперсия и стандартное отклонение;  $\tilde{D}_{km}$  — площадь разрушения КМ.



**Рисунок 2** – Модельные сигналы АЭ, согласно (1), при деформировании и разрушении обрабатываемого материала и разрушения КМ во времени в относительных единицах. Значения параметров моделирования:

$b=15; B=10; \tilde{\alpha}=150; \tau_0=1000000; \tilde{\chi}=150; (1/\tau_0 \tilde{\chi})=666666$ . Промежутки времени появления импульсных сигналов  $U_d$  и  $U_T$  составляют

$\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00175 + \delta$ , а сигналов  $U_{km}$  —  $\Delta \tilde{t}_{ki} = 0,0025 + \delta$ . Значение  $\delta$  изменялось в диапазоне величин от 0,0 до 0,0003 произвольным образом. Объем обрабатываемого материала,

который вступает в пластическую деформацию, и площадь его разрушения в относительных величинах равны единице. При моделировании

считалось, что площадь разрушения КМ меньше площади разрушения обрабатываемого материала. Ее величина  $\tilde{D}_{km}$  в относительных единицах составляла: а — 0,0; б — 0,001; в — 0,005; г — 0,1



Параметры формируемых результирующих сигналов АЭ при деформировании и разрушении обрабатываемого материала и композиционного материала

$\tilde{D}_{km}$	$\tilde{U}_p$	$\tilde{U}_{Pmed}$	$s_{\tilde{U}}^2$	$s_{\tilde{U}}$	$\tilde{E}_p$	$\tilde{E}_{Pmed}$	$s_{\tilde{E}}^2$	$s_{\tilde{E}}$
0,0	0,37342	0,38774	0,00713	0,08441	0,14655	0,15034	0,00371	0,06094
0,001	0,37625	0,392	0,00704	0,08388	0,14858	0,15367	0,00369	0,06073
0,005	0,37998	0,3961	0,00737	0,08584	0,14988	0,15508	0,00397	0,063
0,01	0,38763	0,40145	0,00695	0,0834	0,1572	0,16116	0,00411	0,06411
0,05	0,41417	0,43013	0,00736	0,08581	0,17888	0,18501	0,00475	0,06896
0,1	0,45643	0,46927	0,00703	0,08385	0,21534	0,22021	0,00557	0,07466
0,5	0,78232	0,79024	0,00928	0,09634	0,62129	0,62448	0,14815	0,3849

Результаты моделирования показывают, что при отсутствии и наличии разрушения КМ в процессе механической обработки материалов точением результирующие сигналы АЭ, согласно (1), представляют собой непрерывные сигналы (рис. 2). Они имеют сильно изрезанную форму. Формируемые сигналы АЭ характеризуются некоторым средним уровнем амплитуды (энергии) и величиной его разброса. При этом с возрастанием площади разрушения КМ происходит возрастание амплитуды и энергии результирующего сигнала АЭ (рис. 3, рис. 4). Как показывает анализ полученных данных, зависимости изменения средних уровней амплитуды и энергии результирующих сигналов АЭ при возрастании  $\tilde{D}_{km}$  хорошо описываются линейными функциями вида

$$\tilde{R}_A = d + z\tilde{D}_{km}, \quad (5)$$

где  $\tilde{R}_A$  – анализируемый параметр АЭ (средний уровень амплитуды или энергии);  $d, z$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Коэффициенты  $d$  и  $z$  аппроксимирующего выражения равны: для среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ –  $d = 0,37551$ ,  $z = 0,81322$ ; для среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ –  $d = 0,14054$ ,  $z = 0,95191$ . При этом зависимости среднего уровня амплитуды и энергии результирующего сигнала АЭ (рис. 3, рис. 4), согласно (5), описываются с вероятностями, соответственно,  $p = 0,9991$  и  $p = 0,99811$  с дисперсиями, соответственно, 0,00222 и 0,01169.

Однако полученные данные показывают, что импульсные сигналы АЭ при малых площадях разрушения КМ практически не вносят вклад в результирующий сигнал. Действительно, при отсут-

ствии разрушения КМ, когда  $\tilde{D}_{km} = 0$ , результирующий сигнал АЭ (рис. 2, а; табл. 3) имеет следующие

параметры:  $\tilde{U}_p = 0,37342$ ;  $\tilde{U}_{Pmed} = 0,38774$ ;  $s_{\tilde{U}}^2 = 0,00713$ ;  $s_{\tilde{U}} = 0,08441$ . Как показывает статистическая обра-

ботка данных, при непрерывном разрушении КМ с постоянной площадью, величины которых составляют  $\tilde{D}_{km} = 0,001$  и  $\tilde{D}_{km} = 0,005$ , возрастание средне-

го уровня и медианы амплитуд  $(\tilde{U}_p, \tilde{U}_{Pmed})$  сигналов АЭ не превышает 2% (рис. 2, б, в; табл. 3). Для таких площадей разрушения возрастание среднего

уровня и медианы энергии  $(\tilde{E}_p, \tilde{E}_{Pmed})$  не превы-

шают 3% (табл. 3). Другими словами, вклад сигнала АЭ  $U_{km}$  в результирующий сигнал  $U_p$  практически является не значительным. При  $\tilde{D}_{km} = 0,01$  возрастание среднего уровня и медианы амплитуд

$(\tilde{U}_p, \tilde{U}_{Pmed})$  сигналов АЭ не превышает 4%, а сред-

него уровня и медианы энергии  $(\tilde{E}_p, \tilde{E}_{Pmed})$  не

превышают 7,5% (табл. 3). Начиная с  $\tilde{D}_{km} = 0,05$ , наблюдается резкое возрастание вклада сигналов  $U_{km}$  в результирующий сигнал  $U_p$ . При  $\tilde{D}_{km} = 0,05$

значения  $\tilde{U}_p$  и  $\tilde{U}_{Pmed}$  возрастают на 11%, а значе-

ния  $\tilde{E}_p$  и  $\tilde{E}_{Pmed}$  на 23%. Если  $\tilde{D}_{km} = 0,1$  значения

$\tilde{U}_p$  и  $\tilde{U}_{Pmed}$  возрастают на 22%, а значения  $\tilde{E}_p$  и

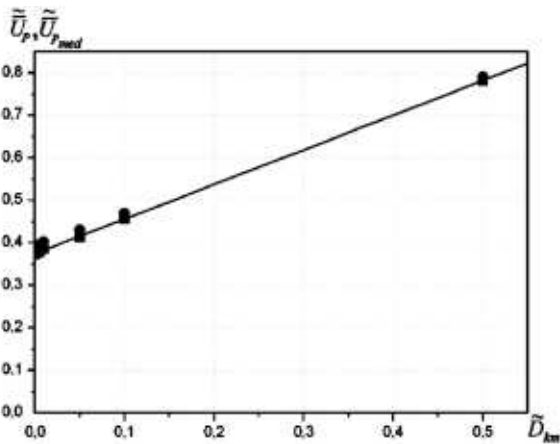
$\tilde{E}_{Pmed}$  на 46%. При  $\tilde{D}_{km} = 0,5$  значения  $\tilde{U}_p$  и  $\tilde{U}_{Pmed}$

возрастают более чем на 100%, а значения  $\tilde{E}_p$  и

$\tilde{E}_{Pmed}$  более чем на 300%. Следует отметить, что



при увеличении площади разрушения КМ наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии  $S_{\bar{E}}^2$  среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. При  $\tilde{D}_{km}=0,01$  ее величина возрастает уже на 11%, при  $\tilde{D}_{km}=0,05$  — на 28%, при  $\tilde{D}_{km}=0,1$  — на 50%, а при  $\tilde{D}_{km}=0,5$  — более чем в 3000 раз.



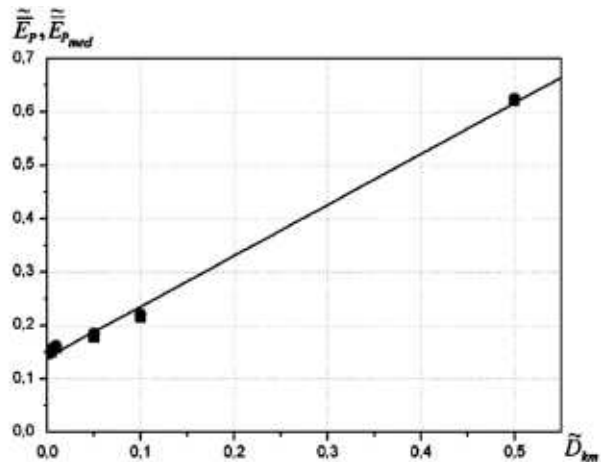
**Рисунок 3** – Зависимости изменения среднего уровня (■) и медианы в распределении (●) амплитуд результирующего сигнала АЭ от площади разрушения КМ

Согласно результатам проведенного моделирования, при увеличении площади разрушения КМ в процессе механической обработки материала точением наблюдается постепенное возрастание вклада формируемых импульсных сигналов АЭ в результирующий сигнал. При малых площадях разрушения КМ, которые не превышают 1%–1,5%, их влияние не значительно — средний уровень амплитуды возрастает не более чем на 2%–2,5%, а средний уровень энергии возрастает не более чем на 3%–4%. Если площадь разрушения КМ составляет более 1,5% и выше, то происходит резкое возрастание вклада формируемых импульсных сигналов АЭ в результирующий сигнал — средний уровень амплитуды возрастает более чем на 4% и выше десятков процентов, а средний уровень энергии возрастает более чем на 5% и выше десятков процентов.

### Выводы

Проведено моделирование сигналов АЭ, формируемых при деформировании и разрушении обрабатываемого и обрабатывающего материала. В относительных единицах определены параметры сигналов АЭ (амплитуда, энергия, длительность, площадь под огибающей), формируемых при постоянном объеме материала, вступающего в

пластическую деформацию, и постоянной величины площади его разрушения и проведено их сравнение с параметрами сигналов АЭ, формируемых при разрушении КМ. Показано, что при малых площадях разрушения КМ, которые не превышают 1%–1,5% от площади разрушения обрабатываемого материала, параметры формируемых сигналов АЭ в единицы и десятки раз меньше параметров сигналов, формируемых при деформировании и разрушении обрабатываемого материала. Однако дли-



**Рисунок 4** – Зависимости изменения среднего уровня (■) и медианы в распределении (●) энергии результирующего сигнала АЭ от площади разрушения КМ

тельность сигнала АЭ от разрушения КМ больше длительности сигналов от деформирования и разрушения обрабатываемого материала. При больших площадях разрушения КМ происходит резкое возрастание параметров сигналов АЭ от данного процесса, что, безусловно, будет приводить к возрастанию вклада таких сигналов в результирующий сигнал АЭ, формируется при обработке материала точением.

Проведено моделирование результирующих сигналов АЭ при механической обработке материалов точением. Полученные результаты показали, что при отсутствии и наличии разрушения КМ в процессе механической обработки материалов точением результирующие сигналы АЭ представляют собой непрерывные сигналы. Они имеют сильно изрезанную форму. Формируемые сигналы АЭ характеризуются некоторым средним уровнем амплитуды (энергии) и величиной его разброса. При увеличении площади разрушения КМ в процессе механической обработки материала точением наблюдается постепенное возрастание вклада формируемых импульсных сигналов АЭ в результирующий сигнал. При малых площадях разрушения КМ, которые не превышают 1%–1,5%, их влияние не значительно — средний уровень амплитуды возрастает не более чем на 2%–2,5%, а средний



уровень энергии возрастает не более чем на 3%–4%. Если площадь разрушения КМ составляет более 1,5% и выше, то происходит резкое возрастание вклада формируемых импульсных сигналов АЭ в результирующий сигнал – средний уровень амплитуды возрастает более чем на 4% и выше десятков процентов, а средний уровень энергии возрастает более чем на 5% и выше десятков процентов.

### Литература

1. *Lan M.S.* In-process tool fracture detection / M.S. Lan, D.A. Dornfeld // *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME.* – 1984. – V. 106. – P. 111–118.
2. *Keraita J. N.* Lathe stability charts via acoustic emission monitoring / J. N. Keraita, H. J. Oyango, G. K. Misoi // *African Journal of Science and Technology. Science and Engineering Series.* – 2001. – V. 2. – No.2. – P. 81–93.
3. *Haili W.* On-line tool breakage monitoring in turning / W. Haili, S. Hua, C. Ming, H. Dejin // *J. Mater. Technol.* – 2003. – V. 139. – P. 237–242.
4. *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.
5. *Uehara K.* Identification of chip formation mechanism through acoustic emission measurements / K. Uehara, Y. Kanda // *Ann. CIRP.* – 1984. – V. 33. – P. 71–74.
6. *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.
7. *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.
8. *Farrelly F. A.* Statistical properties of acoustic emission signals from metal cutting processes / F. A. Farrelly, A. Petri, L. Pitolli, G. Pontualeb, A. Tagliani, P. L. Novi Inverardi // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 2004. – V. 116. – No. 2. – P. 981–986.
9. *Polito F.* Analysis of metal cutting acoustic emissions by time series models / F. Polito, A. Petri, G. Pontuale, F. Dalton // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2010. – V. 48. – P. 897–903.
10. *Kannatey-Asibu E. J.* Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting / E. J. Kannatey-Asibu, D.A. Dornfeld // *ASME J. of Eng. for Indu.* – 1981. – V. 103. – P. 330–340.
11. *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.
12. *Аршинов В.А.* Резание металлов и режущий инструмент. – М: Машиностроение, 1976. – 400 с.
13. *Филоненко С.Ф.* Акустична емісія при механічній обробці матеріалів точінням / С.Ф. Филоненко, Т.В. Німченко // *Технологические системы.* – 2011. – № 3 (56). – С. 50–56.
14. *Филоненко С.Ф.* Акустическая эмиссия при изменении скорости обработки материалов точением / С.Ф. Филоненко, Т.В. Немченко, Т.Н. Косицкая // *Технологические системы.* – 2011. – № 4 (57). – С. 80–88.
15. *Li X.* A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning / X. Li // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture.* – 2002. – № 42. – P. 157–165.
16. *Ren Q.* Application of Type-2 fuzzy estimation on uncertainty in machining: An approach on acoustic emission during turning process / Q. Ren, L. Baron, M. Balazinski // *NAFIPS 2009: Fuzzy Information Processing Society. Annual Meeting of the North American (14–17 June 2009, Cincinnati, OH, USA).* – P. 1–6.
17. *Zagbani I.* Evaluation of sustainability of mould steels based on machinability data / I. Zagbani, V. Songmene and G. Kientzy // *Int. J. Machining and Machinability of Materials.* – 2010. – V. 7. – No. 1–2. – P. 58–81.
18. *Филоненко С.Ф.* Модель формирования сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов / С.Ф. Филоненко, В.М. Калита, Т.В. Немченко // *Технологические системы.* – 2009. – № 2 (46). – С. 17–25.