



Филоненко С. Ф., Нимченко Т. В., Косицкая Т. Н.  
 Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ТОЧЕНИЕМ

### Анотація

*Розглянуто результати розрахунків параметрів результуючих сигналів акустичної емісії в залежності від швидкості різання при механічній обробці матеріалів точінням. Показано, що із зростанням швидкості різання повинно відбуватися зростання середнього рівня амплітуд результуючих сигналів акустичної емісії, а також величин їх стандартного та середньоквадратичного відхилення. Визначено, що найбільш чутливим параметром є середньоквадратичне відхилення амплітуд результуючих сигналів акустичної емісії. Показано, що результати обробки параметрів реальних сигналів акустичної емісії, які реєструються при виконанні операції точіння матеріалів, мають добре узгодження з даними теоретичного моделювання результуючих сигналів акустичної емісії.*

### Abstract

*The calculation parameters of acoustic emission resulting signals from velocity function of cutting at machine work of materials are reviewed. Is shown, that to ascending a cutting speed there should be an increase the average level of acoustic emission resulting signals amplitudes, and as values their standard and root-mean-square deviations. Is determined, that most sensing parameter is the root-mean-square deviation of acoustic emission resulting signals amplitudes. Is shown, that the processing parameters of actual acoustic emission signals, that registered at fulfilment of materials cutting operation, have the good coordination with the data of idealized simulation of acoustic emission resulting signals.*

### Постановка проблеми

Для разработки методов диагностики и мониторинга процессов резания при механической обработке материалов точением проводятся интенсивные исследования с изучением явления акустической эмиссии (АЭ). Такие исследования основаны на том, что АЭ имеет прямую связь с микромеханикой процессов резания. При этом акустическое излучение формируется в диапазоне частот от 100 кГц до 1500 кГц и 2000 кГц, что позволяет фильтровать низкочастотные шумы, создаваемые работающим оборудованием.

Это обеспечивает достоверность регистрируемой информации, которая отражает процессы, протекающие в материалах при резании.

Проводимые исследования связано с двумя основными областями приложения АЭ в процессах резания: контроль и диагностика состояния инструмента; контроль процесса резания и стружкообразования. Первое из них, направлено на выявление критического износа инструмента, а так же его повреждения, т. е. растрескивания, скалывания и разрушения. Вторая область приложения связана с выявлением (контролем) различных типов стружкообразования в процессе резания, а так же обнаружение нежелательного запутывания или закручивания стружки.

Результаты экспериментальных исследований показывают чувствительность метода АЭ к изменению внешних факторов — физико-механических характеристик обрабатываемых материалов и параметров режимов резания. Это легло в основу поиска закономерностей изменения акустического излучения, которые зачастую противоречат друг другу, и требуют теоретического обоснования. Однако в теоретических исследованиях и, соответствующих, описаниях полученных закономерностей, не учитываются физические основы формирования акустического излучения, которое является следствием протекания физико-механических процессов в структуре материалов при их нагружении. Различие данных процессов связано не только с условиями деформирования и разрушения материалов, но и их физико-механическими характеристиками, а так же спецификой их строения (материалы с традиционной структурой, композиционные материалы). Безусловно, что такие исследования позволят значительно сократить объем экспериментов, обосновывать закономерности изменения акустического излучения при резании материалов, а так же разрабатывать достоверные методы контроля и диагностики, как инструмента, так и самого процесса резания.

### Анализ последних исследований и публикаций

В исследованиях АЭ при резании материалов, как и при статическом их нагружении, считается, что формируется два типа акустического излучения: так называемая взрывная АЭ и непрерывная АЭ [1–5] (дискретная и непрерывная АЭ). Данные два типа акустического излучения связывают с процессами

разрушения и пластической деформации, что обосновываются значительными различиями в энергиях регистрируемых сигналов АЭ. Такие подходы легли в основу представлений об источниках акустического излучения [6–9] при резании материалов. В тоже время, непрерывность физико-механических процессов, протекающих в зоне резания материалов, как показывают экспериментальные исследования, приводит к формированию непрерывного акустического излучения [10–12]. Полученные результаты показывают, что результирующий сигнал АЭ имеет сильно изрезанную форму, характеризуется некоторым средним уровнем амплитуды и значительной величиной ее разброса. Такой результирующий сигнал АЭ, согласно работам [13, 14], можно представить как сумму импульсных сигналов, формируемых при протекании различных физико-механических процессов в структуре материалов

$$U(t) = \sum_i^n A_i F_i(t-t_i), \quad (1)$$

где  $A_i$  — амплитуда импульса, который появляется в момент времени  $t_i$ ;  $F_i$  — характеристика формы одиночного импульса;  $n$  — количество сформированных импульсов.

При этом считается, что форма импульсных сигналов АЭ известна и не измена. В стохастической модели, согласно (1), предполагается, что импульсные сигналы описываются экспоненциальными функциями. Например, в работе [15], это выражение имеет вид

$$F(t) = \sum_{k=1}^m e^{-t/\tau_k} \sin(2\pi f_k t), \text{ при } t \geq 0, \text{ и } 0 \text{ при } t < 0, \quad (2)$$

где  $f_k$  — резонансная частота датчика;  $\tau_k$  — характеристика времени затухания.

В [16] такой сигнал описывается выражением вида

$$F(t) = a_0 e^{-\beta t}, \quad (3)$$

где  $a_0$  — начальная амплитуда;  $\beta$  — коэффициент затухания.

Однако параметры импульсного сигнала АЭ, как видно из (2) и (3), не имеют связи ни с физико-механическими характеристиками материалов, ни с параметрами процессов, которые порождают АЭ. Поэтому, согласно принятым условиям, предполагается определение некоторого количества статистических характеристик, которые могут нести информацию о процессах, развивающихся в материалах. Такие характеристики исследуются и при резании материалов [1, 4, 17–20]: распределение плотности вероятности усредненных и среднеквадратических значений амплитуд результирующего сигнала АЭ; функции их распределения; стандартные и среднеквадратические отклонения; коэффициенты асимметрии; эксцессы и другие моменты

разных порядков; энтропию процессов; Вейвлет коэффициенты и другие параметры. Переход к стохастическим параметрам анализируемого процесса обусловлен тем, что модели, описывающие закономерности изменения акустического излучения при резании, как правило, изменение среднеквадратического значения амплитуды [21, 22] (root-mean-square-RMS), не всегда имеют согласование с экспериментальными результатами [6]. Следует отметить, что как в случае стохастических моделей, так и в случае моделей, описывающих АЭ при резании, отсутствует прямая связь (параметры) с физико-механическими процессами, происходящими в зоне резания, которые формируют акустическое излучение. Другими словами, не рассматривается процесс формирования сигналов АЭ.

Основываясь на том, что согласно существующим представлениям [23], основными процессами, протекающими при резании, являются последовательные процессы пластического деформирования и разрушения материалов, т.е. процессы, которые являются источниками акустического излучения [3], в работе [24] рассмотрена модель результирующего сигнала АЭ в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_d(t-t_j) + \sum_i U_T(t-t_i), \quad (4)$$

где  $t_j, t_i$  — моменты времени появления сигналов АЭ при протекании пластической деформации в определенном объеме и разрушении определенной площади материала, соответственно,  $U_d$  и  $U_T$ .

На основе существующих представлений о процессах развивающихся в материалах при их деформировании, а так же кинетики их протекания в работе [25] получены математические выражения для сигналов АЭ  $U_d$  и  $U_T$  в виде

$$U_D(t) = u_0 \alpha t \exp(-B\alpha t), \quad (5)$$

$$U_T(t) = U_0 \alpha^3 t^2 \exp(-b\alpha t), \quad (6)$$

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

одиночного импульса возмущения, формируемого одиночной подвижной дислокацией;  $\delta_D$  — средняя длительность одиночного импульса возмущения;  $v_D$  — 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);  $U_0 = N_0 c k$ ;  $N_0$  — общее число разрушаемых микрообъемов в определенной площади;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $c, b$  — коэффициенты, зависящие от физико-механических характеристик материала по прочности (характери-



зуют распределение разрушаемых элементарных объемов по прочности).

В работе [24] было проведено моделирование результирующих сигналов АЭ при изменении объема материала, вступающего в пластическую деформацию, и площади разрушения, т. е. при изменении глубины резания, постоянстве физико-механических характеристик обрабатываемого материала, а так же скорости вращения обрабатываемой детали и скорости продольной подачи. Полученные результаты показали, что результирующий сигнал АЭ, формируемый при резании, представляет собой непрерывный сигнал с сильно изрезанной формой. Он характеризуется некоторым средним уровнем амплитуды и величиной ее разброса. При возрастании объема материала, вступающего в пластическую деформацию, и площади разрушения происходит возрастание среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ и величин их разброса (величин дисперсии и стандартного отклонения). Так же показано, что результаты проведенного моделирования имеют хорошее согласование с экспериментальными данными, полученными при точении алюминиевого сплава АЛ-25. В тоже время, выражение (4), описывающее результирующий сигнал АЭ при резании, позволяет исследовать влияние и других параметров на закономерности изменения формируемого акустического излучения.

### Задачи исследований

В работе будет проведено моделирование результирующих сигналов АЭ, формируемых при обработке материала точением, в зависимости от скорости вращения детали (скорости резания). Будет показано, что результирующий сигнал АЭ является непрерывным сигналом с некоторым средним значением амплитуды и величиной ее разброса. Так же будет показано, что возрастание скорости резания приводит к возрастанию среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины ее разброса. Данные параметры возрастают по линейному закону. Однако более значительные изменения наблюдаются в изменении дисперсии амплитуд результирующих сигналов АЭ. Будет показано, что теоретические результаты имеют хорошее согласование с данными экспериментальных исследований.

### Результаты исследований

В работе [24], при моделировании акустического излучения, возникающего в процессе резания, согласно (4), считалось, что результирующий сигнал АЭ формируется при последовательном деформировании определенного объема и разрушении определенной площади материала. При этом было отмечено, что изрезанность формы результирующих сигналов

АЭ и величина разброса (дисперсия) их амплитуд определяются условиями перекрытия импульсных сигналов во времени, которые возникают от последовательно протекающих процессов.

Моделирование в [24] проводилось при постоянной скорости деформирования и разрушения материала (постоянной скорости резания). Поэтому условия перекрытия последовательно появляющихся импульсных сигналов АЭ сохранялись неизменными. Однако возрастание скорости резания материала будет оказывать следующее влияние. С одной стороны, будет происходить уменьшение промежутков времени появления импульсных сигналов АЭ от пластической деформации и разрушения при формировании результирующего сигнала, согласно (4). С другой стороны, будет происходить изменение, как амплитудных, так и временных параметров импульсных сигналов АЭ, в соответствии с (5) и (6).

Были проведены расчеты сигналов АЭ при протекании пластической деформации и разрушении в виде зависимостей  $\tilde{U}_D(t) = U_D(t)/u_0$  и  $\tilde{U}_T(t) = U_T(t)/U_0$  в относительных единицах при следующих условиях. Параметры, входящие в выражения (5) и (6) были приведены к безразмерным величинам. При этом параметры  $b$  и  $B$  приняты равными:  $b = 15$ ;  $B = 10$ . Значение  $\alpha$  изменялось в диапазоне величин от 100 до 250 с шагом приращения 50. Результаты проведенных расчетов параметров импульсных для сигнала АЭ от пластической деформации, согласно (5), и разрушении, согласно (6), в относительных единицах приведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения:  $\tilde{\tau}_{0D}$ ,  $\tilde{\tau}_D$ ,  $\tilde{U}_{mD}$  — длительность переднего фронта, длительность и максимальная амплитуда для сигнала АЭ при протекании пластической деформации;  $\tilde{\tau}_{0T}$ ,  $\tilde{\tau}_T$ ,  $\tilde{U}_{mT}$  — длительность переднего фронта, длительность и максимальная амплитуда для сигнала АЭ при разрушении.

Будем рассматривать изменение параметров сигналов АЭ по отношению к значению  $\alpha = 100$ . Так для пластической деформации при возрастании  $\alpha$  в 1,5 раза ( $\alpha = 150$ )  $\tilde{\tau}_{0D}$  и  $\tilde{\tau}_D$  уменьшаются, соответственно, в 1,45 раза и 1,5 раза. Увеличение  $\alpha$  в 2 раза приводит к уменьшению данных параметров в 2 раза, а при увеличении  $\alpha$  в 2,5 раза — соответственно, в 2,52 раза и 2,5 раза. Однако амплитуда  $\tilde{U}_{0D}$  сигнала АЭ остается неизменной, что обусловлено тем, что количество (плотность) подвижных дислокаций для заданного объема материала остается постоянной величиной. При разрушении возрастание  $\alpha$  в 1,5 приводит к уменьшению  $\tilde{\tau}_{0T}$  и  $\tilde{\tau}_T$ , соответственно, в 1,5 раза и 1,43 раза. Увеличение  $\alpha$  в 2 раза приводит к уменьшению данных параметров в 2 раза и 1,86 раза, а при увеличении  $\alpha$  в 2,5 раза — соответственно, в 2,46 раза и 2,27. При этом происходит возрастание амплитуды сигнала АЭ, соответственно, в 1,5 раза, 2 раза и 2,5 раза. Возрастание амплитуды сигнала АЭ при разрушении обусловлено увеличением количе-

Параметры импульсных сигналов АЭ при изменении значения  $\alpha$

$\alpha$	$\bar{\tau}_{0D}$	$\bar{\tau}_D$	$\bar{U}_{mD}$	$\bar{\tau}_{0T}$	$\bar{\tau}_T$	$\bar{U}_{mT}$
100	0,001	0,006480	0,03679	0,001341	0,007262	0,2406
150	0,00069	0,004331	0,03679	0,0008991	0,005061	0,36085
200	0,0005018	0,003242	0,03679	0,0006691	0,003912	0,4812
250	0,0003973	0,002591	0,03679	0,0005436	0,003200	0,6013

ства элементов с заданной прочностью, разрушаемых в единицу времени (увеличением скорости разрушения).

Такое изменение параметров импульсных сигналов АЭ, при возрастании скорости деформирования и разрушения, с учетом уменьшения времени на протекание процессов пластической деформации и разрушения, безусловно, должно приводить к изменению условий перекрытия импульсных сигналов. В следствие этого, должно происходить и изменение параметров результирующего сигнала АЭ. На рис. 1 показаны результаты моделирования влияния условий перекрытия импульсных сигналов АЭ на результирующий сигнал, согласно (4). При моделировании параметры, входящие в выражения (5) и (6), приведены к безразмерным величинам, а время представлено в относительных единицах.

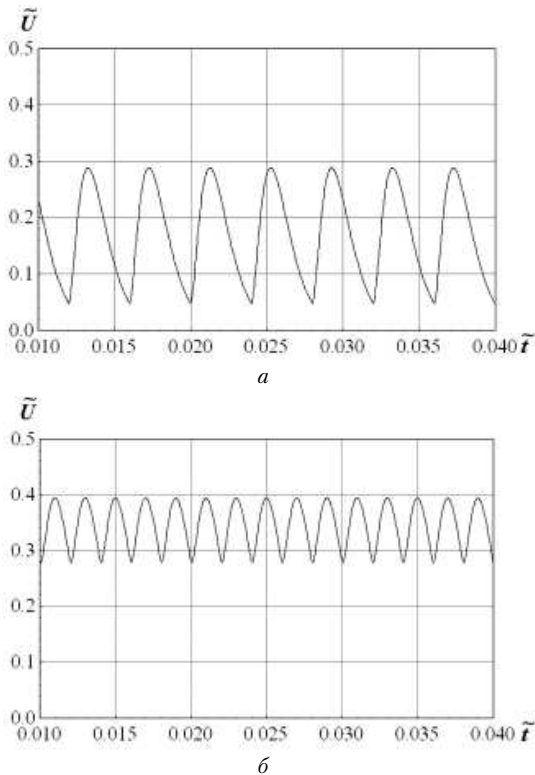


Рис. 1. Влияние условий перекрытия импульсных сигналов АЭ на результирующий сигнал, согласно (4).

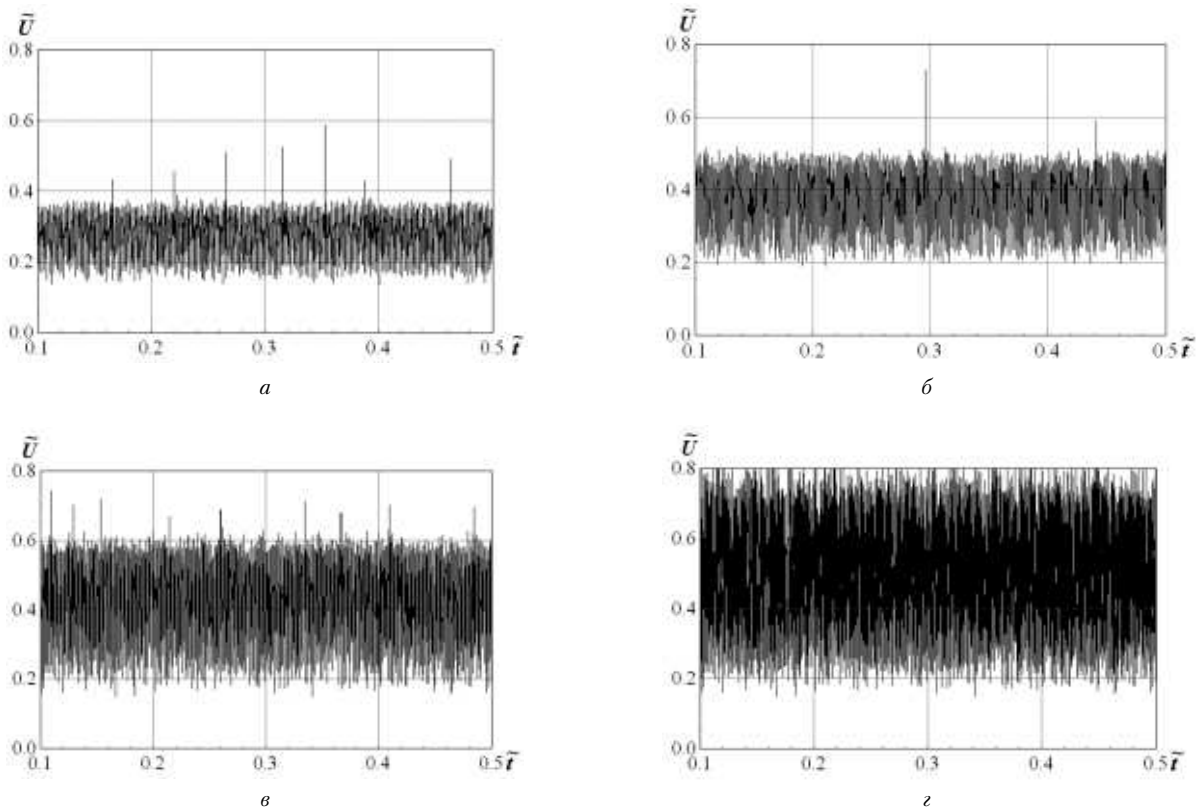
Параметры моделирования:  $\alpha = 100$ ;  $b = 15$ ;  $B = 10$ .  
 Промежуток времени последовательного появления импульсных сигналов АЭ в относительных единицах:  
 $a - \Delta\tilde{t}_{ij} = 0,004$ ;  $b - \Delta\tilde{t}_{ij} = 0,002$

Значения параметров  $b, B$  и  $\alpha$  были приняты равными:  $b = 15$ ;  $B = 10$ ;  $\alpha = 100$ . Промежутки времени  $\Delta\tilde{t}_{ij}$  между последовательным появлением импульсных сигналов АЭ, согласно (5) и (6) в относительных единицах составляли: для рис. 1,  $a - \Delta\tilde{t}_{ij} = 0,004$ ; для рис. 1,  $b - \Delta\tilde{t}_{ij} = 0,002$ . При этом считалось, что деформируется единичный объем материала и разрушается единичная площадь.

Из полученных результатов видно, что для заданной и неизменной скорости деформирования и разрушения материала изменение времени появления импульсных сигналов АЭ приводит к изменению условий их перекрытия во времени, и, как следствие, к изменению параметров результирующего сигнала АЭ. Безусловно, что с изменением скорости деформирования и разрушения будут изменяться условия перекрытия импульсных сигналов, что связано не только с изменением интервалов времени появления импульсных сигналов, но и с изменением параметров самих сигналов (табл. 1).

Проведем моделирование результирующих сигналов АЭ, согласно (4), в относительных единицах в зависимости скорости резания материала (скорости деформирования и разрушения) при следующих условиях. Параметры, входящие в выражения (5) и (6) приведем к безразмерным величинам. При этом параметры  $b$  и  $B$  примем равными:  $b = 15$ ;  $B = 10$ . Значение  $\alpha$  будем изменять в диапазоне величин от 100 до 250 с шагом приращения 50. Так же будем считать, что деформируется единичный объем и разрушается единичная площадь материала, т. е. скорость продольной подачи и глубина резания, от которых зависит объем деформируемого материала и площадь разрушения, являются постоянными величинами.

Безусловно, что при резании материала на длительность протекания последовательных процессов пластической деформации и разрушения во времени, кроме скорости резания, будет оказывать влияние и дисперсность свойств обрабатываемого материала. Поэтому промежутки времени  $\Delta\tilde{t}_{ij}$  между последовательным появлением импульсных сигналов АЭ будем задавать в виде  $\Delta\tilde{t}_{ij} = \Delta T_{ij} + \delta$ , где  $\Delta T_{ij}$  — основной интервал времени между появлением сигналов АЭ  $\tilde{U}_D(t)$  и  $\tilde{U}_T(t)$ ;  $\delta$  — случайная величина изменения интервала времени, обусловленная дисперсностью физико-механических свойств обрабатываемого



**Рис. 2.** Результирующие сигналы АЭ, согласно (4), формируемые при изменении скорости резания материала. Параметры моделирования:  $b = 15$ ;  $B = 10$ . Значения  $\alpha$  и интервалов времени  $\Delta \tilde{t}_{ij}$  между появлениями сигналов АЭ от пластической деформации и разрушения:  $a - \alpha = 100$ ,  $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00225 + \delta$ ;  $б - \alpha = 150$ ,  $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00175 + \delta$ ;  $в - \alpha = 200$ ,  $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,0015 + \delta$ ;  $г - \alpha = 250$ ,  $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,001125 + \delta$ . Величина  $\delta$  изменяется в диапазоне значений от 0 до 0,0003 случайным образом

мого материала. При моделировании результирующих сигналов АЭ были приняты следующие значения интервалов времени в относительных единицах: для  $\alpha = 100 - \Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00225 + \delta$ ; для  $\alpha = 150 - \Delta \tilde{t}_{ij} = 0,00175 + \delta$ ; для  $\alpha = 200 - \Delta \tilde{t}_{ij} = 0,0015 + \delta$ ; для  $\alpha = 250 - \Delta \tilde{t}_{ij} = 0,001125 + \delta$ . При этом величина  $\delta$  была на порядок меньше основного интервала и изменялась в диапазоне величин 0 до 0,0003 случайным образом.

Результаты проведенного моделирования показаны на рис. 2. Из рис. 2 видно, что с возрастанием скорости нагружения характер изменения результирующих сигналов АЭ сохраняется. Они представляют собой непрерывные сигналы с сильно изрезанной формой. При этом наблюдается возрастание среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ и величин их разброса. Статистический анализ результатов проведенных расчетов, согласно (4) показал, что распределение амплитуд результирующих сигналов АЭ на заданной длине выборки с вероятностью 0,95 подчиняется нормальному закону. Число анализируемых амплитуд на длине выборки составляло 4000. Типичное распределение амплитуд результирующего сигнала АЭ в относительных единицах и функция распределения, полученные при значении  $\alpha = 150$ , показаны на рис. 3.

Статистический анализ данных, проведенный для всех значений  $\alpha$ , показал следующее. При  $\alpha = 100$  амплитуда медианы  $\tilde{U}_{m100}$  в распределении, стандартное отклонение амплитуд  $\tilde{s}_{100}$  и среднеквадратическое отклонение (дисперсия)  $\tilde{s}_{100}^2$  амплитуд, соответственно, составляют:  $\tilde{U}_{m100} = 0,31588$ ;  $\tilde{s}_{100} = 0,05143$ ;  $\tilde{s}_{100}^2 = 0,002645$ . При возрастании  $\alpha$  в 1,5 раза происходит возрастание  $\tilde{U}_{m150}$ ,  $\tilde{s}_{150}$  и  $\tilde{s}_{150}^2$ , соответственно, в 1,23 раза, в 2,71 раза и в 7,37 раза. Если  $\alpha$  возрастает в 2,0 раза, то значения  $\tilde{U}_{m200}$ ,  $\tilde{s}_{200}$ , и  $\tilde{s}_{200}^2$  возрастают, соответственно, в 1,55 раза, в 4,54 раза и в 20,63 раза. При возрастании  $\alpha$  в 2,5 раза наблюдается возрастание  $\tilde{U}_{m250}$ ,  $\tilde{s}_{250}$ , и  $\tilde{s}_{250}^2$ , соответственно, в 1,87 раза, в 5,9 раза и в 34,8 раза.

Результаты проведенных расчетов показывают, что с возрастанием скорости деформирования и разрушения материала резании при постоянстве других параметров резания следует ожидать возрастания среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. При этом видно, что наибольшее возрастание имеет дисперсия среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Возрастание  $\alpha$  всего в 2,5 раза приводит к возрастанию дисперсии более, чем в 30 раз. Такое возрастание дисперсии обусловлено закономерностями изменения параметров импульс-

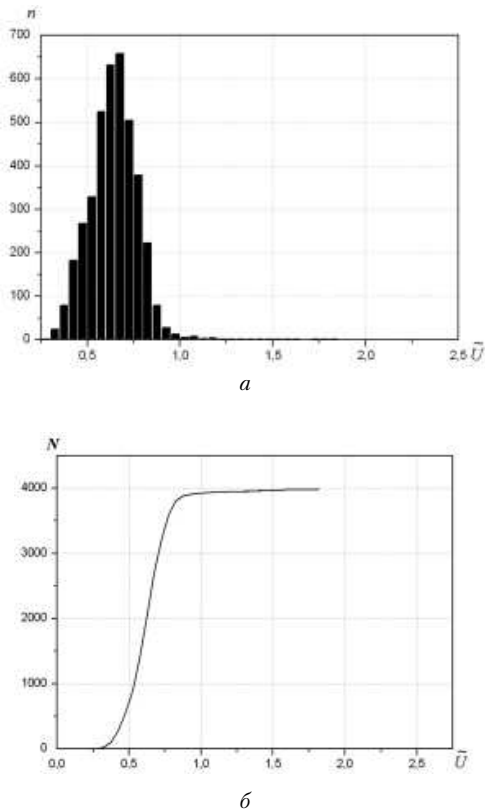


Рис. 3. Распределение (а) и функция распределения (б) расчетных амплитуд результирующего сигнала акустической эмиссии при  $\alpha = 150^\circ$  (для сигнала, показанного на рис. 2, б). Длина выборки 4000 анализируемых амплитуд

ных сигналов АЭ при увеличении скорости деформирования и разрушения материала. Как видно из табл. 1, с возрастанием  $\alpha$  происходит сжатие импульсных сигналов АЭ во времени. Однако, если при разрушении амплитуда сигнала АЭ возрастает, то при пластической деформации она остается постоянной величиной. Такое изменение параметров импульсных сигналов АЭ влияет не только на изменение условий их перекрытия во времени, но и на формирование нижнего и верхнего уровней амплитуды результирующего сигнала АЭ — не значительный рост нижнего уровня амплитуды и значительное возрастание верхнего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ.

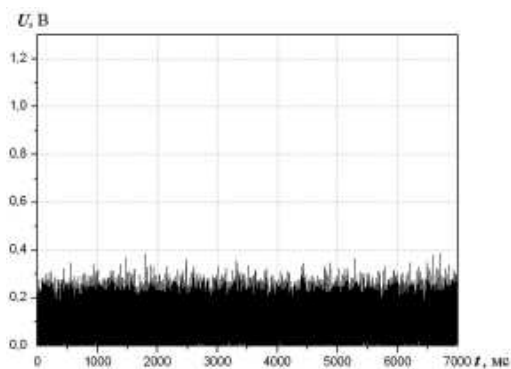
Экспериментальные исследования закономерностей изменения параметров акустического излучения проводили при точении алюминия марки АЛ25. При этом использовались следующие параметры резания: глубина резания  $h = 0,1$  мм; продольная подача  $S = 0,1$  мм/об. Скорость резания изменялась в диапазоне величин от 100 мм/мин до 500 мм/мин с шагом приращения 100 м/мин. Обработку заготовки из алюминия АЛ25 проводили на токарном винторезном станке типа ТПК-125 ВН. В качестве резца использовали алмазно-твердосплавную пластину (АТП), которая имела следующие размеры: диаметр 7,5 мм;

толщина 3,18 мм. Углы  $\alpha$  и  $\gamma$  составляли:  $\alpha = 11^\circ$ ;  $\gamma = 0^\circ$ . Толщина алмазоносного слоя 0,8 мм, зернистость 60/40, связка — кобальт. Начальный диаметр заготовки составлял  $D = 75$  мм

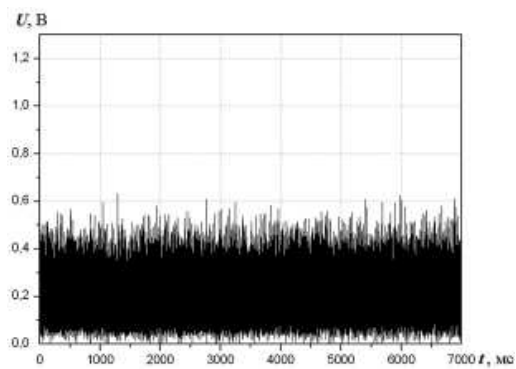
На рис. 4 показаны результирующие сигналы АЭ, зарегистрированные при проведении экспериментов. Результаты проведенных исследований показали, что, как и ожидалось при моделировании, с возрастанием скорости резания характер изменения реальных результирующих сигналов АЭ сохраняется. Они представляют собой непрерывные сигналы с сильно изрезанной формой. При этом наблюдается возрастание среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ и величин их разброса. Статистический анализ полученных данных показал, что распределение амплитуд экспериментальных результирующих сигналов АЭ на заданной длине выборки с вероятностью 0,95 подчиняется нормальному закону. Число анализируемых амплитуд на длине выборки составляло  $10^6$ . Типичное распределение амплитуд результирующего сигнала АЭ в относительных единицах и функция распределения, полученных при скорости резания  $v = 200$  мм/мин, показаны на рис. 5.

Статистический анализ экспериментальных данных, проведенный для всех значений скорости резания, показал следующее. При скорости резания  $v = 200$  мм/мин амплитуда медианы  $U_{m100}$  в распределении, стандартное отклонение амплитуд  $s_{100}$  и среднеквадратическое отклонение (дисперсия)  $s_{100}^2$  амплитуд, соответственно, составляют:  $U_{m100} = 0,1123$  В;  $s_{100} = 0,04456$  В;  $s_{100}^2 = 0,00199$  В<sup>2</sup>. При возрастании скорости резания в 2 раза происходит возрастание  $U_{m200}$ ,  $s_{200}$  и  $s_{200}^2$ , соответственно, в 1,84 раза, в 1,6 раза и в 2,46 раза. Если  $v$  возрастает в 3,0 раза, то значения  $U_{m300}$ ,  $s_{300}$  и  $s_{300}^2$  возрастают, соответственно, в 2,63 раза, в 2,18 раза и в 4,74 раза. При возрастании скорости резания в 4 раза наблюдается увеличение значений  $U_{m400}$ ,  $s_{400}$  и  $s_{400}^2$ , соответственно, в 3,25 раза, в 2,7 раза и в 7,29 раза. Если  $v$  возрастает в 5,0 раза, то значения  $U_{m500}$ ,  $s_{500}$  и  $s_{500}^2$  возрастают, соответственно, в 3,42 раза, в 2,87 раза и в 8,22 раза.

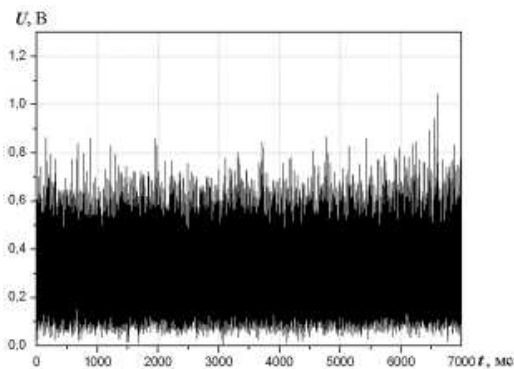
Из результатов проведенных исследований видно, что с возрастанием скорости резания материала при постоянстве глубины резания и скорости продольной подачи резца, как и ожидалось, происходит возрастание среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ, его стандартного отклонения и дисперсии. Как и в теоретических расчетах, наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии среднего уровня амплитуд результирующих сигналов АЭ. Однако данное возрастание дисперсии меньше, чем в теоретических расчетах. В тоже время, следует отметить, что ожидаемые формы результирующих сигналов АЭ, медленное возрастание нижнего уровня амплитуды результирующих сигналов, закономерности изменения их параметров при увеличении скорости



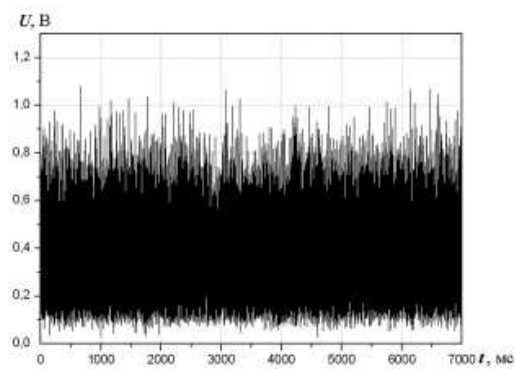
а



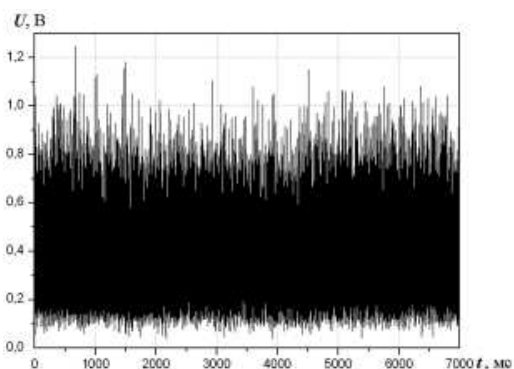
б



в

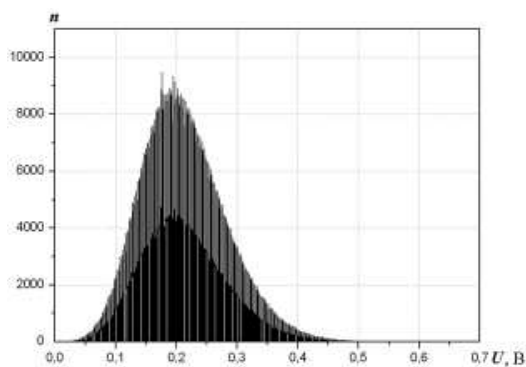


г

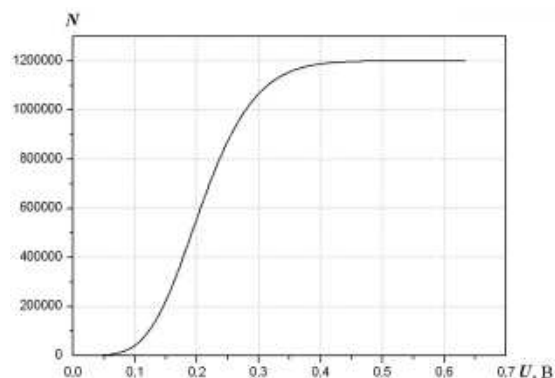


д

**Рис. 4.** Фрагменты результирующих сигналов АЭ, зарегистрированных при точении алюминия марки АЛ-25 с использованием алмазно-твердосплавного резца. Поперечная подача резца —  $S = 0,1$  мм/об, глубина резания —  $h = 0,1$  мм.  
Скорость резания: а — 100 мм/мин; б — 200 мм/мин; в — 300 мм/мин; г — 400 мм/мин; д — 500 мм/мин



а



б

**Рис. 5.** Распределение (а) и функция распределения (б) амплитуд экспериментального результирующего сигнала акустической эмиссии при скорости резания  $v = 200$  мм/мин (для сигнала, показанного на рис. 4, б). Длина выборки  $10^6$  анализируемых амплитуд

нагружения, полученные в теоретических исследованиях, имеют хорошее согласование с закономерностями изменения параметров экспериментальных сигналов АЭ, полученных при тчении алюминия АЛ25.

### Выводы

Согласно модели формирования результирующего сигнала АЭ при резании показано, что его сложная форма и параметры зависят от условий перекрытия импульсных сигналов АЭ во времени, которые возникают при последовательном протекании пластической деформации в определенном объеме материала и разрушении его определенной площади. При этом условия перекрытия импульсных сигналов АЭ непосредственно связаны со скоростью деформирования и разрушения материала. Проведено моделирование результирующих сигналов АЭ в зависимости от скорости деформирования и разрушения (скорости резания) материала с заданными физико-механическими характеристиками. Определено, что для каждой скорости деформирования и разрушения материала на длине выборки из 4000 расчетных значений амплитуд их распределения с вероятностью 0,95 описываются нормальным законом. Обработка полученных данных показала, что с увеличением скорости деформирования и разрушения материала следует ожидать возрастания значений медианы (среднего уровня амплитуды) результирующих сигналов АЭ, а так же величин ее стандартного отклонения и дисперсии. При этом определено, что наибольшее возрастание наблюдается в дисперсии амплитуд результирующего сигнала АЭ. В тоже время, нижний уровень результирующих сигналов АЭ изменяется незначительно. Такое возрастание дисперсии обусловлено закономерностями изменения параметров импульсных сигналов АЭ при увеличении скорости деформирования и разрушения материала — сжатие импульсных сигналов АЭ во времени, возрастание амплитуды при разрушении и постоянство амплитуды от пластической деформации. Аналогичные закономерности изменения акустического излучения и параметров экспериментальных результирующих сигналов АЭ установлены при тчении алюминия АЛ25. В тоже время, интерес представляют исследования акустического излучения при износе режущего инструмента в процессе механической обработки материалов тчением.

### Литература

1. Pontuale G. A statistical analysis of acoustic emission signals for tool condition monitoring (TCM) / G. Pontuale, F. A. Farrelly, A. Petri, and L. Pitolli // Acoust. Res. Lett. Online. — 2003. — v. 4. — № 1. — P. 13–18.
2. Chen X. Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis / X. Chen, B. Li // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2007. — v. 33. — № 9–10. — P. 968–976.
3. 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.
4. Zhou J. H. Tool Wear Monitoring Using Acoustic Emissions by Dominant-Feature Identification / J. H. Zhou, C. K. Pang, Z. W. Zhong, F. L. Lewis // IEEE transactions on instrumentation and measurement. — 2011. — V. 60. — No. 2. — P. 547–559.
5. Sundaram S. Study of Acoustic Emission Sensor Techniques for Monitoring Machining Processes / S. Sundaram, P. Senthil Kumar, N. Manoharan // J. of Engin. and Applied Sciences. — 2007. — v. 2. — No. 11. — P. 1581–1586.
6. 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.
7. Rangwala S. A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting — 1: energy analysis / S. Rangwala, D. A. Dornfeld // Int. J. Mech. Sci. — 1991. — v. 33. — P. 471–487.
8. Moriwaki T. Application of acoustic emission measurement to sensing of wear and breakage of cutting tool / T. Moriwaki // Bull. Japan Soc. Prec. Eng. — 1983. — v. 17. — P. 154–160.
9. Sundaram S. Study of flank wear in single point cutting tool using acoustic emission sensor techniques / S. Sundaram, P. Senthilkumar, A. Kumaravel, N. Manoharan // J. of Engin. and Applied Sciences. — 2008. — V. 3. — No. 4. — P. 32–36.
10. 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.
11. 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.
12. Zaghbani I. Evaluation of sustainability of mould steels based on machinability data / I. Zaghbani, V. Songmene and G. Kientzy // Int. J. Machining and Machinability of Materials. — 2010. — V. 7. — No. 1–2. — P. 58–81.
13. Ivanov V. Acoustic emission: some problems, tasks and solutions / V. Ivanov // NDT International. — 1984. — v. 17. — P. 323–328.





14. Свириденко А. И. Акустические и электрические методы в триботехнике [А. И. Свириденко, Н. К. Мышкин, Т. Ф. Калмыков, О. В. Холодилов]. — Минск: Наука и техника, 1987. — 280 с.

15. D'Attelis C. E. A bank of Kalman filters for failure detection using acoustic emission signals / C. E. D'Attelis, L. V. Perez, D. Rubio, J. E. Ruzzante // Non-destructive Testing. Elsevier Pub. — 1992. — P. 29–33.

16. Lypez Pumarega M. I. Discussion of log-normal distribution of amplitude in acoustic emission signals / M. I. Lypez Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante // J. of acoustic emission. — 1999. — v. 17. — № 1–2. — P. 61–67.

17. Jemielniak K. Tool wear monitoring based on Wavelet transform of RAW acoustic emission signal / K. Jemielniak, J. Kossakowska // Adv. in Manuf. Sci. and Technol. — 2010. — V. 34. — No. 3. — P. 5.

18. Belgassim O. Tool Failure Detection Based on Statistical Analysis of Metal Cutting Acoustic Emission Signals / O. Belgassim, K. Jemielniak // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2011. — v. 74. — P. 551–558.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. Аршинов В. А. Резание металлов и режущий инструмент. — М: Машиностр., 1976. — 400 с.

24. Філоненко С. Ф. Акустична емісія при механічній обробці матеріалів точінням / С. Ф. Філоненко, Т. В. Німченко // Технологические системы. — 2011. — № 3 (56). — С. 50–56.

25. Бабак В. П. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов / В. П. Бабак, С. Ф. Філоненко, В. М. Калита // Технологические системы. — 2002. — № 1 (12). — С. 26–34.