

УДК 621.941: 534.647

**Л. Н. Девин\*, С. В. Рычев\*\***

Институт сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

\*ldevin@ism.kiev.ua

\*\*therion66694@mail.ru

### **Экспериментальное исследование влияния инструментального материала и режимов тонкого точения на уровень сигналов акустической эмиссии**

*Исследовано влияние режимов резания на сигналы акустической эмиссии при тонком точении алюминиевых сплавов. Каждый сигнал акустической эмиссии был разделен на два участка, первый из которых преимущественно связан с образованием стружки, второй – с трением инструмента по заготовке. При исследовании использовали монокристаллы природного и синтетического алмаза, а также твердый сплав ВК6. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при алмазном точении основной сигнал акустической эмиссии излучается при образовании стружки, а при точении твердым сплавом зачастую выше доля излучаемого сигнала от трения по задней поверхности, и она зависит от режимов обработки.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, процесс трения при механической обработке, образование стружки.

#### **ВСТУПЛЕНИЕ**

Производительность токарных операций в большой степени зависит от правильности выбора режимов резания. При токарных операциях много усилий затрачивают для достижения высокой точности и контроля состояния инструментов. Поэтому развитие интеллектуального мониторинга режущего инструмента является одним из направлений увеличения эффективности современного машиностроения. Исследования последних десятилетий показали, что высокочастотные колебания (сигналы акустической эмиссии (АЭ), которые излучаются во время процесса резания, содержат информацию о процессе резания. Эффективность АЭ для анализа процесса резания и мониторинга состояния инструмента доказана многими зарубежными учеными – Р. Тети и Д. Дордфельдом [1, 2], а также российскими – В. Н. Подураевым, О. В. Кибальченко [3, 4]. Предложенные математические модели и найденные зависимости справедливы лишь для конкретных условий обработки. Например, модель с ограничениями, предложенная Дордфельдом [2], успешно описывает процесс стружкообразования на основе сигнала АЭ.

Все попытки Тети и Дордфельда моделировать и изучать процесс точения на основе сигнала АЭ были направлены на описание контактных взаимодействий в зоне стружкообразования. Однако при этом не учитывались особенности контактного трения задней грани инструмента по заготовке в процессе

резания. Данная составляющая сигнала АЭ, регистрируемого в процессе резания, существенна и отличается для различных материалов. Особенности контактного взаимодействия методом АЭ при алмазном точении изучали южнокорейские ученые Ги Хун Чой и Ги Сан Чой [5]. Их методика исследований была взята за основу данной работы.

Целью данной работы было исследование влияния инструментального материала и режимов тонкого точения на уровень сигналов акустической эмиссии. Для этого при точении алюминиевого сплава и при трении задней поверхности инструмента об обработанный материал для монокристаллических резцов из природного, синтетического алмаза, а также твердого сплава ВК6 сигналы АЭ разделяли на две части. Первая была получена при образовании стружки в процессе резания при рабочей подаче, а вторая – при отключенной подаче, только как результат трения задней поверхности инструмента с заготовкой при вращающемся шпинделе станка.

Были получены сигналы АЭ для процесса тонкого алмазного точения и выявлены существенные различия сигнала АЭ при точении инструментом, оснащенным природным и синтетическим алмазом, а также твердосплавным инструментом.

### СИГНАЛ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТОЧЕНИИ

Акустическая эмиссия, т. е. излучение материалом упругих волн напряжений, вызванных локальной перестройкой его структуры, содержит информацию про физические процессы, которые происходят при трении, деформации и разрушении материала [1]. На рис. 1 показаны источники возникновения сигналов АЭ при точении. При этом выделяют три зоны источников АЭ: первая (*I*) – зона сдвига – содержит информацию про пластическую и, в меньшей степени, упругую деформацию сдвига и разрушения в поверхности сдвига, две другие – поверхность раздела резец–стружка (*II*) и поверхность раздела резец–обработанная деталь (*III*). АЭ из зоны *III* содержит информацию о контактном взаимодействии, связанном с износом резца и шероховатостью обработанной поверхности.

Известно, что параметры сигнала АЭ чувствительны к обрабатываемому материалу, геометрии инструмента и к протеканию процессов, происходящих с инструментом в процессе резания, таких как износ и микросколы. Из режимов резания наиболее сильное влияние на АЭ оказывает скорость резания, что было подтверждено многими исследователями. В то же время сигнал АЭ чувствителен к изменению глубины резания и подачи.

В целом функциональная математическая модель, предложенная для описания связей между среднеквадратическим значением сигнала АЭ и параметрами резания, имеет вид [2]

$$AE_{RMS} = Kv^a t^b S^c + C, \quad (1)$$

где  $K$ ,  $a$ ,  $b$  и  $c$  – константы;  $v$  – скорость резания;  $t$  – глубина резания;  $S$  – подача;  $C$  – константа смещения;  $AE_{RMS}$  – среднеквадратическое значение сигнала, который рассчитывается по формуле

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i^2}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – мгновенная  $i$ -ая амплитуда сигнала АЭ;  $N$  – количество измерений.

Если прочность материала заготовки небольшая, то глубина резания слабо влияет на сигнал АЭ. Но если материал обладает большой прочностью, то влияние глубины резания становится значительным. Кроме того, для наиболее часто применяемых на практике диапазонов режимов резания при алмазном точении для обычных токарных операциях  $C \approx 0$  [5].

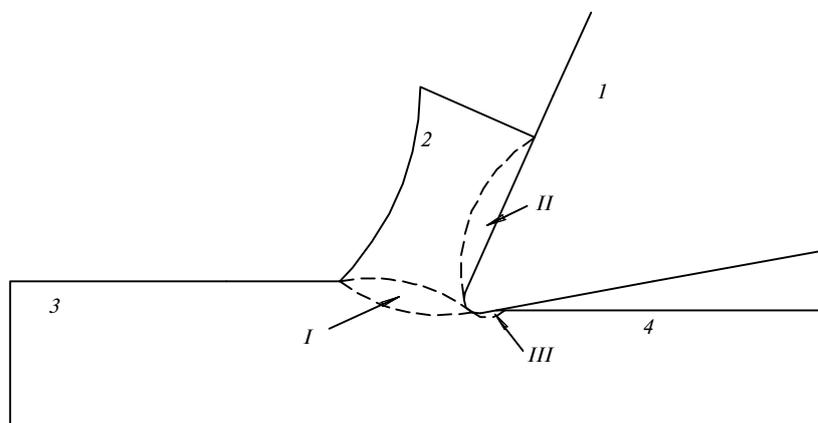


Рис. 1. Источники возникновения сигналов АЭ при точении: зона сдвига (*I*), поверхность раздела резец–стружка (*II*); поверхность раздела резец–обработанная деталь (*III*); *I* – режущий инструмент; *2* – стружка; *3* – заготовка; *4* – обработанная поверхность.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Для изучения процесса точения инструментом, оснащенным монокристаллами алмаза в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины была использована автоматизированная система измерения акустической эмиссии [6, 7]. На рис. 2 представлена блок-схема аппаратной части системы.

Для алмазного точения использовали резцовую вставку с монокристаллом синтетического алмаза фирмы “De Beers” и монокристаллом природного алмаза весом 0,1 карат, ориентацией {111}. Для сравнения были также проведены эксперименты со вставками из твердого сплава ВК6. Заточку алмазных резцов осуществляли на станке ЗАР3637, доводку – на чугунном притире, шаржированном алмазным порошком марки АМ 40.

Для измерения сигналов АЭ использовали широкополосный датчик акустической эмиссии ДИСМ1 [8] в частотном диапазоне 300–1200 кГц при неравномерности не более 8,5 Дб и чувствительности 125 мВ/(м·с<sup>-2</sup>). Сигнал с датчика АЭ поступал на блок предварительного усилителя и амплитудного детектора, который из высокочастотного сигнала АЭ в диапазоне частот от 0,1 до 2 МГц выделял низкочастотную (от 10 до 22 кГц) огибающую. Далее сигнал подавался на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) ADA E 20-10 фирмы HOLIT Data Systems и персональный компьютер. Управление АЦП, запись на жесткий диск компьютера и предварительную обработку экспериментальных данных для сигнала АЭ выполняли программой PowerGraph.

Исследования проводили при торцевом точении на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ при частоте вращения шпинделя 1450 об/мин. За счет торцевого точения в процессе одного прохода скорость резания изменялась от 2 до 6 м/с. Обрабатываемым материалом был алюминиевый сплав

1817. Геометрия резцов после доводки: радиус при вершине – 2 мм, углы  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 1,5^\circ$ ; режимы резания: глубина 50 и 100 мкм, подача 10 и 20 мкм/об. Для записи сигнала АЭ только при трении задней поверхности резца и заготовки подачу останавливали на 10–20 с, при этом вращение заготовки не прерывалось. Сигнал при точении обозначен как АЭ<sub>точ</sub>, а при трении без резания – АЭ<sub>тр</sub>.

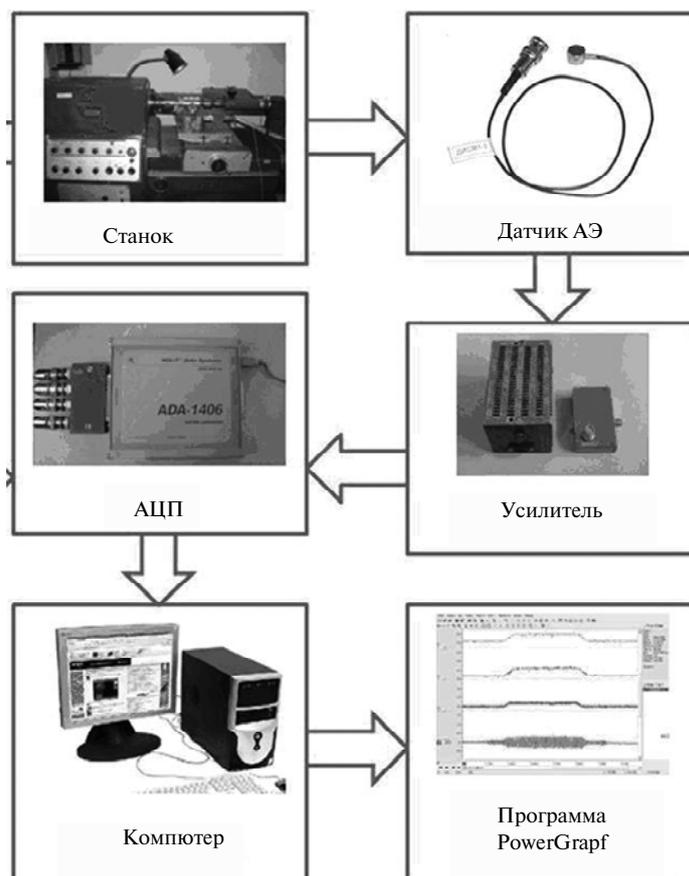


Рис. 2. Блок-схема автоматизированной измерительной системы.

## РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3, а приведен пример осциллограммы, записанной во время точения резцом из природного алмаза. Записанный сигнал был разбит на два участка для нахождения на каждом из них среднеквадратического значения сигнала  $AE_{RMS}$ . Вертикальная линия на графиках указывает момент, когда была остановлена подача. Видно, что вторая часть сигнала АЭ спадает и затем стабилизируется. Для различных режущих материалов, использованных в работе, длительность такого падения различна. Так, для природного алмаза (рис. 3, б), длительность спада довольно коротка, всего 0,1 с, в то время как для синтетического (рис. 3, в) – 8 с, твердого сплава (рис. 3, г) – 3 с. Стабильный остаточный сигнал и есть излучение волн АЭ из третьей зоны – т. е. из зоны контакта задней поверхности инструмента с заготовкой. Видно, что остаточный сигнал АЭ при точении природным резцом из монокристалла алмаза и при точении другими инструментальными материалами отличается.

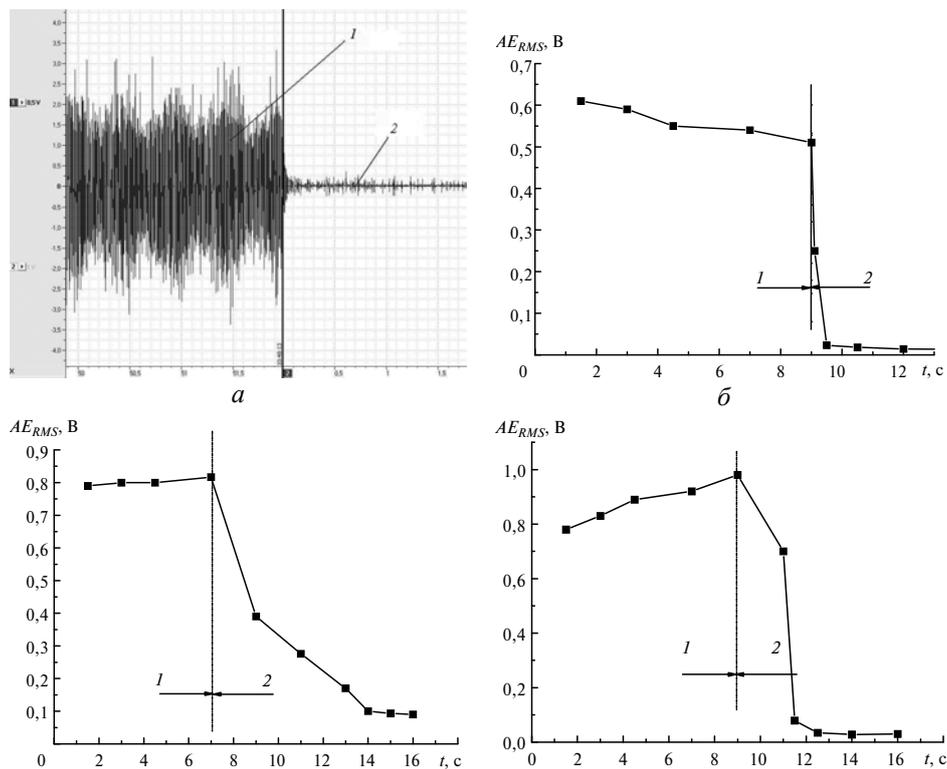


Рис. 3. Сигнал АЭ, регистрируемый программой PowerGraph (а), изменения сигнала  $AE_{RMS}$  для природного алмаза (б), синтетического алмаза (в), твердого сплава (г); режимы резания:  $t = 100$  мкм,  $S = 0,02$  мм/об,  $n = 1450$  об/мин,  $v = 6$  м/с;  $AE_{точ}$  (1),  $AE_{тр}$  (2).

Уровни сигналов  $AE_{RMS}$  при изменении скорости резания при точении резцами из природного и синтетического алмаза, а также твердосплавным резцом ВК6, показаны на рис. 4.  $AE_{тр}$  в данном случае – это остаточный сигнал АЭ от трения резца по задней поверхности. Из графиков на рис. 4 можно сделать вывод, что при точении резцом, оснащенный природным алмазом скорость резания не оказывает влияния на уровень сигнала  $AE_{тр}$ , который является постоянным на всем диапазоне скоростей. Для синтетического алмаза (рис. 4, а, в), как правило, уровень сигнала  $AE_{точ}$  и  $AE_{тр}$  больше, чем для природного алмаза и представляет некую зависимость от скорости резания. Уровень сигнала  $AE_{точ}$  при точении твердым сплавом при  $v > 4,5$  м/с падает, но остается выше, чем при точении алмазным резцом (рис. 4, б, г). При использовании природного алмаза в резце уровень сигнала  $AE_{точ}$  незначительно растет, но остается ниже, чем при использовании синтетического алмаза (рис. 4, а, в) и твердосплавного резца (рис. 4, б, в).

Влияние глубины резания и подачи на  $AE_{RMS}$  при точении резцами из природного и синтетического алмаза, а также твердосплавным резцом ВК6 показаны на рис. 5 и 6. Как видно из зависимостей, глубина и подача практически не оказывают влияния при точении природным резцом на уровень остаточного сигнала  $AE_{тр}$ . Незначительно изменялся уровень сигнала  $AE_{тр}$  при точении синтетическим алмазом, а при точении твердым сплавом изменялся значительно (см. рис. 5, б), что говорит о нестабильности контактных процессов при трении твердого сплава и алюминия. Анализируя изменение  $AE_{RMS}$ , можно сделать вывод, что при точении природным алмазом влияние глубины резания было незначительным, а при точении синтетическим алмазным рез-

цом – неоднозначным в диапазоне глубин 50–70 мкм, но в целом сигнал имел тенденцию к увеличению, при резании же твердосплавным резцом ВКБ сигнал возрастал во всем диапазоне глубин (рис. 5). Такое же неоднозначное изменение  $AE_{RMS}$  можно проследить для алмазных резцов по мере увеличения подачи (рис. 6). В диапазоне подач 8–10 мкм/об сигнал уменьшался, затем в диапазоне 10–15 мкм/об значительно возрастал, после чего снова уменьшался. При обработке же твердым сплавом, сигнал незначительно увеличивался в диапазоне подач 8–15 мкм/об, после чего уменьшился.

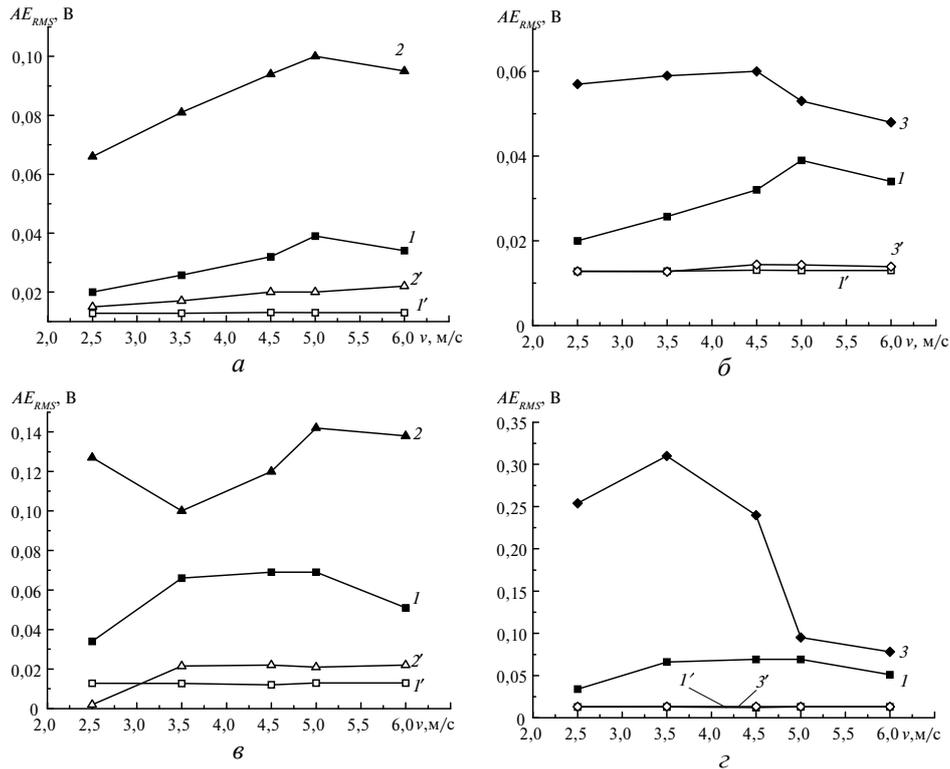


Рис. 4. Влияние скорости резания на  $AE_{RMS}$ , при точении резцами, оснащенными природным (1, 1') и синтетическим (2, 2') алмазом, твердосплавным резцом (3, 3'), режимы резания:  $t = 50$  мкм,  $S = 0,01$  мм/об,  $n = 1450$  об/мин (а, б);  $t = 100$  мкм,  $S = 0,02$  мм/об,  $n = 1450$  об/мин (в, г);  $AЭ_{точ}$  (1, 2, 3),  $AЭ_{тр}$  (1', 2', 3').

С учетом остаточного сигнала из [5] формулу (1) представим в виде

$$AE_{RMS} = (AE_S)_c + (AE_S)_t + C = K_t v^{a_c} t^{b_c} S^{c_c} + K_w v^{a_t} t^{b_t} S^{c_t} + C, \quad (3)$$

где  $a_c$ ,  $b_c$  и  $c_c$  – константы, учитывающие эффект от формирования стружки в первой и второй зоне;  $a_t$ ,  $b_t$  и  $c_t$  – константы учитывающие сигналы АЭ из третьей зоны. В таблице приведены значения констант, полученные авторами путем обработки  $AE_{RMS}$ .

Таким образом, в данном экспериментальном исследовании удалось проанализировать два вида излучаемых сигналов – первый сигнал  $AЭ_{точ}$  в процессе резания, второй –  $AЭ_{тр}$  в процессе остановки подачи, но продолжении вращения заготовки. Удалось установить различия регистрируемых сигналов АЭ в зависимости от выбранного режущего материала, а также проанализировать влияние глубины, подачи и скорости резания на среднее квадратическое

отклонение сигнала  $AE_{RMS}$ , вследствие чего были определены экспериментальные константы.

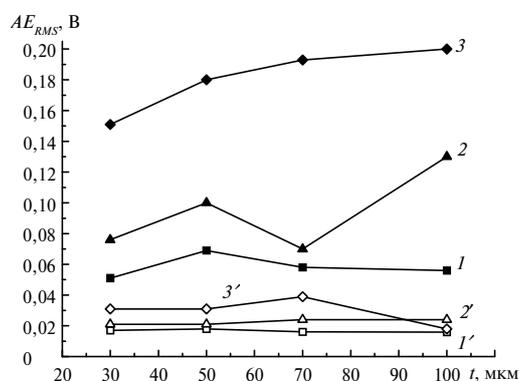


Рис. 5. Влияние глубины резания на  $AE_{RMS}$  при точении природным (1, 1') и синтетическим (2, 2') алмазом, твердосплавным резцом (3, 3'); режим резания:  $S = 0,01$  мм/об,  $n = 1450$  об/мин,  $v = 6$  м/с;  $AЭ_{точ}$  (1, 2, 3),  $AЭ_{тр}$  (1', 2', 3').

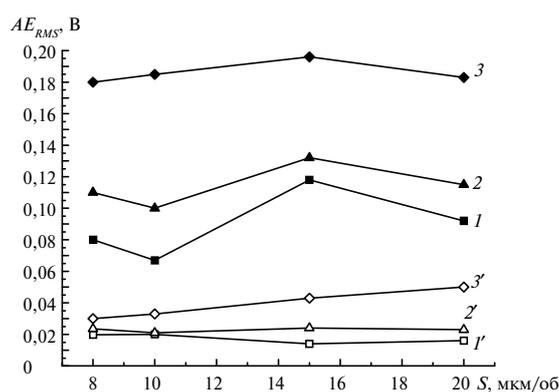


Рис. 6. Влияние подачи на  $AE_{RMS}$  при точении природным (1, 1') и синтетическим (2, 2') алмазом, твердосплавным резцом (3, 3'); режим резания  $t = 50$  мкм,  $n = 1450$  об/мин,  $v = 6$  м/с;  $AЭ_{точ}$  (1, 2, 3),  $AЭ_{тр}$  (1', 2', 3').

### Экспериментальные константы

Значение констант при точении		
твердым сплавом	природным алмазом	синтетическим алмазом
$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \approx 1$	$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \approx 0$	$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \neq 0$
$b \neq 0, b_c \neq 0, b_t \neq 0$	$b \approx 0, b_c \approx 0, b_t \approx 0$	$b \neq 0, b_c \neq 0, b_t \approx 0$
$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \neq 1$	$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \approx 0$	$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \approx 0$

На основании экспериментальных результатов можно сделать вывод, что наиболее высокий уровень сигнала  $AЭ_{точ}$  имеет место при точении твердосплавным резцом ВКБ, менее высокий – при точении резцом с синтетическим алмазом, наименьший уровень сигнала  $AЭ_{точ}$  – резцом с природным алмазом.  $AЭ_{тр}$  при алмазном точении природным алмазом практически стремится к нулю, в то время как для твердосплавного резца этот сигнал выше в несколько раз.

Досліджено вплив режимів різання на сигнали акустичної емісії при тонкому точінні алюмінієвих сплавів. Кожен сигнал акустичної емісії був розділений на дві ділянки, перша з яких переважно пов'язана з утворенням стружки, друга – з тертям інструменту по заготовці. При дослідженні використовували монокристали природного та синтетичного алмазу, а також твердий сплав ВК6. Експериментальні дані свідчать про те, що при алмазному точінні основний сигнал акустичної емісії випромінюється при утворенні стружки, а при точінні твердим сплавом часто більша частка випромінюваного сигналу від тертя по задній поверхні, і вона залежить від режимів обробки.

**Ключові слова:** акустична емісія, процес тертя при механічній обробці, утворення стружки.

*The paper addresses the influence of cutting conditions on acoustic emission signals in fine turning of aluminum alloys. Each AE signal was split into two sections: the first one is associated mostly with the chip formation and the second one with the tool-workpiece friction. The tool materials were single crystals of natural and synthetic diamond as well as hardmetal WC-6Co. The experimental data demonstrate that in diamond turning the main signal is emitted during the chip formation, while in the case of hardmetal turning the portion of the signal emitted due to the tool flank friction is often larger and depends on the cutting conditions.*

**Keywords:** acoustic emission, friction process in machining, chip formation.

1. Kannatey-Asibu Jr. E., Dornfeld D. Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting // ASME J. Eng. Ind. – 1981. – **103**. – P. 330–340.
2. Teti R., Dornfeld D. Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting // Ibid. – 1989. – **111**. – P. 229–237.
3. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
4. Кибальченко А. В. Применение метода акустической эмиссии в условиях гибких производственных систем. – М.: ВНИИ-ТЭМР, 1986. – 56 с.
5. Gi Heung Choi, Gi Sang Choi. Experimental study on AE from precision diamond machining // KSME Int. J. – 1997. – **11**, N 6. – P. 605–610.
6. Девин Л. Н., Стахнив Н. Е., Найдено А. Г. Применение метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов из АТП при точении алюминиевых сплавов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2002. – Вып. 62. – С. 44–47.
7. Девин Л. Н., Стахнив Н. Е., Сулима А. Г. Автоматизированная система для измерения сигнала акустической эмиссии в процессе прецизионного алмазного точения // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 11-го Междунар. науч.-техн. семинара, г. Свалява. 21–25 февр. 2011 г. – К.: АТМ Украины, 2011. – С. 79–81.
8. Девин Л. Н., Новиков Н. В. Широкополосные датчики акустической эмиссии для диагностики состояния режущих инструментов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 81–85.

Поступила 04.06.15