

7. Liukshin, V. S. (1968) *Teoriia vintovikh poverkhnostei v proektirovanii rezhuzhchikh instrumentov [Theory of screw surfaces in the design of cutting tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

УДК 621.941: 534.647

Л. М. Девін, д-р техн. наук; С. В. Ричев, С. Н. Іванов

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074 м. Київ, e-mail: ldevin@ism.kiev.ua*

ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТ - ДЕТАЛЬ ДЛЯ РІЗНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПІДСТАВІ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В роботі досліджено вплив вибору інструментального надтвердого матеріалу і режимів тонкого точіння на рівень сигналів акустичної емісії. Для цього при точінні алюмінієвого сплаву при терті задньої поверхні інструмента об оброблений матеріал для монокристалічних різців із природного, синтетичного алмазу, а також твердого сплаву ВК6 сигнали АЕ поділяли на дві частини. Вдалося встановити відмінності реєстрованих сигналів АЕ в залежності від вибраного ріжучого матеріалу, а також проаналізувати вплив глибини, подачі та швидкості різання на середньоквадратичне відхилення сигналів AE_{RMS} , внаслідок чого вдалося визначити експериментальні константи. На підставі експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільш високий рівень сигналу $AE_{точ}$ має місце при точінні твердосплавним різцем ВК6, менш високий – при точінні різцем з синтетичним алмазом, найменший рівень сигналу $AE_{точ}$ – для різця з природним алмазом. $AE_{тр}$ при алмазному точінні природним алмазом практично наближається до нуля, в той час як для твердосплавного різця цей сигнал вище в декілька разів

Ключеві слова: акустична емісія, процес тертя при механічній обробці, режими різання, тонке точіння

Інтелектуальний моніторинг ріжучого інструменту є одним з напрямків підвищення ефективності сучасного машинобудування. Дослідження останніх десятиліть показали, що високочастотні пружні коливання (сигнали акустичної емісії (АЕ)), які випромінюються під час обробки, містять значну інформацію про процес різання. Дослідження акустичної емісії в процесах різання, а особливо при обробці високотвердими матеріалами вивчався багатьма зарубіжними вченими, серед яких – *R.Teti, D. Dornfeld* [1, 2], а також *В. Н. Подураєвим, О. В. Кібальченко* [3, 4]. У процесі таких досліджень були отримані математичні залежності амплітуди сигналів акустичної емісії від стану інструменту при тих чи інших режимах обробки. Запропоновані математичні моделі і знайдені залежності справедливі лише для конкретних умов обробки. Для прикладу, модель з обмеженнями, запропонована *D. Dornfeld* [2], досить точно описує процес стружкоутворення на основі сигналу АЕ.

Всі спроби *R. Teti, D. Dornfeld* моделювати і вивчати процес точіння на основі сигналу АЕ були спрямовані на опис контактних взаємодій в зоні стружкоутворення. Однак при цьому не враховувалися особливості контактної тертя задньої грані інструменту по поверхні деталі в процесі різання. Дана складова сигналу АЕ, що реєструється в процесі різання, істотна і відрізняється для різних матеріалів. Особливості контактної взаємодії

методом АЕ при алмазному точінні вивчали південнокорейські вчені *Gi Heung Choi, Gi Sang Choi* [5]. Їх методика досліджень була взята за основу даної роботи.

Мета роботи – дослідження впливу інструментального матеріалу і режимів тонкого точіння на рівень сигналів акустичної емісії. Для цього при точінні алюмінієвого сплаву при терті задньої поверхні інструмента об оброблений матеріал для монокристалічних різців з природного, синтетичного алмазу, а також твердого сплаву ВК6 сигнали акустичної емісії поділяли на дві частини. Перша була отримана при утворенні стружки в процесі різання при робочій подачі, а друга – при відключеній подачі, тільки як результат тертя задньої поверхні інструмента з заготовкою при увімкнених обертах шпинделя верстату.

Акустична емісія, тобто випромінювання матеріалом пружних хвиль напружень, викликаних локальною перебудовою його структури, містить інформацію про фізичні процеси, які відбуваються при терті, деформації та руйнуванні матеріалу [1]. На рис. 1

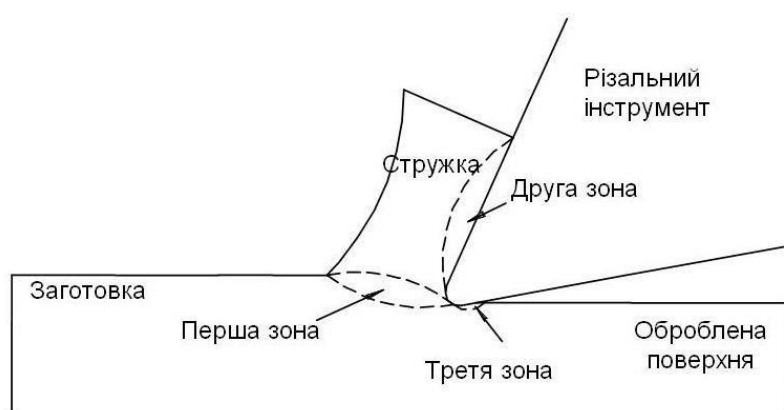


Рис. 1. Джерела виникнення сигналів АЕ при точінні

показані джерела виникнення сигналів АЕ при точінні. При цьому виділяють три джерела АЕ: перше – зона зсуву – містить інформацію про пластичну і, в меншій мірі, пружну деформацію зсуву і руйнування в поверхні зсуву, два інші – поверхня розділу різець-стружка і поверхня розділу різець-оброблена деталь. АЕ з третьої зони містить інформацію про контактну взаємодію,

пов'язаному зі зносом різця та шорсткістю обробленої поверхні.

Відомо, що параметри сигналу АЕ чутливі до оброблюваного матеріалу, геометрії інструменту і до протікання процесів, що відбуваються з інструментом в процесі різання, таких як знос та мікросколи. З режимів різання найбільш сильний вплив на АЕ чинить швидкість різання, що було підтверджено багатьма дослідниками. В той же час сигнал АЕ також чутливий і до зміни глибини різання та подачі.

Функціональна математична модель, запропонована для опису зв'язків між середньоквадратичним значенням амплітуди сигналу акустичної АЕ (AE_{RMS}) в роботі [2] і параметрами різання, має вигляд (1):

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

де K , a , b та c – константи; v – швидкість різання; t – глибина різання; S – подача; C – константа зміщення; AE_{RMS} – рівень середньоквадратичного значення амплітуди сигналу, який розраховується за формулою (2):

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

де χ – миттєва i -а амплітуда сигналу АЕ; N - кількість вимірювань.

Якщо міцність матеріалу заготовки невелика, то глибина різання слабо впливає на сигнал АЕ. Але якщо матеріал має велику міцність, то вплив глибин різання становиться

значним. Крім того, для найбільш часто використовуваних на практиці діапазонах режимів різання при алмазному точінні для звичайних токарних операцій $C \approx 0$ [5].

Для дослідження процесу точіння інструментом з монокристалів алмазу в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України була використана автоматизована система вимірювання акустичної емісії [6, 7]. На рис. 2 представлена блок-схема апаратної частини системи.

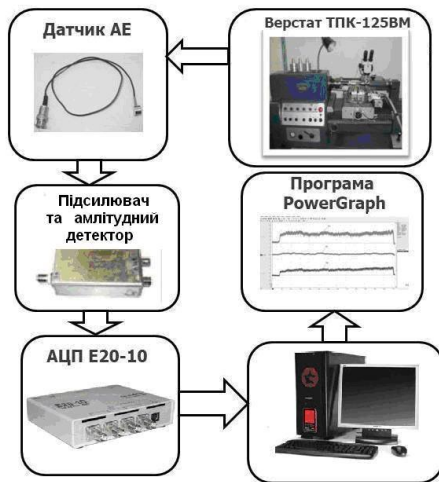


Рис. 2. Блок-схема автоматизованої вимірювальної системи

Для алмазного точіння використовували різцеву вставку з монокристалів синтетичного алмазу фірми «De Beers» і монокристалів природного алмазу вагою 0,1 карат, орієнтація {111}. Для порівняння були також проведені експерименти зі вставками з твердого сплаву ВК6. Заточку алмазних різців здійснювали на верстаті ЗАР3637, доведення – на чавунному притирі, шаржованому алмазним порошком марки АМ 40.

Для вимірювання сигналів АЕ використовували широкосмуговий датчик акустичної емісії ДІСМ-1 [8]. Частотний діапазон 300-1200 кГц при нерівномірності не більше 8,5 Дб і чутливістю 125 мВ/(м·с⁻²). Сигнал з датчика АЕ надходив на блок попереднього підсилювача і амплітудного детектора, який з високочастотного сигналу АЕ в діапазоні частот від 0.1 до 2 МГц виділяв

низькочастотну (від 10 до 22 кГц) огинаючу. Далі сигнал подавався на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) ADA E20-10 фірми *HOLIT Data Systems* і персональний комп'ютер. Керування АЦП, запис на жорсткий диск комп'ютера і попередню обробку експериментальних даних для сигналу АЕ виконували програмою *PowerGraph*.

Дослідження проводили при торцевому точінні на високоточному токарному верстаті ТПК-125ВМ при частоті обертання шпинделя 1450 об/хв. За рахунок торцевого точіння в процесі одного проходу швидкість різання змінювалася від 2 до 6 м/с. Матеріал, що оброблявся – алюмінієвий сплав 1817. Геометрія різців після доведення: радіус при вершині – 2 мм, кути $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 1,5^\circ$; режими різання: глибина 50–100 мкм, подача 10–20 мкм/об. Для запису сигналу АЕ тільки при третій задній поверхні різця і заготовки зупиняли подачу на 10–20 с, при цьому обертання заготовки не переривалося. Сигнал при точінні позначений як АЕ_{точ}, а при терті без різання – АЕ_{тр}.

На рис. 3, а наведено приклад осцилограми, записаної під час точіння різцем з природного алмазу. Записаний сигнал був розбитий на дві ділянки для знаходження на кожному з них середньоквадратичного значення сигналу АЕ_{RMS}. Вертикальна лінія на графіках вказує момент, коли була зупинена подача. Видно, що друга частина сигналу АЕ спадає і потім стабілізується. Для різних ріжучих матеріалів, використаних в роботі, тривалість такого падіння різна. Так, для природного алмазу (рис. 3, б), тривалість спаду досить коротка, всього 0,1 с, в той час як для синтетичного (рис. 3, в) – 8 с, твердого сплаву (рис. 3, г) – 3 с. Стабільний залишковий сигнал і є випромінювання хвиль АЕ з третьої зони – тобто із зони контакту задньої поверхні інструмента з заготовкою. Видно, що залишковий

сигнал АЕ при точінні природним різцем з монокристала алмазу і при точінні іншими інструментальними матеріалами відрізняється.

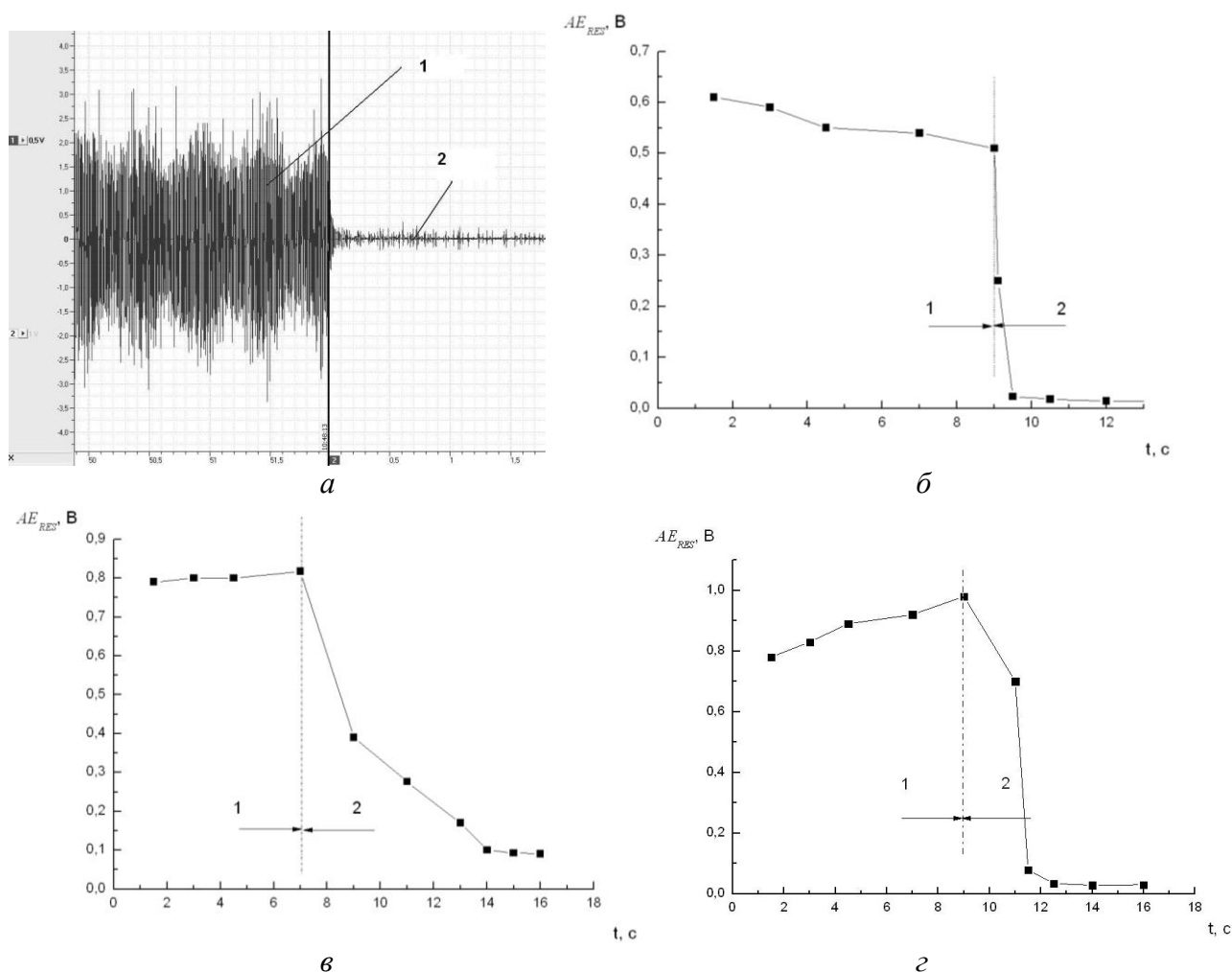


Рис. 3. Сигнал АЕ (а), середньоквадратичне значення сигналу АЕRMS для природного алмазу (б), синтетичного алмазу (в), твердого сплаву (ТС) (з); режими різання: $t = 100$ мкм, $S = 0,02$ мм/об, $n = 1450$ об/хв, $v = 6$ м/с; АЕточ (1), АЕтр (2)

Величина $AERMS$ при зміні швидкості різання при точінні природним і синтетичним алмазом, а також твердосплавним різцем ВК6, показані на рис 4. $AERMS$ в даному випадку – це залишковий сигнал АЕ від тертя різця по задній поверхні. З графіків на рис. 4 можна зробити висновок, що при точінні природним алмазом швидкість різання не впливає на рівень сигналу $AERMS$, який є постійним на всьому діапазоні швидкостей. Для синтетичного алмазу (рис. 4, а, в), як правило, рівень $AERMS$ і $AERMS$ більший, ніж для природного алмазу і залежить від швидкості різання. Рівень сигналу $AERMS$ при точінні твердим сплавом при $v > 4,5$ м/с падає, але залишається більше, ніж при точінні алмазним різцем (рис. 4, б, з) При використанні в різці природного алмазу рівень $AERMS$ незначно зростає, але залишається нижчим, ніж при використанні синтетичного алмазу (рис. 4, а, в) і твердосплавного різця (рис. 4, б, в).

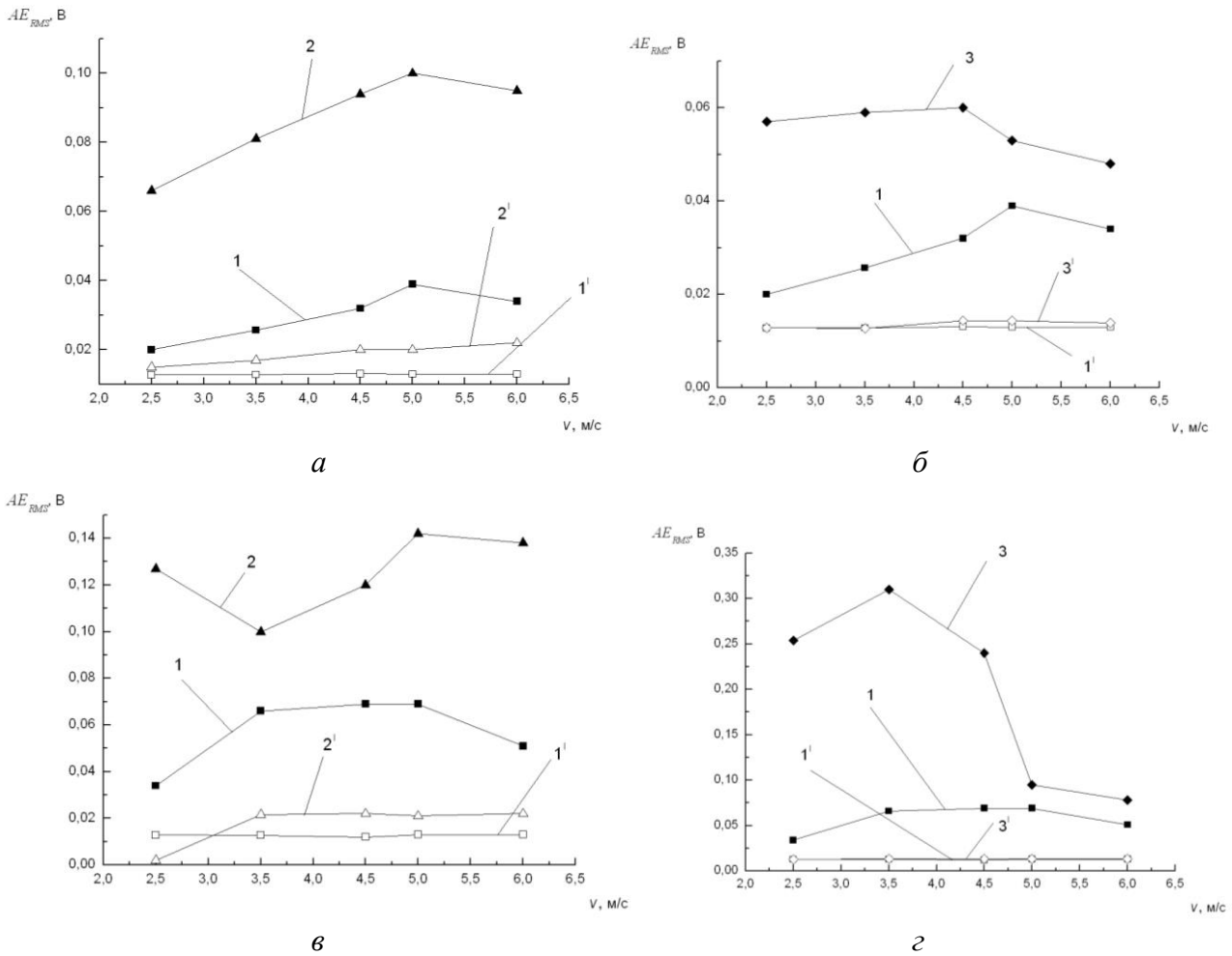


Рис. 4. Вплив швидкості різання на AE_{RMS} , при точінні природним (1, 1') і синтетичним (2, 2') алмазом, твердосплавним різцем (3, 3'), режими різання: $t = 50$ мкм, $S = 0,01$ мм/об, $n = 1450$ об/хв (а, б); $t = 100$ мкм, $S = 0,02$ мм/об, $n = 1450$ об/хв. (в, г); $AE_{точ}$ (1, 2, 3), $AE_{тр}$ (1', 2', 3')

Вплив глибини різання і подачі на AE_{RMS} при точінні природним і синтетичним алмазом, а також твердосплавним різцем ВК6 показані на рис. 5 і 6. Як видно з залежностей, глибина і подача практично не впливають при точінні природним різцем на рівень залишкового сигналу при $AE_{тр}$. Незначну зміну рівня для $AE_{тр}$ можна побачити при точінні синтетичним алмазом і твердим сплавом (див. рис. 5, 6) – сигнал для $AE_{тр}$ значно змінювався в процесі зміни подачі і глибини різання, що говорить про нестабільність контактних процесів при терті твердого сплаву по алюмінію. Говорячи про основний реєстрований сигнал AE_{RMS} , можна зробити висновок, що при точінні природним алмазом вплив глибини був незначним, при точінні синтетичним алмазним різцем вплив був неоднозначним в діапазоні глибин 50–70 мкм, але в цілому сигнал мав тенденцію до збільшення, при різанні ж твердосплавним різцем ВК6 сигнал зростає на всьому діапазоні глибин (рис. 5). Таку ж неоднозначну зміну AE_{RMS} можна простежити для алмазних різців по мірі збільшення подачі (рис. 6). В діапазоні подач 8-10 мкм/об сигнал зменшувався, потім в діапазоні 10-15 мкм/об

значно зростає, після чого знову зменшується. При обробці же твердим сплавом, сигнал незначно збільшується в діапазоні подач 8–15 мкм/об, після чого зменшився.

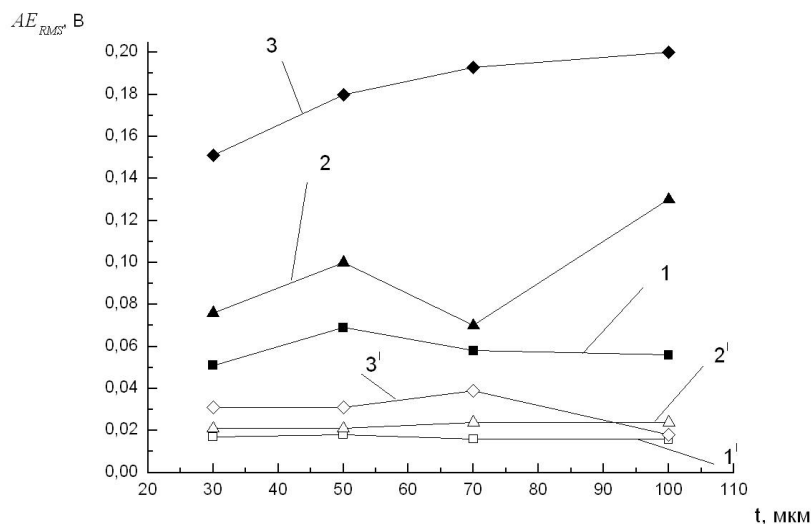


Рис. 5. Влияние глубины резания на AE_{RMS} при точении природным (1, 1') и синтетическим (2, 2') алмазом, твердосплавным резцом (3, 3'); режимы резания: $S = 0,01$ мм/об, $n = 1450$ об/хв, $v = 6$ м/с; $AE_{точ}$ (1, 2, 3), $AE_{тр}$ (1', 2', 3')

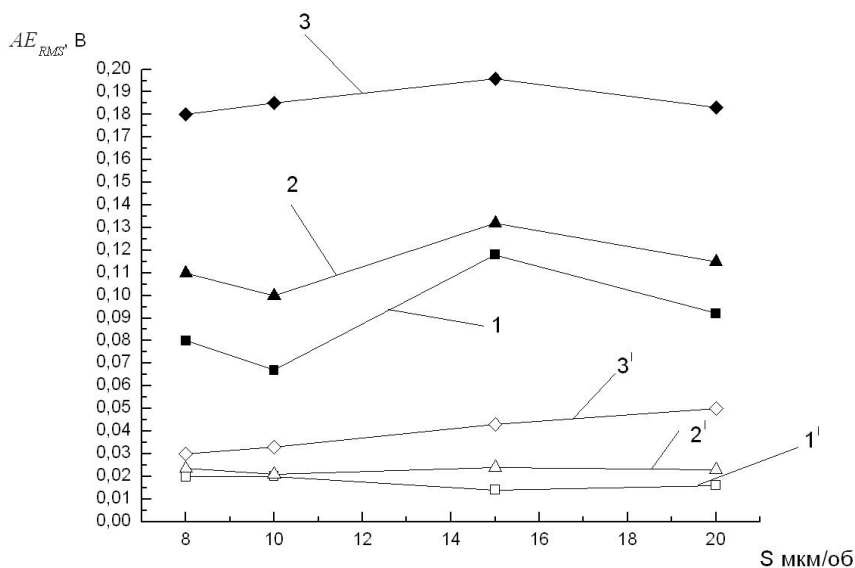


Рис. 6. Влияние подачи на AE_{RMS} при точении природным (1, 1') и синтетическим (2, 2') алмазом, твердосплавным резцом (3, 3'); режимы резания $t = 50$ мкм, $n = 1450$ об/хв, $v = 6$ м/с; $AE_{точ}$ (1, 2, 3), $AE_{тр}$ (1', 2', 3')

З урахуванням залишкового сигналу в роботі [5] формулу (1) представимо у вигляді:

$$AE_{RMS} = (AE_S)_c + (AE_S)_t + C = K_t v^a t^b S^c + K_w v_w^a t^b S^c + C, \quad (3)$$

де a_c , b_c и c_c – константи, що враховують ефект від формування стружки в першій і другій зоні; a_t , b_t и c_t – константи враховують сигнали АЕ з третьої зони (таблиця), отримані авторами шляхом обробки AE_{RMS} .

Експериментальні константи

Константа	Точіння твердим сплавом	Точіння природним алмазом	Точіння синтетичним алмазом
a	$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \approx 1$	$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \approx 0$	$a \approx 1, a_c \approx 1, a_t \neq 0$
b	$b \neq 0, b_c \neq 0, b_t \neq 0$	$b \approx 0, b_c \approx 0, b_t \approx 0$	$b \neq 0, b_c \neq 0, b_t \approx 0$
c	$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \neq 1$	$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \approx 0$	$c \neq 0, c_c \neq 0, c_t \approx 0$

Висновки

Таким чином, в даному експериментальному дослідженні вдалося проаналізувати два види випромінюваних сигналів – перший сигнал $AE_{точ}$ в процесі різання, другий – $AE_{тр}$ в процесі тертя під час зупинки подачі, але продовження обертання заготовки. Вдалося встановити відмінності реєстрованих сигналів АЕ в залежності від обраного ріжучого матеріалу, а також проаналізувати вплив глибини, подачі і швидкості різання на середньоквадратичне відхилення сигналу AE_{RMS} , внаслідок чого вдалося визначити експериментальні константи.

На підставі експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільш високий рівень сигналу $AE_{точ}$ має місце при точінні твердосплавним різцем ВКб, менш високий – при точінні різцем з синтетичним алмазом, найменший рівень сигналу $AE_{точ}$ – для різця з природним алмазом. $AE_{тр}$ при алмазному точінні природним алмазом практично наближається до нуля, в той час як для твердосплавного різця цей сигнал вище в декілька разів.

В работе исследовано влияние выбора инструментального сверхтвердого материала и режимов тонкого точения на уровень сигналов акустической эмиссии. Для этого при точении алюминиевого сплава при трении задней поверхности инструмента об обработанный материал для монокристаллических резцов из природного, синтетического алмаза, а также твердого сплава ВКб сигналы АЭ разделяли на две части. Удалось установить различия регистрируемых сигналов АЭ в зависимости от выбранного режущего материала, а также проанализировать влияние глубины, подачи и скорости резания на среднеквадратическое отклонение сигнала AE_{RMS} , вследствие чего удалось определить экспериментальные константы. На основании экспериментальных результатов можно сделать вывод, что наиболее высокий уровень сигнала $AE_{точ}$ возникает при точении твердосплавным резцом из ВКб, менее высокий – при точении резцом с синтетическим алмазом, наименьший уровень сигнала $AE_{точ}$ – для резца с природным алмазом. $AE_{тр}$ при алмазном точении природным алмазом практически приближается к нулю, в то время, как для твердосплавного резца этот сигнал выше в несколько раз.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, процесс трения при механической обработке, режимы резания, тонкое точение

L. N. Devin, S. V. Richev, S. N. Ivanov

PECULIARITIES OF CONTACT INTERACTION TOOLS - DETAIL FOR VARIOUS SUPERHARD MATERIALS BASED ON ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

This work is present the influence of the choice of instrumental superhard material and fine-turning regimes on the level of acoustic emission signals. For this, when turning an aluminum alloy during friction

of the back surface of the tool, the processed material for single-crystal cutters made of natural, synthetic diamond, and also the hard alloy VK6, the signals AE were divided into two parts. It was possible to determine the differences in the recorded AE signals depending on the selected cutting material, and also analyze the influence of depth, feed and cutting speed on the standard deviation of the AERMS signal, as a result of which it was possible to determine the experimental constants. Based on the experimental results, it can be concluded that the highest level of the AEToch signal occurs at the sharpening with a hard alloy blade VK6, less high – with a sharpening with a synthetic diamond cutter, the lowest level of the AEToch signal for a natural diamond cutter. AETr with diamond-cut of natural diamond is practically close to zero, while for a carbide cutting tool this signal is higher several times.

Key words: acoustic emission, friction process in the machining, cutting conditions, fine turning

Література

1. Kannatey-Asibu Jr. E., Dornfeld D. Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting // *ASME J. Engr. for Ind.* – 1981. – 103. – P. 330–340.
2. Teti R., Dornfeld D. Modeling and Experimental Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting // *ASME J. Engr. for Ind.* – 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., Найденко А. Г. Применение метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов из АТП при точении алюминиевых сплавов // *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-тех. 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. 2011г.* – 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.

Надійшла 31.05.18

References

1. Kannatey-Asibu Jr. E., & Dornfeld D. (1981) Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. *ASME J. Engr. for Ind.*, 103, 330–340.
2. Teti R., & Dornfeld D. (1989) Modeling and Experimental Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting. *ASME J. Engr. for Ind.*, 111, 229–237.
- a. Poduraev V. N., Barzov A. A., Gorelov V. A. (1988) *Tekhnologicheskaja diahnostika rezaniia metodom akusticheskoi emissii [Technological diagnostics of cutting by acoustic emission method]*. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].
3. Kibalchenko A. V. (1986) *Primenenie metoda akusticheskoi emissii v usloviakh gibkikh proizvodstvennykh sistem [Application of acoustic emission method in conditions of flexible production systems]*. Moscow: VNIИ-TEMR [in Russian].

4. Gi Heung Choi, & Gi Sang Choi. (1997) Experimental study on AE from precision diamond machining. *KSME Int. J. Vol. 11, 6*, 605–610.
5. Devin L. N. Stakhniv N. Ye., & Naydenko A. G. (2002) Primenenie metoda akusticheskoi emissii dlia otsenki rabotosposobnosti reztsov iz ATP pri tochenii aliuminievykh splavov [Application of the acoustic emission method for evaluating the operability of cutting tools made from ATP during turning of aluminum alloys] *Mezhdunar. nauch.-tekhn. Sb. issue 62.: Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and Instrument in Technological Systems*. (pp. 44–47). Khar'kov: NTU “KHPI” [in Russian].
6. Devin L. N., Stakhniv N. Ye, & Sulima A. G. (2011) Avtomatizirovannaya sistema dlya izmereniya signala akusticheskoy emissii v protsesse pretsizionnogo almaznogo tocheniya [Automated system for measuring the acoustic emission signal in the process of precision diamond turning]. Proceedings from Modern problems of production and repair in industry and transport ‘11: *11 Mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar (21–25 fevralia 2011 hoda) – XIInd scientific-techn. Seminar*. (pp. 79–81). Kiev: ATM Ukraine [in Russian].
7. Devin L. N., & Novikov N. V. (2008) Shirokopolosnye datchiki akusticheskoi emissii dlia diagnostiki sostoiianiia rezhushchikh instrumentov [Broadband acoustic emission sensors for diagnosing the state of cutting tools] *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – Technical diagnostics and non-destructive testing*, 4, 81–85 [in Russian].

УДК 620.3

В. М. Ткач, д-р фіз.-мат наук, **В. В. Садохін** канд. техн. наук,
Д. В. Соколюк, **В. П. Садохін**, **М. В. Фефілатєв**

*Інститут надтвердих матеріалів НАН України ім. В.М. Бакуля, вул. Автозаводська 2,
04074, г. Київ, e-mail: savikor2015@gmail.com*

НАНОТЕХНОЛОГІЯ ОДНОСТАДІЙНОГО ЛОКАЛІЗОВАНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ В ВАКУУМІ

Узагальнені результати досліджень у зв'язку з зміною деяких властивостей електропровідних матеріалів одного хімічного складу, при їх іонно-плазмовому диспергуванні в вакуумі в рідну основу, від їх масиву, до нано рівня. Результативним науково-дослідницьким рішенням даної проблематики розглядається конструкторсько-технологічні розробки з моделювання принципово важливих спеціалізованих блоків з автоматизованим контролем та керуванням технологічним процесом. Комплектуючі модулі плазменної нанодиспергації, а також налаштування таких блоків і пристроїв повинні підкорятися програмним командам з персонального комп'ютера. Повторюваність фізико-хімічних властивостей дозволить провести сертифікацію та скоротити інноваційний шлях нових наноматеріалів від наукової розробки до його комерціалізації

Ключові слова: нанотехнологія, локалізоване іонно-плазмове диспергування у вакуумі.

Вступ

Нанотехнологію, визначають зараз як сукупність методів синтезу, зборки, структуроутворення, нанесення, видалення і модифікування матеріалів, включаючи систему знань, навичок та вміння, апаратурне, матеріалознавче, метрологічне, інформаційне