

Исследование процессов обработки

УДК 621.941:534.647

Л. Н. Девин*, С. В. Рычев**

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

**ldevin@ism.kiev.ua*

***richev.sergey@gmail.com*

Корреляционная модель акустической эмиссии при тонком алмазном точении

С помощью метода акустической эмиссии диагностировали процесс резания алюминиевого сплава. При исследовании были использованы резцы из монокристаллов природного и синтетического алмаза. Сравнительный анализ показал справедливость корреляционной модели акустической эмиссии Пэна и Дорнфельда для условий тонкого алмазного точения алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, модель акустической эмиссии, алмазное точение.

ВСТУПЛЕНИЕ

Акустическая эмиссия (АЭ) может быть использована для оценки износа режущего инструмента и мониторинга процесса резания. Этот метод показал высокую эффективность при исследовании трения и разрушения инструмента и детали, так как контактные взаимодействия в зоне резания приводят к возникновению сигнала АЭ. Актуальность данного метода обусловлена проблемой обнаружения износа инструмента и его разрушения во время точения. Акустическая эмиссия как физический процесс – это излучение материалом упругих волн напряжений, вызванных локальной перестройкой его структуры при трении, деформации и разрушении материала [1].

Созданием функциональных моделей, на основании которых строились бы корреляционные зависимости, характеризующие сигнал АЭ, занимались многие зарубежные ученые, среди них Д. А. Дорнфельд, Д. Е. Кэннэти-Асибу [2], Р. Тэти [2], Н. С. Лэн [3]. Так, модель из [2] основывается на корреляционном отношении уровня сигнала АЭ к объему деформируемого материала, а также связи с входными параметрами, такими как режимы резания, и со свойствами обрабатываемого и инструментального материалов [2]. Данная модель успешно показала совпадение расчетных и экспериментальных данных регистрации сигнала АЭ во время токарной обработки. Модель из [4] была созда-

на для алмазного торцевого точения. Для этого процесса особо важно использование остро заточенного резца при минимальном контакте стружки с передней поверхностью инструмента. Результаты расчетов по данной модели являются более точными и достоверными. Цель нашей работы – теоретический анализ существующих моделей описания сигналов АЭ и согласование их с конкретными экспериментальными данными, полученными при точении алюминиевых сплавов природным и синтетическим монокристаллическими алмазными резцами на автоматизированной системе измерения акустической эмиссии в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения сигналов АЭ в процессе точения монокристаллами природного и синтетического алмаза в ИСМ была использована автоматизированная система измерения акустической эмиссии [5, 6]. На рис. 1 представлена блок-схема аппаратной части системы.

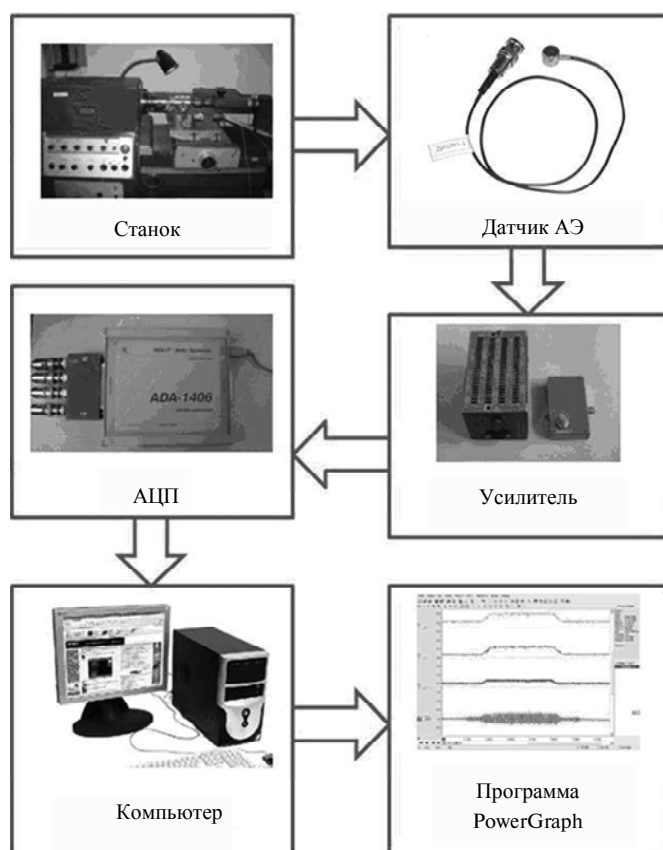


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной измерительной системы.

Для измерения сигналов АЭ использовали широкополосный датчик акустической эмиссии ДИСМ1 [7], который имеет частотный диапазон 300–1200 кГц при неравномерности не более 8,5 Дб и чувствительность $125 \text{ мВ/м}\cdot\text{с}^{-2}$. Сигнал с датчика АЭ поступал на блок предварительного усилителя и амплитудного детектора, который из высокочастотного сигнала АЭ в диапазоне частот от 0,1 до 2,0 МГц выделял низкочастотную (от 10 до 22 кГц) огибающую.

Дальше сигнал подавали на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) ADA E20-10 фирмы HOLT Data Systems и на компьютер. Управление АЦП, запись на жесткий диск компьютера и предварительную обработку экспериментальных данных для сигнала АЭ выполняли программой PowerGraph [8].

Исследования проводили при торцевом точении (от периферии детали к ее центру) на высокоточном токарном станке ТПК-125ВМ при частоте вращения шпинделя 1450 об/мин. В процессе прохода скорость резания изменялась от 6 до 2 м/с, подача $S = 9$ мкм/об, глубина $t = 100$ мкм. Обработываемый материал – алюминиевый сплав 1817, диаметр заготовки – 78 мм (рис. 2). Для алмазного точения использовали резцовые вставки с монокристаллом природного алмаза и синтетического алмаза фирмы “De Beers” (вес – 0,1 карат, ориентация – {111}). Геометрия резца после доводки: радиус при вершине – $2,1 \pm 0,1$ мм, углы $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 1,5^\circ$. Монокристалл алмаза закрепляли в режущей вставке методом пайки. Заточку кристалла осуществляли на станке ЗАР3637, доводку – на чугунном притире, шаржированном алмазным порошком марки АМ 40. На рис. 3 показана схема ориентации режущих кромок резцов в кристалле алмаза, выбранная таким образом, чтобы износ инструмента проходил в направлении вектора наибольшей твердости, а усилия резания не совпадали с направлением плоскостей спайности, по которым алмаз легко раскалывается [9]. Прочность алмаза на сдвиг была 8,7 ГПа, на сжатие – 8,9 ГПа [10].

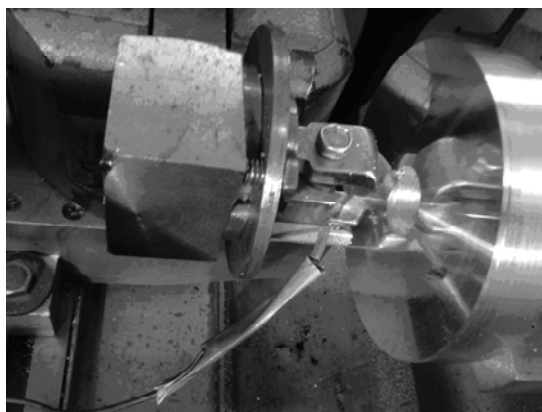


Рис. 2. Резец и датчик АЭ в момент обработки.

МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В процессе контакта режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом возникает зона пластической деформации. Эту зону еще называют зоной стружкообразования. Зону контакта образовавшейся стружки с передней частью инструмента называют зоной вторичной деформации. Также существует зона контакта обработанного материала с задней поверхностью инструмента. Все вышеперечисленные зоны являются источниками возникновения упругих колебаний. Таким образом, генерирование сигналов АЭ происходит в трех зонах (рис. 4):

- первая зона сдвига (*I*) содержит информацию про пластическую и (в меньшей степени) упругую деформацию в зоне сдвига;
- зона вторичной деформации (*II*) представляет собой контакт образовавшейся стружки с передней поверхностью инструмента;
- третья зона (*III*) – поверхность раздела резец–обработанная деталь.

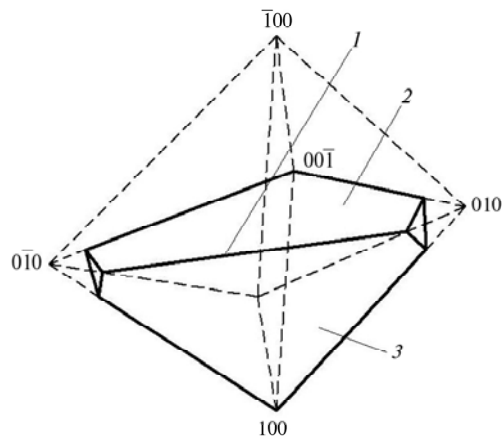


Рис. 3. Схема ориентации режущих кромок резца в форме октаэдра: 1 – режущая кромка; 2 – передняя поверхность; 3 – задняя поверхность.

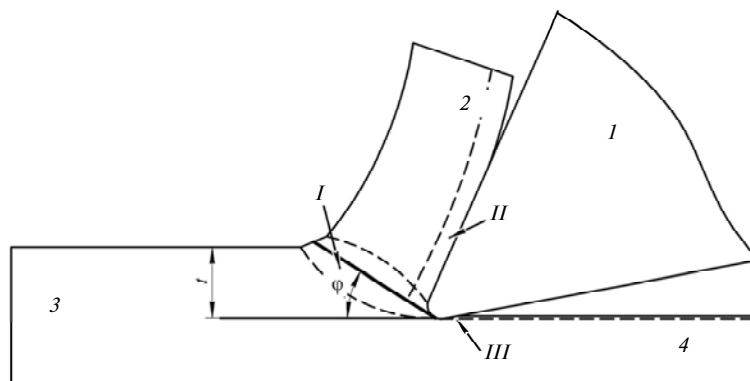


Рис. 4. Зоны возникновения сигналов АЭ при точении: зона сдвига (I), зона вторичной деформации (II), поверхность раздела резец–обработанная деталь (III), резец (1), стружка (2), заготовка (3), обработанная поверхность (4).

Учитывая требования, предъявляемые к алмазному тонкому точению, а именно – режущий клин должен быть максимально острым, можно минимизировать уровень сигнала АЭ из зоны III. Тем самым можно предположить, что при алмазном тонком точении основную роль играют зоны I и II генерирования сигнала АЭ. Таким образом, исследования наиболее часто направлены на изучение влияния задней поверхности резца на уровень сигнала АЭ [3], что характеризует износ резца по задней грани.

Большинство теоретических моделей генерации упругих волн АЭ при точении устанавливают роль режимов резания, в особенности скорости резания, на уровень среднеквадратического значения сигнала АЭ (AE_{RMS}) [11].

В нашей работе моделирование АЭ производили на основе известной модели процесса резания, предложенной Эрнстом и Мерчантом [12]. В данной работе, как и в нашей, модель – это корреляционная зависимость между энергией сигнала АЭ и свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, а также объемом материала, который срезается в процессе резания [2]. Уравнение для расчета работы в первичной зоне пластической деформации имеет вид [3]

$$\dot{w}_S = tS\tau_k \frac{\cos \gamma}{\sin \varphi \cos(\varphi - \gamma)} v, \quad (1)$$

где t – глубина резания, мм; S – подача, мм/мин; τ_k – прочность обработанного материала на сдвиг (контактное сдвиговое напряжение), ГПа; γ – передний угол, град; φ – угол сдвига, град; v – скорость резания, м/с.

Зависимости (2) и (3) позволяют рассчитывать работу в зоне II источников сигнала (\dot{w}_{c1} , \dot{w}_{c2}) и записываются следующим образом:

$$\dot{w}_{c1} = \frac{1}{3} \tau_k t (l - l_1) v_F \quad (\text{для зоны пластического контакта}); \quad (2)$$

$$\dot{w}_{c2} = \tau_k t l_1 v_F \quad (\text{для зоны упругого контакта}), \quad (3)$$

где l и l_1 – участки пластического и упругого контакта стружки с передней поверхностью инструмента соответственно; v_F – скорость трения стружки по передней поверхности инструмента, рассчитывается по формуле [13]

$$v_F = \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} v. \quad (4)$$

Комбинируя зависимости (1)–(3), на основе модели Эрнста и Мерчанта отношение между AE_{RMS} и параметрами резания можно записать в виде

$$AE_{RMS} = C \left\{ \tau_k t v \left[\frac{\cos \gamma}{\sin \varphi \cos(\varphi - \gamma)} s + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} \right] \right\}^{0.5}, \quad (5)$$

где C является константой, на которую влияют геометрия инструмента, предварительное усиление и т. д.

Данная модель позволяет рассчитать уровень сигнала AE_{RMS} в процессе токарной обработки при изменении скорости (при постоянной глубине резания и подаче), но получаемые зависимости оценки сигнала AE_{RMS} от глубины и подачи являются не точными. Результаты исследования Пэна и Дорнфельда [14] при алмазном точении различных материалов показали лучшую корреляцию между данными, полученными по модели и экспериментальными зависимостями. Это связано в некоторой степени с уменьшением площади контакта инструмента с заготовкой. При этом уменьшается трение при обработке. Пэн и Дорнфельд в [14] модифицировали модель из [3], учитывая влияние трения по задней поверхности (зона III). Таким образом, в данной модели учтена составляющая $\tau_k t v w$ (где w – длина контакта по задней поверхности резца с заготовкой). Тогда зависимость (5) учитывает третью составляющую при регистрации AE_{RMS} , кроме того, показатель степени в уравнении (5) становится переменным. Таким образом, уравнение (5) было записано в виде

$$AE_{RMS} = C_1 \left\{ \tau_k t v \left[C_2 \frac{\cos \gamma}{\sin \varphi \cos(\varphi - \gamma)} s + C_3 \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} + C_4 w \right] \right\}^m, \quad (6)$$

где коэффициент C_1 отвечает за уровень усиления сигнала АЭ; C_2 , C_3 и C_4 являются факторами уровня сигнала и соответствуют источникам сигнала в зонах I, II, III; m , в свою очередь, зависит от коэффициента трения материала. На основании экспериментов, проведенных Лэнгом и Дорнфельдом, значение C_2 находилось в диапазоне 0,20–0,25, а C_3 и C_4 были равными единице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведенных авторами исследований по измерению акустической эмиссии при точении природным и синтетическим монокристаллическими резцами были получены зависимости амплитуды акустической эмиссии от скорости резания (рис. 5), а также от подачи (рис. 6). На всех графиках виден характерный рост сигнала AE_{RMS} с увеличением скорости и подачи. На рис. 5 видно, что уровень сигнала для резца, оснащенного природным монокристаллом алмаза, примерно в 3 раза ниже, чем при точении синтетическим алмазным резцом. При изменении подачи (см. рис. 6), уровень сигнала при точении природным алмазным резцом в 1,5 раза ниже, чем синтетическим. Это различие вызвано, очевидно, отличием свойств природного и синтетического алмазов [10].

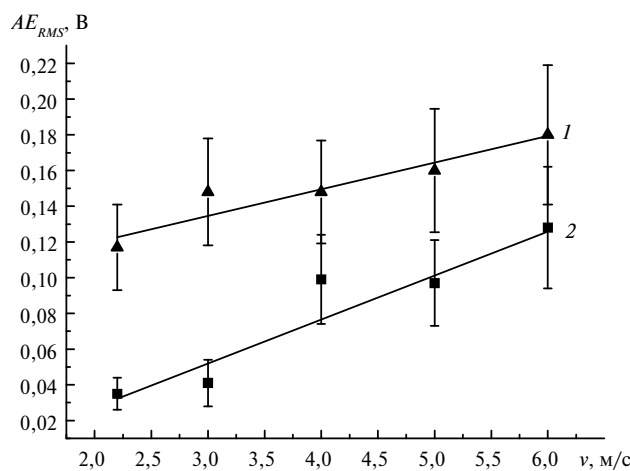


Рис. 5. Влияние скорости резания на AE_{RMS} при точении природным (1) и синтетическим (2) алмазами; режим резания: $t = 100$ мкм, $v = 4$ м/с, $S = 9$ мм/мин, $n = 1450$ об/мин.

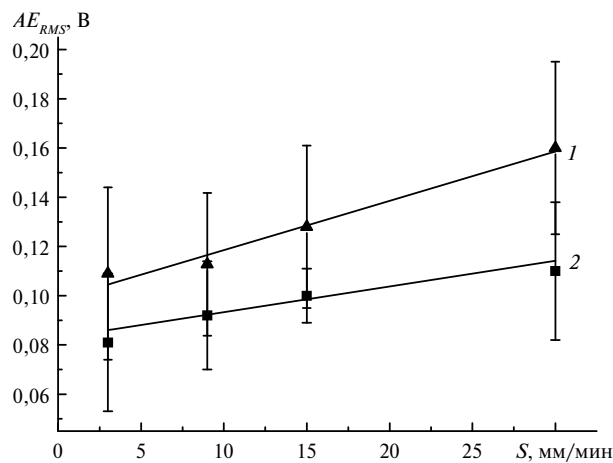


Рис. 6. Влияние подачи на AE_{RMS} при точении природным (1) и синтетическим (2) алмазом; режим резания: $t = 100$ мкм, $v = 4$ м/с, $n = 1450$ об/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для проведения аналитических расчетов коэффициентов по полученным авторами экспериментальным данным была использована модель Пэна и Дорнфельда [14] для процесса алмазного точения. Коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 были получены методом наименьших квадратов. Для определения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента использовали формулу (7) из [14]:

$$l = 1,45t \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{\operatorname{tg} \varphi} - \cos \gamma + \sin \gamma \right). \quad (7)$$

Влияние скорости резания на сигнал AE_{RMS} показано на рис. 7 и 8. Как видно из графика, данная модель показала свою эффективность при расчете сигнала в процессе алмазной обработки алюминиевых сплавов. В результате проведенных исследований определены коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 для природного и синтетического алмазов: $C_1 = 0,02, C_2 = 0,25, C_3, C_4 = 1, m = 1,1, \tau_k = 0,1$ ГПа (природный алмаз); $C_1 = 0,07, C_2 = 0,8, C_3 = 1,2, C_4 = 1,3, m = 0,55, \tau_k = 0,1$ ГПа (синтетический алмаз).

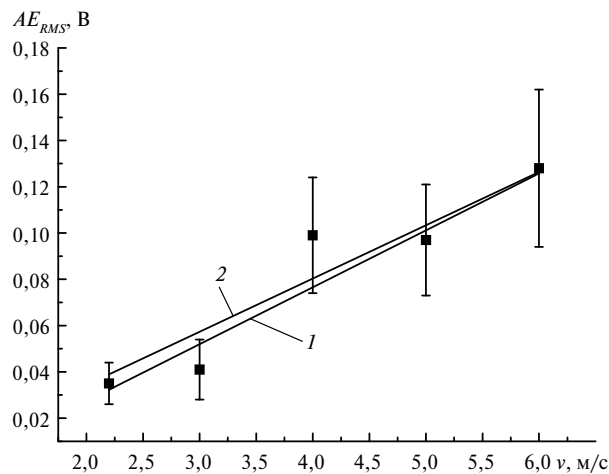


Рис. 7. Влияние скорости резания на AE_{RMS} при точении природным алмазом: 1 – экспериментальные данные, полученные в процессе обработки; 2 – расчет по корреляционной модели из [14]; режим резания: $t = 100$ мкм, $S = 9$ мм/мин, $n = 1450$ об/мин.

Таким образом, модель для природного алмаза описывается зависимостью

$$AE_{RMS} = 0,02 \left\{ \tau_k t v \left[0,25 \frac{\cos \gamma}{\sin \varphi \cos(\varphi - \gamma)} s + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} + w \right] \right\}^{1,1}. \quad (8)$$

Теоретическая и экспериментальная зависимости влияния подачи на AE_{RMS} при точении природным алмазом показаны на рис. 9, синтетическим – на рис. 10. Как видно на рис. 9 и 10, с увеличением подачи уровень сигнала растет примерно в 1,5 раза.

На рис. 11 приведены теоретические зависимости влияния глубины резания на уровень сигнала АЭ при точении природным и синтетическим монокристаллами алмаза. Как видно на рис. 12, сигнал АЭ при увеличении глубины резания с 10 до 100 мкм увеличился примерно в 10 раз для природного

алмаза и в 4 раза для синтетического. Такой расчет соответствует экспериментальным данным, что подтверждает правильность моделирования уровня сигнала по данной модели.

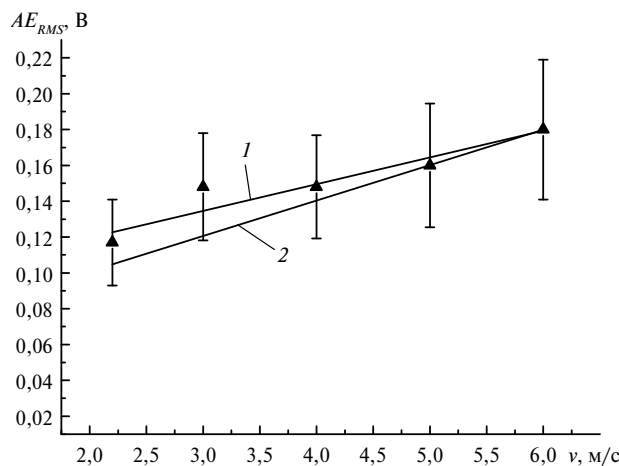


Рис. 8. Влияние скорости резания на AE_{RMS} при точении синтетическим алмазом: 1 – экспериментальные данные, полученные в процессе обработки; 2 – расчет по корреляционной модели из [14]; режим резания: $t = 100$ мкм, $S = 9$ мм/мин, $n = 1450$ об/мин.

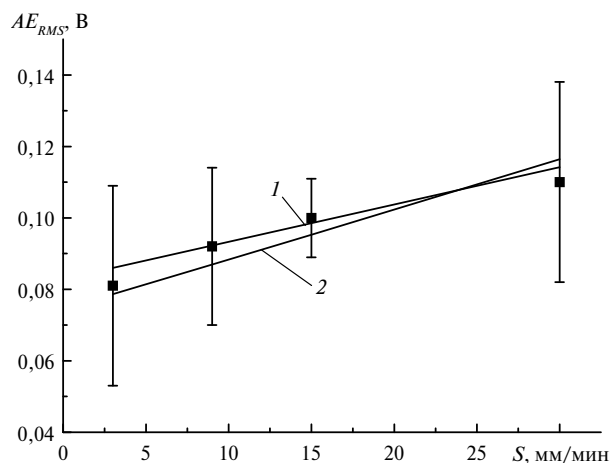


Рис. 9. Влияние подачи на AE_{RMS} при точении природным алмазом: 1 – экспериментальные данные, полученные в процессе обработки; 2 – расчет по корреляционной модели из [14]; режим резания: $v = 4$ м/с, $t = 100$ мкм, $n = 1450$ об/мин.

ВЫВОДЫ

С использованием корреляционной модели уровня сигналов акустической эмиссии при обработке алюминиевого сплава алмазными монокристаллическими резцами (природным и синтетическим) показано, что уровень сигнала АЭ для природного алмаза примерно в 3 раза ниже, чем для синтетического. Можно предположить, что процессы в зоне контакта задней поверхности инструмента с поверхностью резания имеют разный характер для синтетического и природного алмазов и, как следствие этого, у них разные значения коэффициента трения. При изменении подачи уровень сигнала при точении резцом из природного алмаза в 1,5 раза ниже, чем при обработке резцом из

синтетического алмаза. Во всем диапазоне изменения режимов резания увеличение скорости резания, подачи и глубины резания приводит к росту уровня сигнала АЭ.

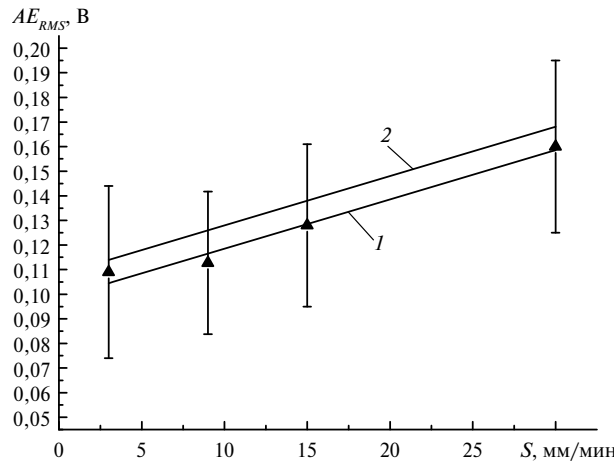


Рис. 10. Влияние глубины резания на AE_{RMS} при точении синтетическим алмазом: 1 – экспериментальные данные, полученные в процессе обработки, 2 – расчет по корреляционной модели из [14]; режим резания: $v = 4$ м/с, $t = 100$ мкм, $n = 1450$ об/мин.

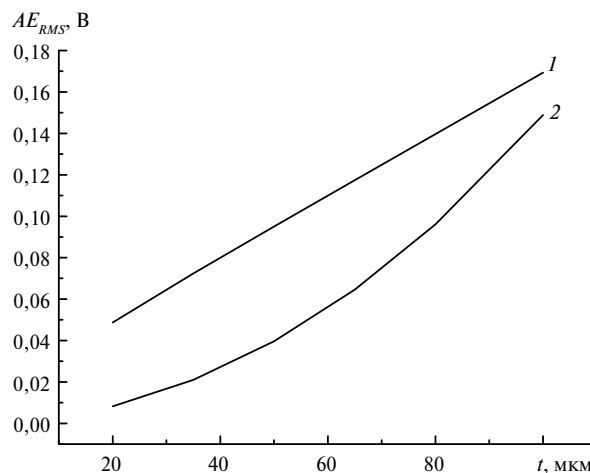


Рис. 11. Теоретические зависимости влияния подачи резания на AE_{RMS} при точении природным (1) синтетическим (2) кристаллами алмаза; режим резания: $v = 6$ м/с, $n = 1450$ об/мин, $S = 15$ мм/мин, $\gamma = 0^\circ$.

За допомогою методу акустичної емісії діагностували процес різання алюмінієвого сплаву. При дослідженні було використано різці з монокристалів природного і синтетичного алмазу. Порівняльний аналіз показав справедливість кореляційної моделі акустичної емісії Пена і Дорнфельда для умов тонкого алмазного точіння алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: акустична емісія, модель акустичної емісії, алмазне точіння.

The process of cutting of an aluminum alloy has been monitored by the acoustic emission method. Single-crystal natural and synthetic diamond tools have been used in the investigation. The comparative analysis has demonstrated that the correlation model of

acoustic emission, which was put forward by C. S. Pan and D. A. Dornfeld, is valid for the conditions of fine diamond turning of aluminum alloys.

Keywords: acoustic emission, acoustic emission model, diamond turning.

1. Kannatey-Asibu Jr. E., Dornfeld D. A. A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting acoustic emission // *Wear*. – 1982. – **76**. – P. 247–261.
2. Kannatey-Asibu Jr. E., Dornfeld D. A. Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting // *ASME, J. Eng. Industry*. – 1981. – **103**. – P. 330–340.
3. Lan N. S., Dornfeld D. A. Acoustic emission and machining-process analysis and control // *Adv. Manuf. Process*. – 1986. – **1**. – P. 1–21.
4. Teti R., Dornfeld D. A. Modeling and experimental analysis of acoustic emission from metal cutting // *J. Eng. Industry*. – 1989. – **111**. – P. 229–237.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Девин Л. Н., Сулима А. Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания // *Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД)*. – 2008. – № 3. – С. 24–26.
9. Круглов Г. А. *Обработка алмазными резцами деталей приборов*. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 225.
10. Новиков Н. В. *Физические свойства алмаза: Справ.* – К.: Наук. думка, 1987. – 188 с.
11. Девин Л. Н., Рычев С. В. Экспериментальное исследование влияния инструментального материала и режимов тонкого точения на уровень сигналов акустической эмиссии // *Сверхтв. материалы*. – 2016. – № 1. – С. 67–74.
12. Cook N. H. *Manufacturing analysis*. – Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Ma, 1986.
13. Розенберг Ю. А. *Резание металлов*. – Курган: Полиграф. комбинат “Зауралье”, 2007. – 292 с.
14. Pan C. S., Dornfeld D. A. Modeling the diamond-turning process with acoustic emission for monitoring applications // *Proc. 14th NAMRC, University of Minnesotam Minneapolis*. – 1986. – P. 257–265.

Поступила 27.01.16