



Філоненко С. Ф., Німченко Т. В.
Національний авіаційний університет. Україна, Київ

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ ТОЧІННЯМ

Анотація

Розглянуто модельні і реальні результуючі сигнали акустичної емісії, які формуються при механічній обробці матеріалів точінням.

Показано, що сигнали характеризуються деяким середнім рівнем амплітуди та величиною її розкиду і мають порізану форму.

Визначено, що із зростанням об'єму матеріалу, що вступає у пластичну деформацію і площі руйнування відбувається зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу акустичної емісії і величини її розкиду.

Показано, що результати експериментальних досліджень мають добре узгодження із результатами моделювання сигналів акустичної емісії.

Abstract

The model and real resulting acoustic emission signals, which forming at machine work of materials cutting are reviewed.

Is shown, that the signals are characterized by some average level of amplitude and value of its dispersion and have the bluffy form.

Is determined, that at increase of a volume of material, which one enters of plastic deformation and areas of fracture there is ascending an average level the amplitude of resulting acoustic emission signal and value of its dispersion.

Is shown, that the outcomes of experimental researches have the good coordination with outcomes of acoustic emission signals simulation.

Постановка проблеми

Процес різання представляє собою складну сукупність фізико-механічних процесів, спрямованих на деформування і руйнування визначеного шару матеріалу. При протіканні процесів деформування і руйнування матеріалів, як відомо, виникає акустичне випромінювання або акустична емісія (АЕ). Однак значна кількість досліджень показує, що при різанні металів джерелами сигналів АЕ, крім зазначених вище, можуть бути такі процеси як сходження стружки, тертя на контактних поверхнях ріжучого клину та інші. Однак всі дані процеси відрізняються за своєю енергетикою. Безумовно, що, з енергетичної точки зору, переважними є процеси пластичного деформування і руйнування матеріалу при

різанні. За таких умов, переважними повинні бути і, відповідні даним процесам, процеси акустичного випромінювання. Це припущення, підтверджується значною кількістю результатів дослідження АЕ при різанні матеріалів, у яких показано зміну акустичного випромінювання при зміні параметрів процесу різання. Практично досліджуються усереднені амплітуди результуючого сигналу АЕ, що обумовлено складністю його форми. Відсутність теоретичних обґрунтувань формування результуючого сигналу АЕ при різанні матеріалів ускладнює пошук закономірностей акустичного випромінювання при проведенні експериментальних досліджень і значно збільшує їх обсяг. Безумовно, що роботи в цьому напрямку є вкрай важливими для розробки методів контролю і діагностики процесів різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження АЕ при різанні металів проводяться на протязі більше 30 років. Однак основні опубліковані роботи відносяться до експериментальних досліджень АЕ [1–6]. Дослідження, які проводилися, були спрямовані на вивчення механізмів, що генерують сигнали АЕ, пошуку зв'язку АЕ із процесами формування різного виду стружки, виникненню тріщин у ріжучому інструменті, появи у ньому сколів або його руйнування, впливу фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів та параметрів різання на параметри акустичного випромінювання тощо. При цьому проводився аналіз амплітуди вихідного сигналу, середньо квадратичного значення амплітуди (СКЗ АЕ – АЕ RMS), спектру ресстрованого сигналу, а також інтенсивності і швидкості рахунку для деякого порогу обмеження. Слід відмітити, що СКЗ АЕ є основним досліджуваним параметром при обробці сигналів АЕ. За результатами проведених досліджень процесів різання різних матеріалів визначена значна кількість лінійних і не лінійних залежностей параметрів АЕ від параметрів різання – швидкості різання, глибини різання, швидкості повздовжньої подачі, ширини різання, тертя інструменту, кутів різання, вібрації інструменту тощо. Однак, як відмічено у роботі [7], отримані залежності іноді протилежні одна одній, що ускладнює узагальнення результатів.

Аналогічний стан питань спостерігається і у результатах теоретичних досліджень АЕ при різанні. В основі побудови моделі зміни АЕ або СКЗ АЕ покладено припущення, що енергія АЕ пропорційна

енергії, що затрачується на різання [8]. Якщо матеріал піддається дії постійного напруження (σ) і швидкості деформації ($\dot{\epsilon}$), то робота (W), що затрачується на пластичну деформацію, визначається у вигляді

$$W = \sigma \dot{\epsilon} V, \quad (1)$$

де V — об'єм матеріалу, що вступає у пластичну деформацію.

Оскільки пластична деформація є джерелом акустичного випромінювання, і, вважаючи, що між роботою на пластичну деформацію і енергією АЕ є прямо пропорційний зв'язок, то цей зв'язок описується виразом

$$RMS^2 = C_1(\sigma \dot{\epsilon} V), \quad (2)$$

де C_1 — коефіцієнт пропорційності.

На основі цього, з урахуванням параметрів різання, у роботі [8] отримано вираз для зміни СКЗ АЕ при різанні у вигляді

$$RMS = C_1 C_2 \times \left\{ \tau_k t' v \left(\frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma)} f + \frac{1}{3} (\ell + 2\ell_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

де τ_k — напруження зсуву;
 t' — глибина різання;
 v — швидкість різання;
 ϕ — кут зсуву;
 γ — передній кут інструменту;
 ℓ — довжина зони контакту інструмент-стружка;
 ℓ_1 — довжина зони схоплювання стружки із інструментом;
 f — швидкість поперечної подачі;
 C_1, C_2 — постійні коефіцієнти.

Як відмічено у роботі [3], модель, згідно (3), не мала добре узгодження із результатами експериментальних досліджень, що привело до уточнення виразу (3) у вигляді [9]

$$RMS = C_3 \left\{ \tau_k t' v \left(C_4 \frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma)} f + \frac{1}{3} C_5 (\ell + 2\ell_1) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} + C_6 \ell_b \right) \right\}^m, \quad (4)$$

де ℓ_b — довжина границі контакту задньої поверхні інструменту із деталлю;
 C_3 — коефіцієнт пропорційності;

C_4, C_5, C_6 — коефіцієнти, які враховують загасання сигналу між зоною зсуву, границею контакту стружки із інструментом, зоною тертя і датчиком АЕ;
 m — постійна матеріалу.

В той же час, значна кількість експериментальних досліджень показала відмінність або не значну узгодженість закономірностей зміни СКЗ АЕ із (4) при дії різних факторів — швидкості різання та поперечної подачі, глибини різання, переднього кута різання тощо. Тому при різанні матеріалів увагу приділяють стохастичним моделям АЕ й обробці імовірнісних характеристик АЕ, включаючи й характеристики вищого порядку [3, 10, 11].

Для стохастичних моделей АЕ характерним є розгляд не фізичних процесів та причин, що породжують АЕ, а розгляд сигналу на виході приймального датчика. При цьому передбачається, що сигнал АЕ є результатом протікання в матеріалі значної кількості деяких подій, кожна з яких протікає на протязі малого проміжку часу. Іншими словами результуючий сигнал АЕ, в загальному випадку, представляється як сума потоку випадкових імпульсних сигналів [12, 13]

$$U(t) = \sum_i A_i F_i(t - t_i), \quad (5)$$

де A_i — амплітуда імпульсу, який з'являється в момент часу t_i ;
 F_i — характеристика форми одиночного імпульсу. Сумування відбувається за кількістю імпульсів n .

При цьому вважається, що форма сигналу споконвічно є однаковою і відомою [14–16]. Однак параметри одиночного сигналу АЕ не мають зв'язку ні з фізико-механічними характеристиками матеріалів, ні з параметрами процесів, що протікають. За таких умов, стохастичний підхід передбачає визначення деякої кількості статистичних характеристик, зміну значень яких досліджують при дії переважного фактору у процесі різання.

У той же час, відомо [7], що при різанні матеріалів основними джерелами, які генерують АЕ, є пластична деформація і руйнування. Оскільки дані процеси, згідно існуючих уявлень [17], є переважними при різанні матеріалів, то мікромоделі формування сигналів АЕ, які розглянуто у роботах [18–20], можуть бути застосовані для побудови моделі результуючого сигналу АЕ, який виникає при різанні.

Задачі дослідження

В роботі буде показано, що мікромоделі сигналів АЕ, що описують формування сигналів при протіканні пластичної деформації і руйнуванні, дозволяють



описати результуючий сигнал АЕ, який формується при різанні матеріалів. Також буде показано, що теоретичний результуючий сигнал АЕ при різанні є безперервним сигналом із порізаною формою. Він характеризується деяким середнім рівнем амплітуди і величиною її розкиду, яка зростає при збільшенні глибини різання. Буде показано, що отримані результати мають добре узгодження із експериментальними сигналами АЕ, параметри яких при збільшенні глибини різання мають аналогічні закономірності зміни.

Результати досліджень

При дослідженні процесів деформування й руйнування матеріалів в роботі [18] отримано математичний опис сигналів АЕ, які формуються при протіканні даних процесів, у вигляді
— при протіканні пластичної деформації визначеного об'єму матеріалу

$$U_p(t) = u_0 \alpha t \exp(-Bat), \quad (6)$$

$$\text{де } u_0 = a_0 M \frac{v_D}{\ell} \delta_D$$

— максимальна амплітуда зміщення при миттєвому вступі заданого об'єму матеріалу із визначеними фізико-механічними характеристиками у пластичну деформацію;

a_0 — амплітудне значення одиночного імпульсу збурення, який формується одиночною рухомою дислокацією;

δ_D — середня тривалість одиночного імпульсу збурення;

v_D — швидкість руху дислокації;

ℓ — відстань, яку проходить дислокація;

M, B — параметри, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу і характеризують щільність рухомих дислокацій від деформації (M пов'язаний із кількістю дислокацій і пропорційний об'єму матеріалу, що вступає у пластичну деформацію);

α — швидкість навантаження;

— при руйнуванні визначеної площі матеріалу

$$U_r(t) = U_0 \alpha^3 t^2 \exp(-bat), \quad (7)$$

$$\text{де } U_0 = N_0 ck$$

— максимальна амплітуда зміщення при миттєвому руйнуванні заданої площі матеріалу із визначеними фізико-механічними характеристиками за міцністю;

N_0 — середня тривалість одиночного імпульсу збурення;

k — коефіцієнт пропорційності;

c, b — коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу за міцністю і характеризують розподіл елементарних об'ємів, що руйнуються, за міцністю;

α — швидкість навантаження.

З фізичної точки зору [17], процес різання представляє собою динамічний процес послідовного деформування і руйнування матеріалу. Тому результуючий сигнал АЕ при протіканні даних процесів можна записати у вигляді суми формованих сигналів

$$U_p(t) = \sum_j U_d(t-t_j) + \sum_i U_r(t-t_i), \quad (8)$$

де t_j, t_i — моменти часу появи сигналів АЕ від пластичної деформації U_d , згідно (6), та руйнування U_r , згідно (7).

Згідно виразів (6), (7) та (8), слід, що при формуванні результуючого сигналу АЕ можуть бути враховані параметри різання, які створюють визначений сценарій розвитку процесів — постійність одних параметрів і зміна інших. При цьому швидкість різання або обертання деталі відповідає швидкості навантаження і впливає на проміжки часу появи сигналів АЕ від пластичної деформації і руйнування. На проміжки часу може впливати й швидкість повздовжньої подачі. Глибина різання пов'язана з об'ємом матеріалу, що вступає у пластичну деформацію і площею руйнування. В той же час, слід відмітити, що дані параметри мають свій окремий вплив на параметри формованих сигналів АЕ. З енергетичної точки зору, цей вплив на параметри сигналу від пластичної деформації й руйнування різний. На рис. 1, a, b наведено результати моделювання сигналів АЕ, відповідно до (6) і (7), у вигляді зміни амплітуди від часу у відносних одиницях. При моделюванні параметри, що входять у вирази (6) і (7) приведені до безрозмірних величин, а час нормований на час введення навантаження. При цьому параметри b і B прийняті рівними: $b = 15; B = 10$. Параметр b завжди $b \gg 1$, оскільки для матеріалу із заданими фізико-механічними характеристиками елементарні об'єми, що руйнуються, мають малий розкид за міцністю. Ми прийняли $B < b$, тому що величина деформації при пластичній течії матеріалу значно більша ніж при утворенні тріщини. Параметр змінювався у діапазоні величин від 100 до 200. При розрахунках вважалося, що деформується одиничний об'єм матеріалу та руйнується одинична площа.

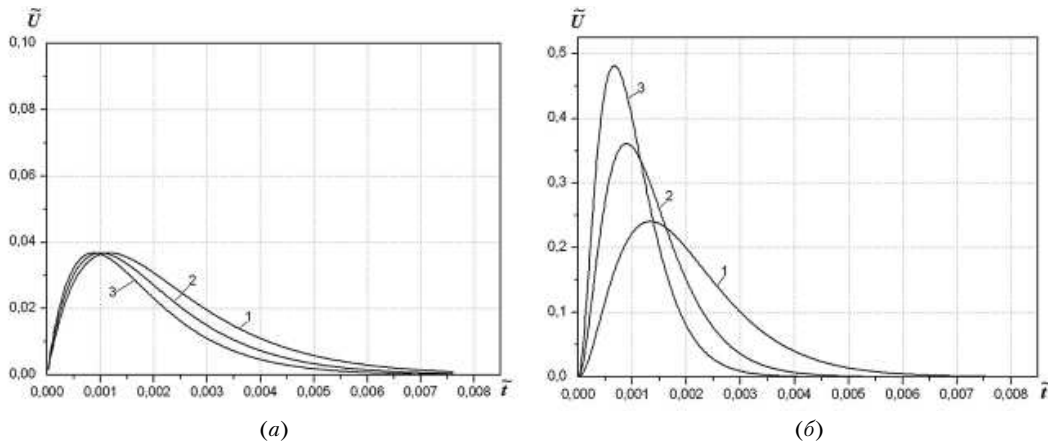


Рис. 1. Сигнали акустичної емісії при протіканні у матеріалі пластичної деформації (а), згідно (6), і руйнуванні (б), згідно (7), у відносних одиницях для різних швидкостей навантаження: 1 – $\alpha = 100,0$; 2 – $\alpha = 150,0$; 3 – $\alpha = 200,0$

Із рис. 1 видно, що при однакових умовах навантаження параметри сигналів АЕ при деформуванні одиничного об'єму матеріалу і руйнуванні одиничної площі різняться. При цьому збільшення швидкості деформування та руйнування приводить до стиснення сигналів. Однак амплітуда сигналу АЕ від пластичної деформації не зростає. Такий результат закономірний, оскільки для заданого об'єму матеріалу не залежно від швидкості деформування кількість рухомих дислокацій є не змінною, а при руйнуванні буде зростати кількість елементарних об'ємів, що руйнуються в одиницю часу. Якщо розглядати процес різання, то різниця параметрів формованих сигналів АЕ, які відповідають процесам, що протікають у матеріалі, буде впливати на параметри результуючого сигналу АЕ, згідно (8). При цьому форма результуючого сигналу АЕ та його параметри будуть залежати не тільки від параметрів індивідуальних сигналів але й умов їх перекриття у часі, що безпосередньо пов'язано із параметрами процесу різання, які визначають об'єм матеріалу, що вступає у пластичну деформацію та його руйнування, а також швидкість протікання даних процесів.

На рис. 2 наведено результати моделювання результуючих сигналів АЕ, згідно (8), в часі у відносних одиницях при умові послідовного протікання процесів пластичної деформації і руйнування. При проведенні розрахунків параметри, що входять у вирази (6) і (7) приведені до безрозмірних величин. Значення параметрів b , B і α були прийняті рівними: $b = 15$; $B = 10$; $\alpha = 150$. Проміжки часу між появами індивідуальних сигналів у відносних одиницях задавалися у вигляді $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,002 + \delta$, де величина δ змінювалася у діапазоні величин від 0,0 до 0,0005 довільним чином. При моделюванні вважалося, що змінюється глибина різання, тобто зростає об'єм матеріалу, який вступає у пластичну деформацію, і площа руйнування, відповідно у 2 рази (рис. 2, б) і 3 рази (рис. 2, в), відносно початкових значень (рис. 2, а), які були прийняті рівними одиниці, у відносних величинах.

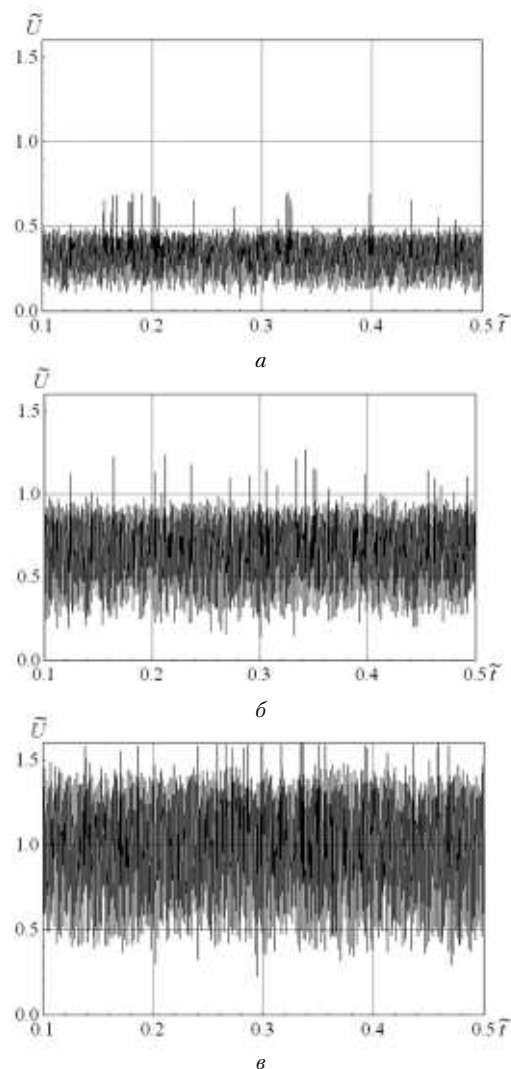


Рис. 2. Модельні результуючі сигнали акустичної емісії, згідно (8). Параметри моделювання: $\alpha = 150$; $b = 15$; $B = 10$. Проміжок часу появи сигналів АЕ – $\Delta \tilde{t}_{ij} = 0,002 + \delta$, δ змінювалося довільним чином у діапазоні величин від 0,0 до 0,0005. Об'єм матеріалу, який вступає у пластичну деформацію, і площа руйнування у відносних величинах: а – 1; б – 2; в – 3

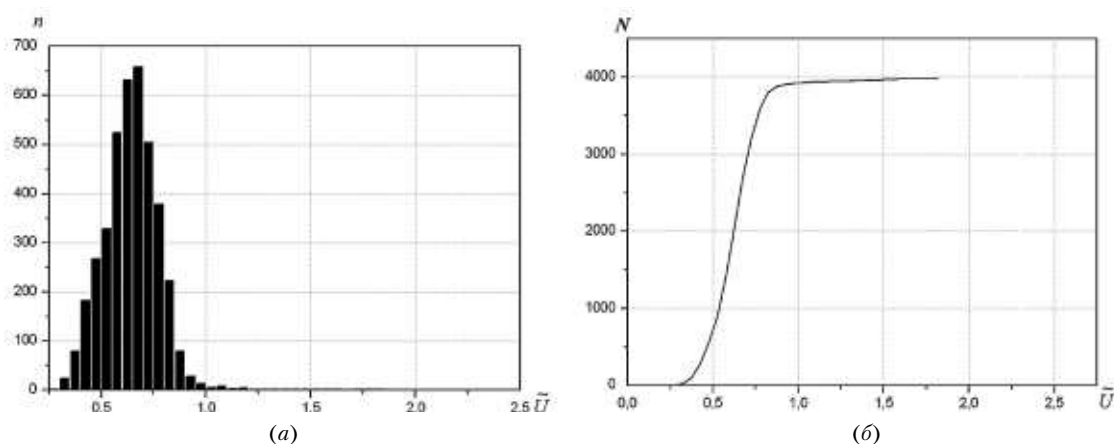


Рис. 3. Розподіл (а) і функція розподілу (б) розрахункових амплітуд результуючого сигналу акустичної емісії, який наведено на рис. 2, б. Довжина вибірки 4000 аналізованих амплітуд

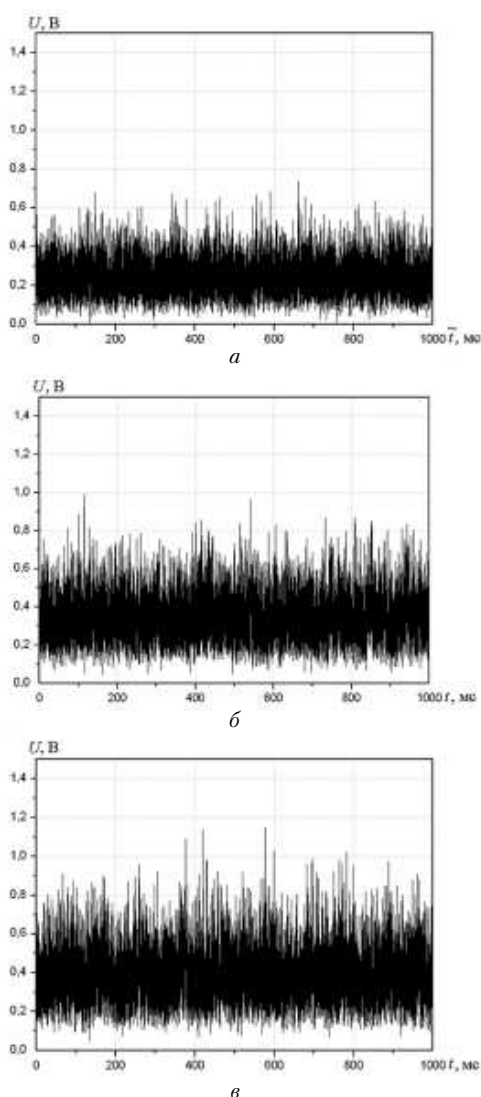


Рис. 4. Фрагменти зареєстрованих результуючих сигналів акустичної емісії при точінні алюмінію марки АЛ-25 із використанням алмазно-твердосплавного різця. Швидкість обертання деталі — $v = 1400 \text{ хв}^{-1}$, поперечна подача різця — 150 мм/хв . Глибина різання: а — $0,1 \text{ мм}$; б — $0,2 \text{ мм}$; в — $0,3 \text{ мм}$

Результати моделювання показали, що за умови постійності швидкості різання і швидкості повздожньої подачі при обробці матеріалу із заданими фізико-механічними характеристиками збільшення глибини різання (збільшення об'єму матеріалу, що вступає у пластичну деформацію і руйнується) слід очікувати зростання середнього рівня амплітуди результуючого сигналу АЕ і величини її розкиду (рис. 2). Дійсно, статистичний аналіз отриманих даних показав, що розподіл розрахункових амплітуд (рис. 3) для всіх результуючих сигналів АЕ (рис. 2, а, б, в) на довжині вибірки (аналізу), яка складала 4000 аналізованих точок, із імовірністю 0,95 описується нормальним законом. На рис. 3 наведено розподіл і функція розподілу розрахункових амплітуд результуючого сигналу акустичної емісії, який наведено на рис. 2, б.

Аналіз результатів розрахунків показав, що медіани розподілів \tilde{U}_{md} , їх дисперсії \tilde{s}^2 і \tilde{s} стандартні відхилення складають, відповідно для даних:

- рис. 2, а — $\tilde{U}_{md1} = 0,34231$, $\tilde{s}_1^2 = 0,01126$, $\tilde{s}_1 = 0,10845$;
- рис. 2, б — $\tilde{U}_{md2} = 0,6839$, $\tilde{s}_2^2 = 0,04434$, $\tilde{s}_2 = 0,21058$;
- рис. 2, в — $\tilde{U}_{md3} = 1,021$, $\tilde{s}_3^2 = 0,10128$, $\tilde{s}_3 = 0,31824$.

Із отриманих даних слідує, що при збільшенні досліджуваного параметра у 2 рази відбувається збільшення медіани розподілу амплітуд у 2 рази, стандартного відхилення у 1,94 рази, а дисперсії у 3,94 рази. При збільшенні досліджуваного параметра у 3 рази відбувається збільшення медіани розподілу амплітуд у 2,98 рази, стандартного відхилення у 2,93 рази, а дисперсії у 9 разів.

На рис. 4 наведено експериментальні результуючі сигнали АЕ, які зареєстровано при точінні деталі із алюмінію марки АЛ-25. Деталь мала наступні розміри: початковий діаметр — $44,6 \text{ мм}$; довжина оброблюваної поверхні деталі — $16,25 \text{ мм}$. Точіння проводили на токарному гвинторізному верстаті типу ТПК-125 ВН. Е якості різця використовували алмазно-твердосплавний різець (АТР). При обробці деталі задавалися наступні режими точіння: швидкість

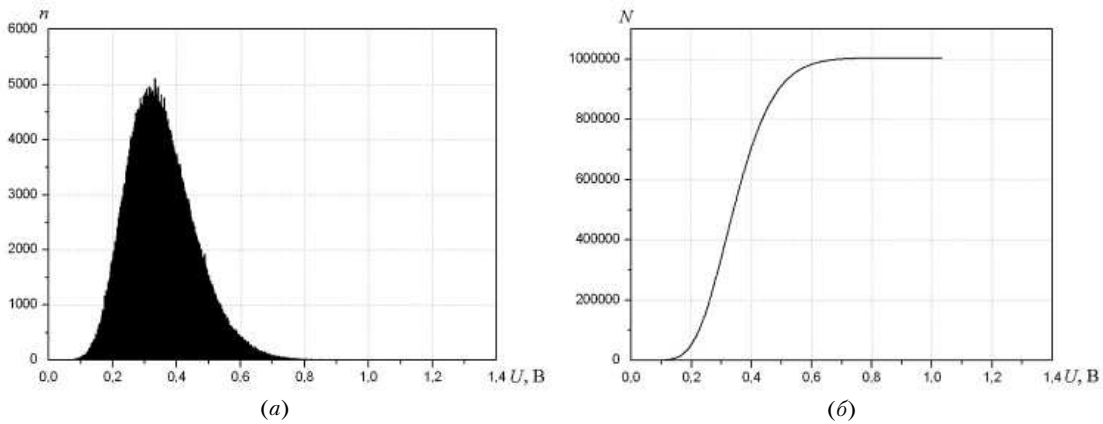


Рис. 5. Розподіл (а) і функція розподілу (б) амплітуд результуючого сигналу акустичної емісії при різанні алюмінієвого сплаву АЛ-25 алмазно-твердосплавним різцем для даних, що наведені на рис. 4, б. Глибина різання 0,2 мм. Довжина вибірки 10^6 аналізованих амплітуд

обертання деталі — $v = 1400 \text{ хв}^{-1}$, поперечна подача різця — 150 мм/хв , глибина різання складала: 0,1 мм; 0,2 мм; 0,3 мм. Слід відмітити, що аналогічні реєстровані результуючі сигнали АЕ за своїми формами наведено у результатах інших дослідників [21–23].

Із рис. 4 видно, що, як і передбачалося, при постійності швидкості обертання деталі і поперечної подачі різця із зростанням глибини різання спостерігається зростання середнього рівня амплітуд результуючих сигналів АЕ і величини їх розкиду. Дійсно, статистичний аналіз отриманих даних показав, що розподіл амплітуд (рис. 5) для всіх зареєстрованих результуючих сигналів АЕ (рис. 4, а, б, в) на довжині вибірки (аналізу) із імовірністю 0,95 описується нормальним законом. Довжина кожної вибірки складала 10^6 аналізованих амплітуд.

При цьому медіани розподілу U_{md} , їх дисперсії s^2 і s стандартні відхилення складають, відповідно для даних:

- рис. 4, а — $U_{md1} = 0,2466 \text{ В}$, $s_1^2 = 0,0063 \text{ В}^2$, $s_1 = 0,07937$;
- рис. 4, б — $U_{md2} = 0,3218 \text{ В}$, $s_2^2 = 0,01126 \text{ В}^2$, $s_2 = 0,1061 \text{ В}$;
- рис. 4, в — $U_{md3} = 0,376 \text{ В}$, $s_3^2 = 0,01403 \text{ В}^2$, $s_3 = 0,1185$.

Із отриманих результатів видно, що для заданих умов різання при збільшенні глибини різання у 2 рази відбувається збільшення медіани розподілу амплітуд у 1,31 рази, стандартного відхилення у 1,34 рази, а дисперсії у 1,8 рази. При збільшенні глибини різання у 3 рази відбувається збільшення медіани розподілу амплітуд у 1,53 рази, стандартного відхилення у 1,5 рази, а дисперсії у 2,23 рази. При цьому зростання досліджуваних параметрів, як і при моделюванні, відбувається практично за лінійним законом.

Проведені дослідження показують, що і у експерименті спостерігається зростання параметрів результуючого сигналу АЕ із збільшенням глибини різання. В той же час, як і при моделюванні, більш значне зростання спостерігається в розкиді амплітуд результуючих сигналів АЕ із збільшенням глибини різання, тобто їх дисперсії.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що мікро моделі сигналів АЕ, які формуються при протіканні в заданому об'ємі матеріалу пластичної деформації і руйнуванні заданої площі, можуть бути застосовані для опису формування результуючого сигналу АЕ при механічній обробці матеріалів точінням. Результати моделювання показали, що при точінні формований результуючий сигнал АЕ є неперервним сигналом із порізаною формою, який характеризується середнім рівнем амплітуди і величиною її розкиду. При зростанні об'єму матеріалу, який вступає у пластичну деформацію, і площі руйнування відбувається зростання середнього рівня амплітуд результуючих сигналів АЕ та величин їх розкиду (величин дисперсії та стандартного відхилення). Іншими словами, при зростанні глибини різання слід очікувати зростання даних параметрів. Показано, що такі зміни у параметрах формованих результуючих сигналів АЕ, а також порізаність їх форми обумовлені різницею у параметрах імпульсних сигналів АЕ, які формуються при протіканні пластичної деформації і руйнуванні матеріалу, та зміною умов їх перекриття у часі. Визначено, що розподіл розрахункових амплітуд формованих результуючих сигналів АЕ із імовірністю 0,95 описується нормальним законом. При цьому зростання параметрів результуючих сигналів АЕ із зростанням досліджуваного параметру відбувається за лінійним законом. Результати експериментальних досліджень АЕ при різанні алюмінієвого сплаву АЛ-25 показали, що реєстровані результуючі сигнали АЕ узгоджуються із результатами моделювання. Вони є безперервними сигналами, мають порізану форму і характеризується середнім рівнем амплітуди і величиною її розкиду. Визначено, що із зростанням глибин різання відбувається зростання середнього рівня амплітуд результуючих сигналів АЕ та величин їх дисперсії і стандартного відхилення.



При цьому зростання даних параметри із зростанням глибини різання практично також відбувається за лінійним законом. В той же час, існування опису результуючого сигналу АЕ при різанні дозволяє провести дослідження впливу і інших технологічних параметрів на формоване акустичне випромінювання.

Література

1. *Kannatey-Asibu E.J.* Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting / E. J. Kannatey-Asibu, D. A. Dornfeld // *ASME J. of Eng. for Indu.* — 1981. — V. 103. — P. 330–340.
2. *Roget J.* Application of acoustic emission to the automatic monitoring of tool condition during machining / J. Roget, P. Souquet, N. Gsib // *Material Evaluation. The American Society for NDT.* — 1988. — V. 46. — P. 225–229.
3. *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.
4. *Hu J.* Characteristics of acoustic emission signals in machining using diamond coated tools / J. Hu, F. Qin, K. Chou, R. G. Thompson // *MSEC / ICMP 2008: Proceedings of the 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference (October 7–10, 2008, Evanston, Illinois, USA).* — P. 1–8.
5. *Crosland D.* Changes in Acoustic Emissions When Cutting Different Rock Types / D. Crosland, R. Mitra, P. Hagan // *The AusIMM Illawarra Branch: Mat. the Underground Coal Operators' Conference (University of Wollongong, Australia, 12–13 February 2009).* — P. 329–339.
6. *Šipek M.* Application of acoustic emission for evaluation of tool wear in hard turning / M. Šipek, M. Nneslusan, M. Rosipal // *Int. J. of Engin.* — 2011. — V. IX. — No 1. — P. 27–32.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Farrelly F. A.* Statistical properties of acoustic emission signals from metal cutting processes / F. A. Farrelly, A. Petri, L. Pitolli, G. Pontualeb, A. Tagliani and P. L. Novi Inverardi // *J. Acoust. Soc. Am.* — 2004. — V. 116, No. 2. — P. 981–986.
11. *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.
12. *Иванов В. И.* Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений [В. И. Иванов, В. М. Белов]. — М: Машиностроение, 1981. — 184 с.
13. *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.
14. *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.
15. *Lei X.* Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compressing using acoustic emission monitoring / X. Lei, K. Kusunose // *J. of Geophys. Research.* — 2000. — v. 105. — № B3. — P. 6127–6139.
16. *Minozzi M.* Dynamic fracture model for acoustic emission / M. Minozzi, G. Caldarelli, L. Pietronero, S. Zapperi // *Eur. Phys. J. B.* — 2003. — № 36. — P. 203–207.
17. *Аршинов В. А.* Резание металлов и режущий инструмент. — М: Машиностроение, 1976. — 400 с.
18. *Бабак В. П.* Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов / В. П. Бабак, С. Ф. Филоненко, В. М. Калита // *Технологические системы.* — 2002. — №1 (12). — С. 26–34.
19. *Babak V. P.* Acoustic emission under temperature tests of materials / V. P. Babak, S. F. Filonenko, V. M. Kalita // *Aviation.* — v. IX, No 4. — 2005. — P. 24–28
20. *Филоненко С. Ф.* Физические аспекты акустической эмиссии при протекании пластической деформации / С. Ф. Филоненко // *Зб. наукових праць: Надтверді матеріали: створення та застосування. НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля.* — К.: 2007. — С. 131–138
21. *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.
22. *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.
23. *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. — No1–2. — P. 58–81.