

УДК 620.179:534.6

В.П. Бабак, д-р техн. наук, проф.,
С.Ф. Філоненко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
В.М. Каліта, канд. фіз.-мат. наук, доц.

МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ВИНИКНЕННІ В МАТЕРІАЛІ ТРІЩИН

Наведено результати моделювання сигналів акустичної емісії, які формуються при виникненні в матеріалі тріщин. Розглянуто трансформацію форми сигналів акустичної емісії залежно від умов розвитку тріщин.

Вступ. Розробка моделей формування сигналів акустичної емісії (АЕ) і моделювання процесів їхнього випромінювання є однією з найважливіших задач інтерпретації АЕ інформації. Таке моделювання спрямоване на формування уявлень про особливості сигналів АЕ залежно від механізмів процесів, що відтворюють дані сигнали [1; 2]. На основі таких уявлень можна здійснювати пошук відмінностей у сигналах АЕ і ідентифікувати процеси пластичної деформації та утворення тріщин, які розвиваються в матеріалах.

На основі уявлень механіки руйнування була розроблена модель сигналу АЕ, який формується при утворенні тріщини в процесі навантаження матеріалу [3]. При цьому вважалося, що матеріал у всьому об'ємі при його навантаженні деформується пружно і руйнується крихко в малій області неоднорідності. Математичний вираз сигналу АЕ від тріщини, яка розвивається у часі, має вигляд

$$U_r(t) = U_0 \delta_s \alpha^3 t^2 \exp(-b\alpha t), \quad (1)$$

де $U_0 = N_0 c k$ – максимальне можливе зміщення при руйнуванні бездисперсійного за міцністю σ_p матеріалу; N_0 – кількість елементарних імпульсів; c , b – коефіцієнти, які залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу; k – постійна, яка пов'язана з амплітудою елементарного імпульсу збурення, що формує сигнал АЕ; δ_s – тривалість елементарного імпульсу збурення, причому $\delta_s = \text{const}$; α – швидкість навантаження матеріалу.

Оскільки розподіл елементів за міцністю σ_p для зразків одного й того ж матеріалу однакових розмірів має маленький розкид по величині σ_p , то в моделі було взято $b \gg 1$. При моделюванні сигналу АЕ від тріщини в роботі [3] відповідно до виразу (1) було визначено, що зі збільшенням швидкості α відбувається стиснення сигналу і збільшення його амплітуди (енергії). При цьому вважалося, що розвиток тріщини відбувався зі швидкістю зміни зовнішнього навантаження. У реальних матеріалах, залежно від умов розвитку фронту тріщини, її зростання може відбуватися зі зміною швидкості. Умови розвитку фронту тріщини або умови її зростання, очевидно, будуть впливати на форму сигналу АЕ, який формується.

Моделювання сигналів АЕ від тріщини. Згідно з існуючим уявленням з підвищенням навантаження в локальній області неоднорідності матеріалу виникає поле підвищених напруг [4]. При сталій швидкості навантаження матеріалу α перші локальні осередки руйнування призводять до перерозподілу напруг на сусідні мікрооб'єми, що викликає підвищення швидкості росту тріщини без зміни загальної деформації матеріалу [4; 5]:

$$\alpha_r = \alpha + \alpha_1,$$

де α_1 – підвищення швидкості росту тріщини ($\alpha_1 \gg \alpha$).

Крім того, через випадковий розподіл міцності мікрооб'ємів руйнування розвивається нерівномірно, тобто з гальмуванням тріщини на перешкодах, наприклад, зернах, включеннях та ін. Її подальший розвиток відбувається при зростанні локальних напруг і з більшою швидкістю. Такий процес може розвиватися стрибкоподібно у часі.

Припустимо, що при навантаженні матеріалу в локальній області розвивається тріщина при умовах, які розглянуто в роботі [3]. Тріщина утворюється, якщо рівень прикладеної напруги досягає значення напруги руйнування. Припустимо, що при заданій швидкості навантаження після руйнування деякої кількості мікрооб'ємів відбувається перерозподіл механічних напруг на локальну область руйнування, що залишилася. Такий перерозподіл напруг призводить до росту швидкості утворення тріщини. Будемо вважати, що зміна швидкості росту тріщини відбувається при безперервній зміні механічних напруг. Припустимо, що початкове зростання тріщини відбувається зі швидкістю зміни напруг, яку умовно позначимо $\alpha_{\text{тн}}$. У певний момент часу t_1 відбувається зміна швидкості зростання тріщини до $\alpha_{\text{тк1}}$ і залишається постійною до зупинки тріщини.

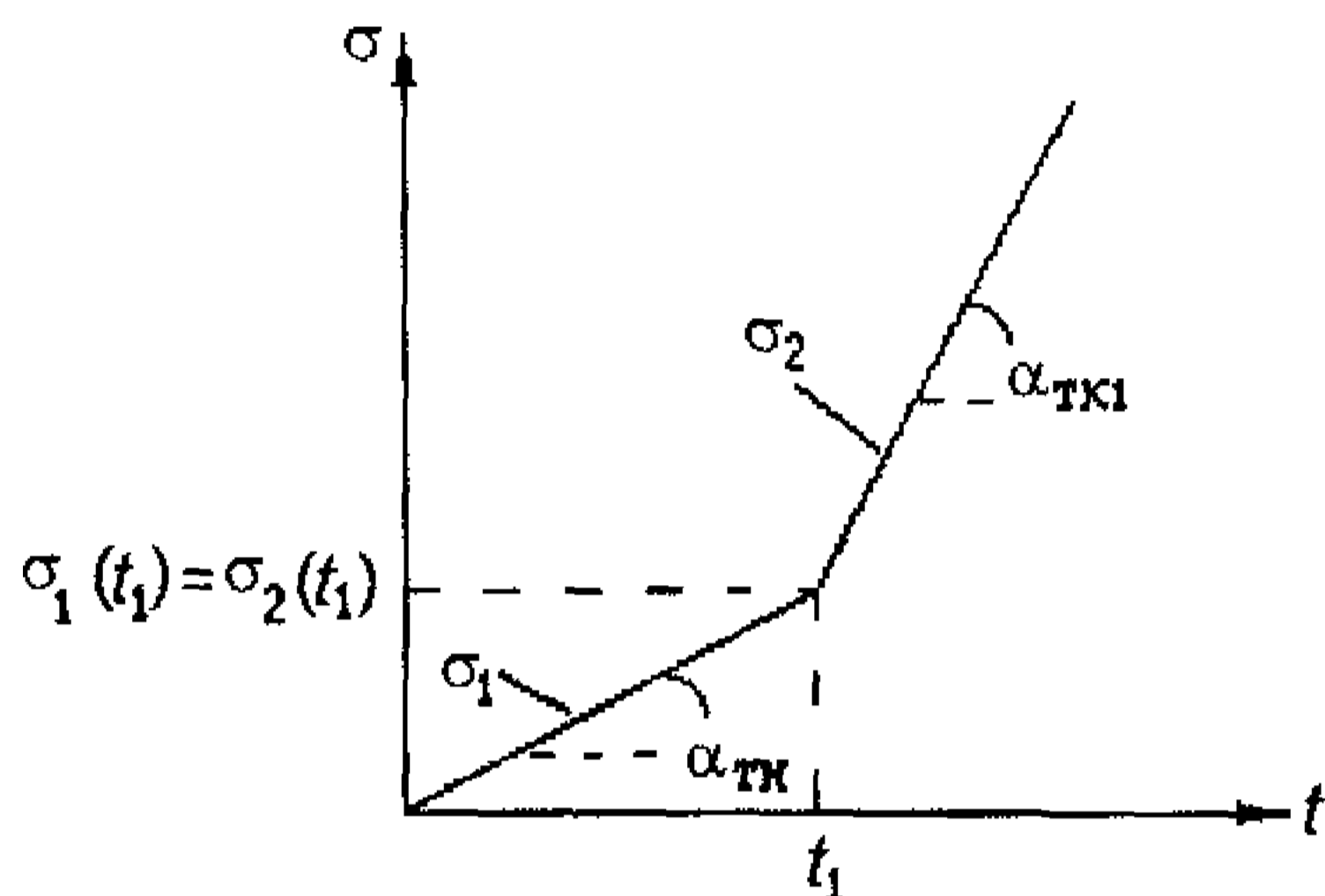


Рис. 1. Зміна напруг у локальній області неоднорідності

При цьому напруга на інтервалі $[0, t_1]$ змінюється лінійно:

$$\sigma_1(t) = \alpha_{\text{тн}} t, \quad t \in [0, t_1]. \quad (2)$$

Починаючи з моменту часу t_1 подальші зміни напруги описуються виразом

$$\sigma_2(t) = \alpha_{\text{тк1}} t - (\alpha_{\text{тк1}} - \alpha_{\text{тн}}) t_1 \quad \text{при } t \geq t_1. \quad (3)$$

Така зміна напруг відбувається безперервно, тобто в момент часу t_1 :

$$\sigma_1(t_1) = \sigma_2(t_1).$$

На рис. 1 показано графік зміни напруг відповідно до виразів (2) і (3). Швидкості $\alpha_{\text{тн}}$ та $\alpha_{\text{тк1}}$ до-

рівнюють тангенсу кута нахилу прямих зміни напруг. Отже, часовий хід сигналу АЕ на інтервалі часу $[0, t_1]$ буде описуватися виразом

$$U_T(t) = U_0 \delta_s \alpha_{\text{тн}}^3 t^2 \exp(-b \alpha_{\text{тн}} t) \quad \text{при } t < t_1.$$

Для часу $t \geq t_1$ сигнал АЕ буде описуватися виразом

$$U_T(t) = U_0 \delta_s \alpha_{\text{тк1}} [\alpha_{\text{тк1}} t - (\alpha_{\text{тк1}} - \alpha_{\text{тн}}) t_1]^2 \exp\{-b [(\alpha_{\text{тк1}} t - (\alpha_{\text{тк1}} - \alpha_{\text{тн}}) t_1)]\}.$$

Результати моделювання сигналів АЕ від тріщини показані на рис. 2. При побудові графіків (рис. 2) час нормовано до часу зміни напруги, що має постійне значення $t_{\text{мак}}$. Параметри α і b наведені в безрозмірних величинах. Рівень сигналів нормований на значення більшої амплітуди сигналів. При розрахунках значення b взято таким: $b=15$.

На рис. 2, а, б початкова швидкість тріщини $\alpha_{\text{тн}} = 5$, а на рис. 2, в, г – $\alpha_{\text{тн}} = 40$, $\tilde{U}_{\text{відн од}}$ – нормоване значення на $U_{\text{мак}}$, $\tilde{t}_{\text{відн од}}$ – нормоване значення на $t_{\text{мак}} = \text{const}$.

З отриманих результатів видно, що якщо тріщина розвивається зі сталою швидкістю, яка відповідає швидкості деформування (рис. 2, а, крива 1) або високій початковій швидкості її утворення (рис. 2, б, крива 1, рис. 2, в, г, крива 1), то сигнал АЕ має гладку форму. Якщо на початкових етапах руйнування тріщина розвивається зі швидкістю деформування, а в деякий момент часу t_1 відбувається збільшення її швидкості, яка залишається постійною до повного руйнування, то на сигналі АЕ спостерігається викид амплітуди сигналу АЕ і його стиснення (рис. 2, а, крива 2). Якщо на початковому етапі тріщина розвивається зі швидкістю деформування з подальшим її стрибкоподібним розвитком зі зростаючою швидкістю у декілька разів в моменти часу зміни швидкості руйнування t_1, t_2 (рис. 2, б, крива 2), то на передньому фронті сигналу спостерігається зміна крутості його нахилу. При цьому зміна крутості його нахилу фіксується в моменти часу, які відповідні моментам часу зміни швидкості розвитку тріщини.

На рис. 2, б сигнал АЕ 2 з підвищенням швидкості розвитку тріщини показаний на фоні сигналу 1, який формується при високій сталій швидкості її утворення ($\alpha_{\text{тн}} = \alpha_{\text{тк1}} = 40$). Для сигналу 2 початкова швидкість $\alpha_{\text{тн}} = 5$, а подальший розвиток тріщини відбувається зі швидкістю $\alpha_{\text{тк1}} = 15$, $\alpha_{\text{тк2}} = 40$. Кінцеве значення швидкості залишається сталою до зупинки тріщини.

Якщо утворення тріщини відбувається з високою початковою швидкістю, а потім вона збільшується і залишається сталою до повного руйнування, то на сигналі АЕ (рис. 2, в) спостерігається викид амплітуди і відбувається його стиснення. У випадку високої початкової швидкості утворення тріщини з подальшим її стрибкоподібним зростанням в декілька разів на передньому фронті сигналу АЕ спостерігаються перегини, а також відбувається стиснення сигналу (рис. 2, г).

Моделювання сигналів АЕ з різними часовими змінами швидкості розвитку тріщини на початкових етапах її утворення показує, що розташування максимального значення амплітуди й перегинів на передньому фронті сигналу в часі визначається моментами часу збільшення швидкості процесу руйнування.

З кінетичного погляду при утворенні тріщини на докритичній стадії її розвиток відбувається з відносно невисокою швидкістю [5; 6]. Однак у міру збільшення руйнування відбувається її перехід в критичну стадію, що характеризується прискоренням процесу руйнування, який набуває лавиноподібного характеру. Це означає, що на критичній стадії утворення тріщини відбувається збільшення її швидкості. Дане збільшення може відбуватися стрибкоподібним способом, тобто не один, а декілька разів до повного руйнування. З погляду формування сигналу АЕ збільшення швидкості розвитку тріщини на критичній стадії, очевидно, повинно впливати на форму заднього фронту сигналу.

Результати моделювання за умов стрибкоподібного розвитку тріщини зі збільшенням швидкості на завершальній стадії її утворення показано на рис. 3. Для проведення розрахунків значення b взято таким: $b=15$. Графіки на рис. 3 нормовано аналогічно графікам, які наведено на рис. 2. Моделювання проводилося з урахуванням безперервності зміни напруг відповідно до виразів (2), (3) і рис. 1. При моделюванні передбачалося, що утворення тріщини починається і розвивається зі сталою швидкістю $\alpha_{\text{тн}}$, а через деякий час t_1, t'_1, t'_2, t'_3 від початку процесу руйнування відбувається збільшення швидкості розвитку тріщини $\alpha_{\text{тк1}}, \alpha_{\text{тк2}}, \alpha_{\text{тк3}}$. Значення останньої швидкості залишається сталим до повного руйнування.

З отриманих результатів видно, що якщо утворення тріщини відбувається з підвищенням швидкості на завершальній стадії її розвитку, то на задньому фронті сигналу АЕ спостерігається викид амплітуди. Одночасно відбувається стиснення сигналу АЕ. При цьому, чим більша швидкість розвитку тріщини, тим більшого значення набуває амплітуда викиду і спостерігається більше стиснення сигналу 2 (рис. 3, а). У момент часу t_1 швидкість руйнування складала $\alpha_{\text{тк1}} = 70$, а в момент часу t_1 для сигналу 2 (рис. 3, б) швидкість $\alpha_{\text{тк1}} = 60$.

Моделювання сигналу АЕ від тріщини зі зміною часу й кількістю зміни швидкості розвитку тріщини показує, що розташування піків у часі і їх параметри визначаються моментами часу збільшення швидкості розвитку процесу руйнування, а також величиною даного збільшення.

При випадковому розподілі мікрооб'ємів за міцністю процес руйнування може розвиватися з гальмуванням тріщини на перешкодах, наприклад, мікрооб'ємах з більш високою міцністю, включеннях та інших дефектах. Гальмування тріщини може призвести до зменшення швидкості її розвитку з подальшим її збільшенням. Проведемо моделювання сигналу АЕ для даного випадку.

Припустимо, що розвиток тріщини відбувається з початковою швидкістю $\alpha_{\text{тн}}$. При зростанні тріщини в деякі моменти часу t_1, t_2, t_3 від початку руйнування відбувається її гальмування зі зменшенням швидкості і подальшим прискоренням процесу з підвищенням швидкості, яка залишається сталою до повного руйнування. Графіки сигналів АЕ для даного випадку показано

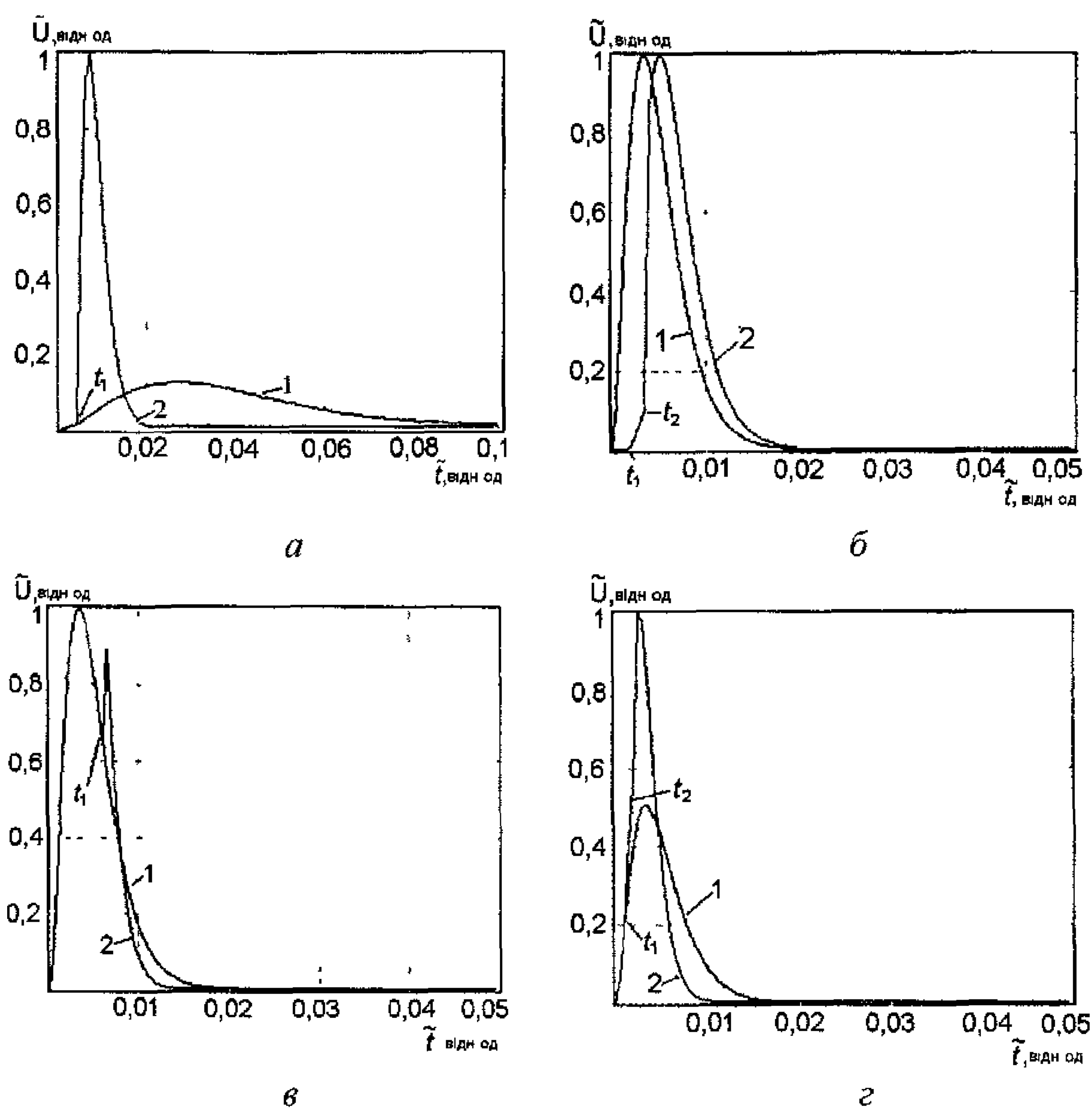


Рис. 2. Форма сигналу АЕ на початковій стадії розвитку тріщини ($t_1 < t_2$):
 а: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = \alpha_{\text{тк1}} = 5$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 5$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк}} = 40$;
 б: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = \alpha_{\text{тк1}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 5$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 15$, $\alpha_{\text{тк2}} = 40$;
 в: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = \alpha_{\text{тк1}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 50$;
 г: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = \alpha_{\text{тк1}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 50$, $\alpha_{\text{тк2}} = 80$

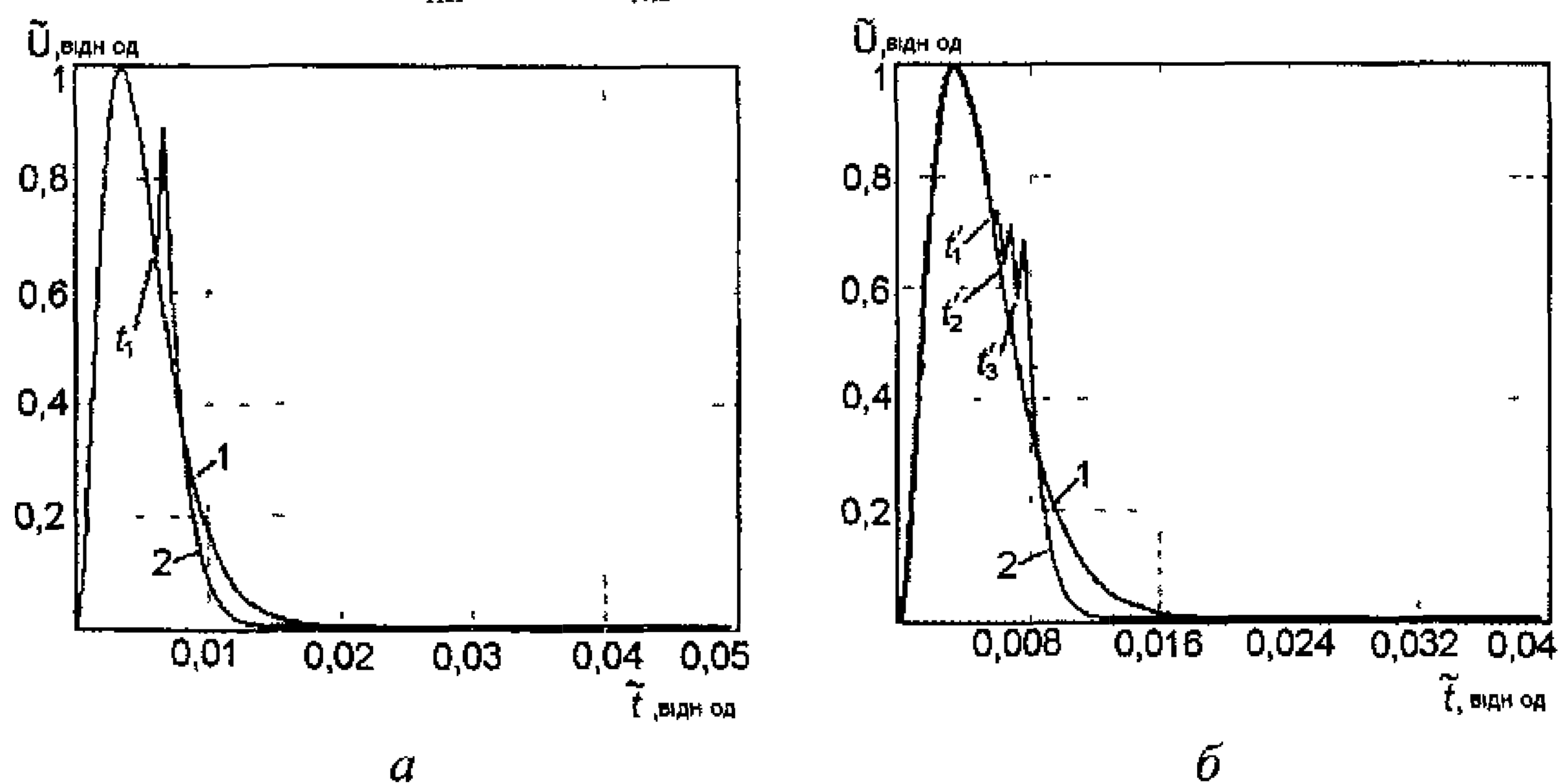


Рис. 3. Форма сигналу АЕ на завершальній стадії розвитку тріщини ($t'_1 < t'_2 < t'_3$):
 а: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 70$;
 б: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 60$, $\alpha_{\text{тк2}} = 80$, $\alpha_{\text{тк3}} = 100$

на рис. 4. На рис. 4, *а* промодельовані умови зміни швидкості на початковому етапі розвитку тріщини, а на рис. 4, *б* – на завершальному етапі розвитку тріщини. Графіки на рис. 4 нормовані аналогічно графікам, наведеним на рис. 2. Моделювання проводилося з урахуванням безперервності зміни напруг відповідно до виразів (2), (3) і рис. 1. При моделюванні передбачалося, що утворення тріщини починається і розвивається зі сталою швидкістю $\alpha_{\text{тн}}$, а через деякий час t_1 , t_2 , t_3 від початку процесу руйнування відбувається послідовне збільшення $\alpha_{\text{тк1}}$, зменшення $\alpha_{\text{тк2}}$ і повторне збільшення $\alpha_{\text{тк3}}$ швидкості розвитку тріщини. Значення останньої швидкості $\alpha_{\text{тк3}}$ залишається сталим до повного руйнування.

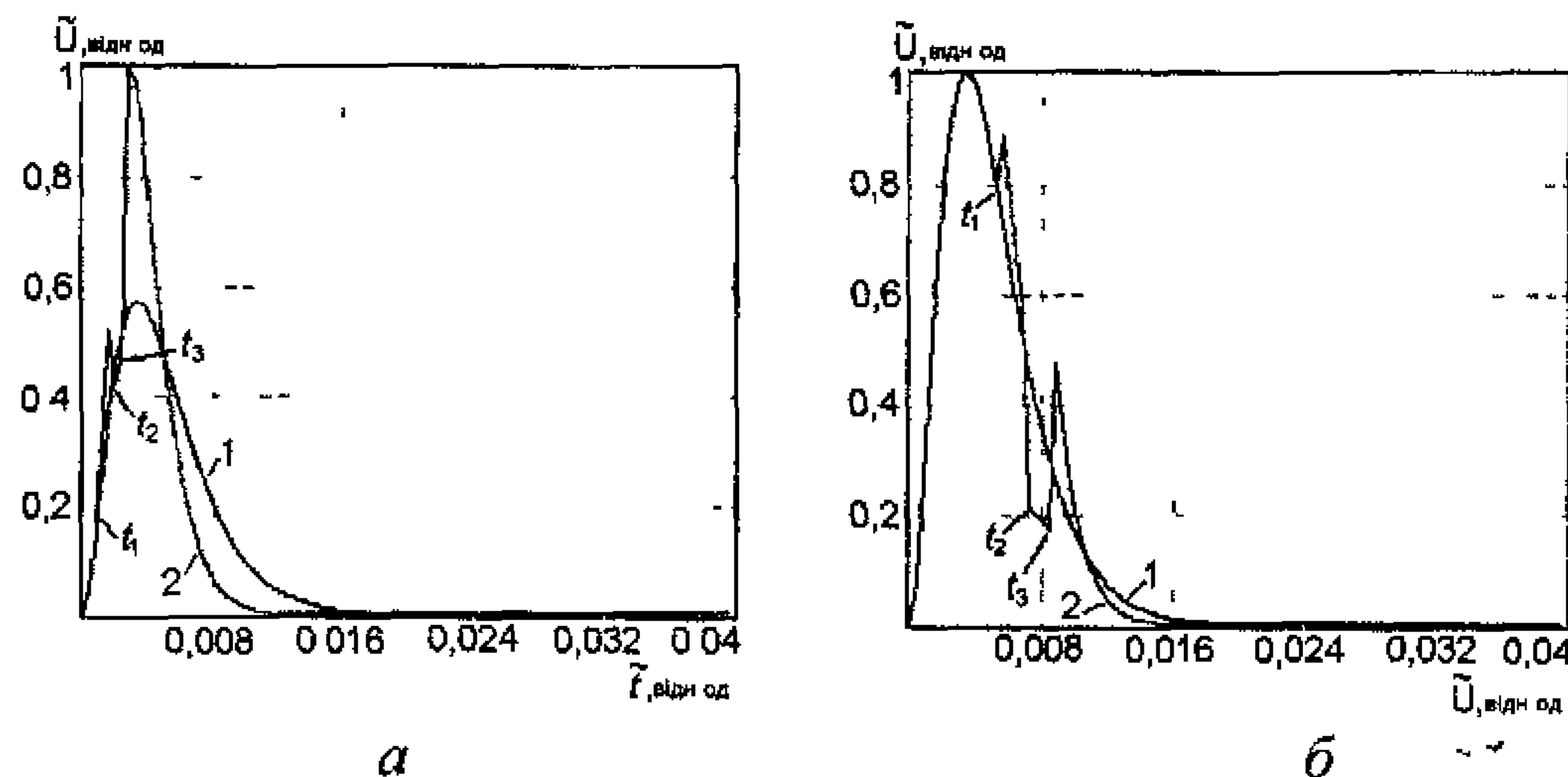


Рис. 4. Форма сигналу АЕ при утворенні тріщини ($t_1 < t_2 < t_3$):

а: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 50$, $\alpha_{\text{тк2}} = 35$, $\alpha_{\text{тк3}} = 70$;
б: 1 – при сталій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$; 2 – при початковій швидкості $\alpha_{\text{тн}} = 40$ і кінцевій швидкості $\alpha_{\text{тк1}} = 50$, $\alpha_{\text{тк2}} = 30$, $\alpha_{\text{тк3}} = 70$

З отриманих результатів видно, що при змінній швидкості розвитку процесу руйнування відбувається викид амплітуди сигналів як на передньому, так і на задньому його фронтах. Моделювання сигналів АЕ з різноманітним значенням швидкості процесу руйнування показало, що залежно від її величини спостерігається не тільки поява викидів амплітуди, а й перегинів на фронтах сигналів. У реальному матеріалі промодельовані умови розвитку тріщини не обмежуються розглянутими. Проте вони показують, що швидкість розвитку тріщини впливає як на форму, так і на параметри сигналів АЕ.

Результати експериментальних досліджень довели, що у випадку деформування та руйнування матеріалів сигнали АЕ, які реєструються, мають дві основні характерні форми – А-типу і С-типу [1]. Обробка отриманої інформації і фактографічні дослідження, які проведено при випробуванні спеціально підготовлених зразків з надрізами зі сталі 65Г до руйнування, довели, що сигнали А-типу є сигналами від пластичної деформації, а сигнали С-типу – сигналами при утворенні тріщин. При цьому показано, що сигнали АЕ мають складну форму.

Розглянемо результати реєстрації сигналів АЕ, які отримані при проведенні досліджень на розтягання зразків зі спеціальної мартенситно-старіючої сталі з різними режимами термообробки (рис. 5). Зразки являли собою пластини товщиною 2 мм і шириною 30 мм з центральним надрізом і вирощеною тріщиною від утомленості. Швидкість деформування була сталою і складала 2 мм/хв. Діаграма навантаження зусилля–час мала лінійний характер до руйнування.

Отримані результати свідчать, що сигнали АЕ мають складну форму. При цьому фіксуються сигнали з постійною крутістю переднього фронту (рис. 5, *С, D, F, G*), а також сигнали з наявністю перегинів на передньому фронті (рис. 5, *А, В, Е, H*). Це можна пояснити з позиції проведеного моделювання сигналів АЕ. При сталій швидкості утворення й розвитку тріщини крутість переднього фронту сигналу АЕ залишається постійною. Якщо на початкових етапах відбувається зміна швидкості розвитку тріщини, то спостерігається зміна крутості переднього фронту сигналу. Причому ця зміна (рис. 5, *А, H, В, Е*) пов'язана як зі збільшенням, так і зі зменшенням швидкості розвитку тріщини.

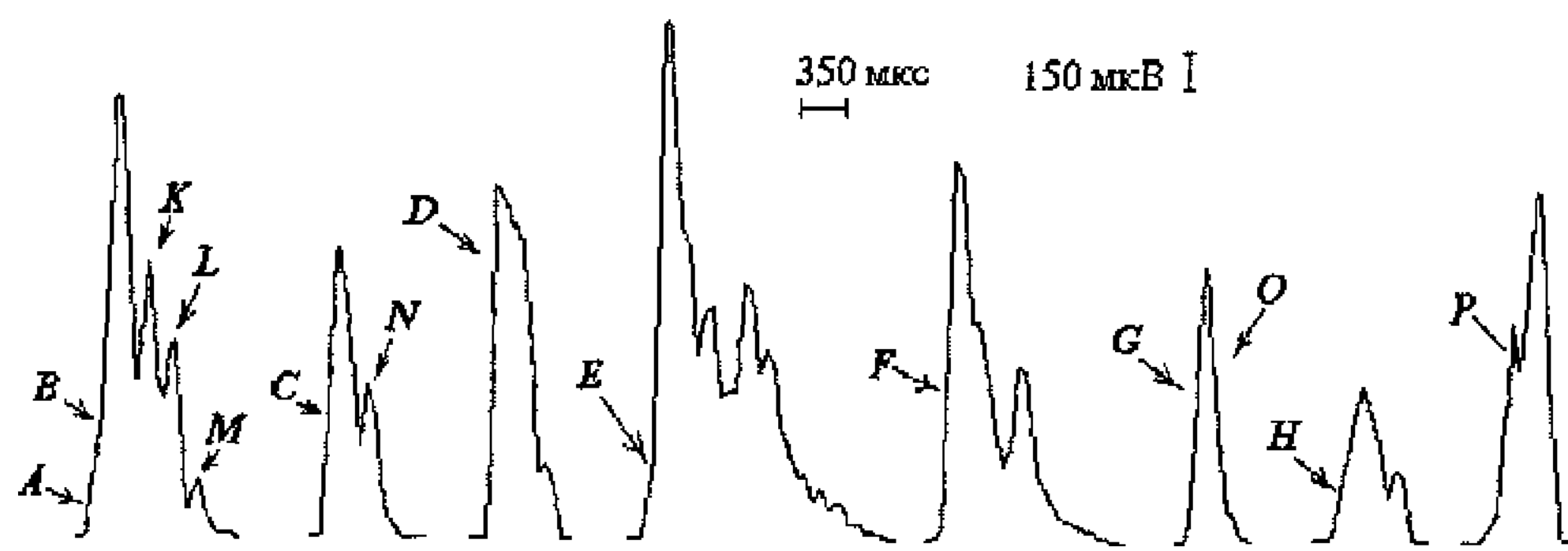


Рис. 5. Сигнали АЕ С-типу, які за-реєстровано при дослідженні зразка зі спеціальної мартенситно-старіючої сталі на розтягання

На задньому фронті спостерігаються сигнали АЕ без викривлень (рис. 5, *O*), а також сигнали АЕ з викривленням фронту (рис. 5, *K, L, M, N*). Відповідно до проведеного моделювання сигналів АЕ (рис. 2, *a, в, г*, крива 1) при сталій швидкості розвитку тріщини до повної її зупинки викривлень сигналу на задньому фронті не повинно спостерігатися. Якщо розвиток тріщини відбувається зі зміною її швидкості (рис. 3, крива 2), то на задньому фронті сигналу АЕ повинні виявлятися викиди амплітуди, що спостерігається в сигналах АЕ, які за-реєстровано. Це пов'язано зі збільшенням швидкості тріщини на критичній стадії її розвитку. При реєстрації сигналів АЕ С-типу спостерігаються і сигнали з викидом на передньому фронті (рис. 5, *P*), що, очевидно, пов'язано з гальмуванням тріщини і подальшим збільшенням її швидкості.

При обробці сигналів АЕ, як правило, використовується поріг обмеження за амплітудним критерієм. Через складну форму сигналів АЕ, що реєструються, при введенні порогу обмеження може відбуватися розбиття сигналу на допоміжні, які переважно розглядаються як сигнали АЕ від незалежних процесів [1; 2]. Проте, враховуючи результати моделювання, при послідовному розвитку процесів деформування і руйнування, які відбуваються в реальних матеріалах, ці сигнали відносяться до одного сигналу АЕ, який є наслідком розвитку локального процесу. Їх фіксація може здійснюватися з використанням «зони мовчання», що розглянуто у роботі [7].

Висновок. Грунтуючись на уявленнях механіки руйнування, відповідно до розробленої моделі формування сигналів АЕ при утворенні тріщини, проведено моделювання сигналів залежно від умов розвитку тріщини. Результати моделювання показали, що характер зміни сигналів АЕ (формування форми переднього й заднього фронтів) визначається характером зміни швидкості розвитку тріщини до повної її зупинки. При цьому наявність перегинів на фронтах сигналу або викидів амплітуди пов'язано зі зміною швидкості розвитку тріщини. Положення перегинів на фронтах і викидів амплітуди визначаються моментами часу й величиною зміни швидкості. Експериментальні дослідження сигналів АЕ при деформуванні різних матеріалів показують добре узгодження з результатами проведеного моделювання.

Список літератури

1. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
2. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
3. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Формирование сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов // Технологические системы. – 2002. – №1(12). – С. 26–34.
4. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 472 с.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
6. Маламедов И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.
7. Филоненко С.Ф., Горынский Н.И., Щербаков А.В., Бирюков В.С. Обработка сигналов акустической эмиссии при испытаниях сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 5. – С.40–44.

Стаття надійшла до редакції 26.03.02.