

ПРИЛАДИ

В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко

ВПЛИВ ПОРОГА ОБМЕЖЕННЯ НА КРИТЕРІАЛЬНУ ОЦІНКУ ВИДІЛЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ВІД ТРІЩИН

Розглядається критеріальна оцінка виділення сигналів акустичної емісії та вплив порогу обмеження на чисельне значення K_p при незмінній чутливості тракту посилення сигналів.

При використанні процесів руйнування матеріалів та елементів конструкцій оцінка виникнення та розвитку тріщин, як правило, здійснюється з використанням критерію, який характеризує ступінь зміни щільності енергії в отриманому сигналі акустичної емісії (АЕ) [1, 2], що описується виразом:

$$K_{pj} = \lg(E_j/\tau_j^2) + B, \quad (1)$$

де E_j – енергія j -го сигналу АЕ; τ_j – його тривалість; B – константа, яка впливає на чисельне значення K_p .

Кількісна характеристика АЕ (амплітуда, тривалість, енергія) – це функція підсилення або чутливості апаратури, яка впливає на граничне чисельне значення K_p при виділенні сигналів від тріщин. Дослідження впливу чутливості апаратури на чисельне значення K_p при деякому заданому значенні порога обмеження m (порога виявлення сигналів), проведені в роботі [3], дозволили отримати поправочний коефіцієнт на чисельне значення K_p :

$$D = 2 \lg[(1/\alpha) - (1/\alpha) \cdot ((1/\alpha) - 1) / ((A_{mci}/m) - 1)], \quad (2)$$

де $\alpha = S_{oj}/S_{kj}$ – відношення крутизни фронтів j -го сигналу при початковій 0-ій та k -ій чутливості апаратури; A_{mof} – максимальна амплітуда j -го сигналу при початковій 0-ій чутливості апаратури; m – поріг обмеження сигналів АЕ.

Амплітуда та поріг обмеження вимірюються в цифровому коді аналого-цифрового перетворювача при заданій чутливості на один розряд.

Якщо розглядається сигнал при початковій чутливості апаратури, то $\alpha = 1$, $D = 0$. Однак існування завод у тракці посилення сигналів АЕ, позбавитися від яких з використанням відомих методів не вдалось, призводить до необхідності введення порога обмеження, що впливає на результати вимірювання параметрів сигналів, які реєструються, та, як наслідок, на чисельне значення K_p . Розглянемо вплив порога обмеження на чисельне значення K_p при незмінній чутливості тракту посилення сигналів АЕ.

Як наближення припустимо, що сигнал АЕ – це трикутний імпульс, який описується виразом [4]:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 2Ut/\tau u, & 0 \leq t \leq \tau u, \quad U > 0, \\ 2U(1 - 2t/\tau u), & \tau u/2 \leq t \leq \tau u, \quad U > 0, \\ 0, & t > \tau u, \end{cases} \quad (3)$$

де τu – тривалість сигналу. Амплітуда сигналу досягає максимального значення при $t = \tau u/2$.

Для сигналу у вигляді імпульса трикутної форми крутизна переднього фронту визначається:

$$S_1 = U_m/\tau_1, \quad (4)$$

де U_m – максимальна амплітуда сигналу; τ_1 – тривалість переднього фронту.

При введенні порога обмеження U_1 для даного сигналу крутизна переднього фронту буде:

$$S'_1 = (U_m - U_1)/\tau'_1, \quad (5)$$

де τ'_1 – тривалість переднього фронту при введенні порога обмеження U_1 .

Оскільки крутизна переднього фронту не змінилася, то порівнявши вирази (4) і (5) та виконавши відповідні перетворення, отримуємо:

$$\tau'_1 = [(U_m - U_1)/U_m] \cdot \tau_1 \quad (6)$$

або у цифровому вигляді

$$L'_1 = [(A_m - m)/A_m] \cdot L_1, \quad (7)$$

де L_1, L'_1 – тривалість переднього фронту без порога та з введенням порога обмеження; m – поріг обмеження; A_m – максимальна амплітуда сигналу. Усі величини в цифрових кодах при постійній чутливості ΔU на один розряд аналого-цифрового перетворювача та постійному інтервалі дискретизації Δt .

Аналогічне співвідношення можна вивести для заднього фронту сигналу. Повна тривалість сигналу складається з суми тривалостей переднього та заднього фронтів. Тоді можна записати:

$$L'_0 = [(A_m - m)/A_m] \cdot L_0, \quad (8)$$

де L_0, L'_0 – повна тривалість сигналу без та відносно порога обмеження m .

Енергія сигналу з введенням порога обмеження в цифровому вигляді визначається:

$$E = \Delta t \cdot \Delta U^2 \cdot \sum_{i=0}^n (A_i - m)^2, \quad (9)$$

де Δt – інтервал дискретизації сигналу; A_i – i -тий відлік амплітуди сигналу; n – кількість вимірювань амплітуди сигналу; ΔU – чутливість аналого-цифрового перетворювача на один розряд.

Підставляючи (8) та (9) в (1) і проводячи відповідні перетворення з введенням індексації для прийнятого сигналу, отримуємо, що для j -го сигналу K_{pj} визначається:

$$K_{pj} = \lg \left[\sum_{i=0}^n (A_{ij} - m)^2 / L_0^2 \right] - 2 \lg [(A_{mj} - m)/A_{mj}] + B. \quad (10)$$

З (10) видно, що при заданій тривалості сигналу з введенням порога обмеження, зміна числового значення K_{pj} залежить від амплітуди прийнятого сигналу та порога обмеження.

Вираз (10) проаналізуємо у вигляді залежності:

$$K_{pj} = a(m, A_{pj}) \quad (11)$$

при заданій тривалості сигналу L_0 ,

де m – поріг обмеження;

A_{pj} – максимальна амплітуда сигналу.

Графіки даних залежностей наведені на рис. 1. Інтервал дискретизації – $\Delta t = 10$ мкс, чутливість на один розряд аналого-цифрового перетворювача – $\Delta U = 5$ мВ.

Для імпульса трикутної форми залежності подібні. При заданій тривалості та амплітуді сигналу з введенням порога обмеження відбувається монотонне зменшення числового значення K_p . Причому з наближенням порога обмеження m до максимального значення амплітуди сигналу A_m виникає більш різка зміна значення K_p .

Значення K_p для сигналу у вигляді імпульса прямокутної форми, природно, більш завищені, а із збільшенням порога обмеження K_p залишається константою.

Пилкоподібна зміна K_p для сигналу у вигляді трикутного імпульса пов'язана зі стрибкоподібною зміною тривалості при остаточному числовому значенні порога обмеження в процесі проведення ітерації (вираз (8)).

В подальшому проводили розрахунки та побудову графіків для складових у виразі (10) у вигляді:

$$K'_{pj} = \lg \left[\sum (A_{ij} - m)^2 / L_0^2 \right] + B, \quad (11)$$

$$K''_{pj} = -2 \lg [(A_{ij} - m)/A_{mj}]. \quad (12)$$

Виконані розрахунки показують, що із зростанням порога обмеження зміна K'_{pj} носить спадаючий, а K''_{pj} – зростаючий характер. Для сигналу трикутної форми до значення порога обмеження 20÷25 % від максимального значення амплітуди сигналу, зменшення K_{pj} за рахунок K'_{pj} відбувається плавно, а вплив K''_{pj} незначний. З переверщенням порога обмеження значення 20–25 % від максимального рівня амплітуди сигналу, відбувається різке падіння K'_{pj} , та збільшення впливу K''_{pj} , що призводить до сповільнення в зменшенні значення K_{pj} .

Для сигналу у вигляді прямокутного імпульса залежності зміни K'_{pj} та K''_{pj} мають аналогічний характер. Однак, більш різке падіння K'_{pj} починається при значенні порога обмеження порядку 50–55 % від максимального значення амплітуди сигналу.

Не дивлячись на наближення в описі сигналу у вигляді імпульса трикутної або прямокутної форми, проведені розрахунки показали, що при заданій чутливості апаратури, яка використовується для реєстрації та посилення сигналів АЕ, за наявності завад, від яких не вдається поз-

бавитися відомими методами, окрім як введенням порогу обмеження, виникає зменшення K_p , що може призвести до помилок виділення сигналів від тріщин, які фіксуються в процесі деформування та руйнування матеріалів. Однак, при вимірюванні параметрів сигналів та обчисленні значення K_p , для зниження впливу порогу виявлення на граничне значення K_p , можливе використання корегуючої поправки за формулою (12). Фактично, якщо не використовувати поправку, то необхідно вводити обмеження на поріг виявлення сигналів.

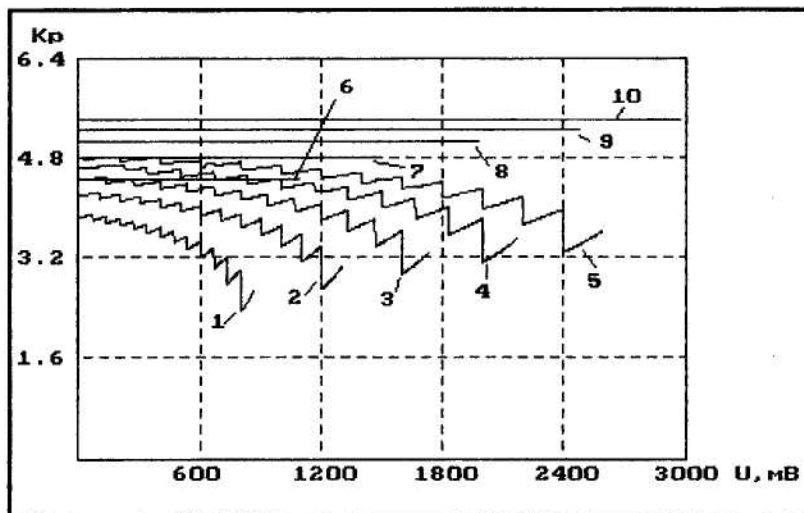


Рис. 1. Залежність зміни K_p від порога обмеження.
 Сигнал у вигляді трикутного імпульса тривалістю 300 мкс та амплітудою:
 1 – 1 В; 2 – 1,5 В; 3 – 2,0 В; 4 – 2,5 В; 5 – 3,0 В.
 Сигнал у вигляді прямокутного імпульса тривалістю 300 мкс та амплітудою:
 6 – 1 В; 7 – 1,5 В; 8 – 2,0 В; 9 – 2,5 В; 10 – 3,0 В

Усе вищевикладане перевірялося під час проведення іспитів циліндричних зварних зразків із сталі 0X18H10T, плоских зразків із сталі У8 з центральним надрізом та усталісно вирощеною тріщиною, циліндричних зразків з Композиту-05ИТ. Параметри тракту посилення та обробки сигналів АЕ наведені в табл. 1.

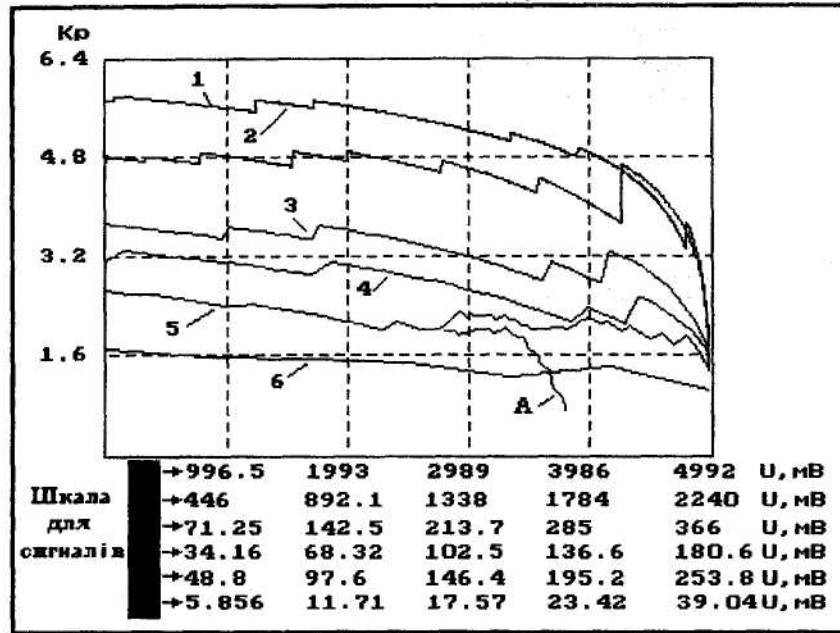
Таблиця 1

Характеристики тракту посилення сигналів акустичної емісії

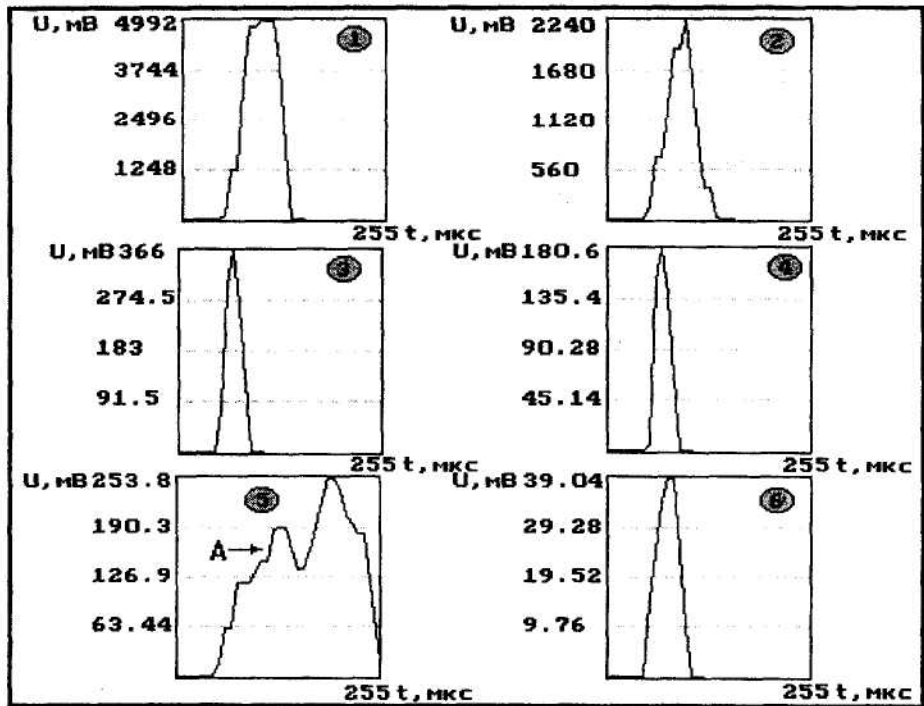
Найменування	Значення
Чутливість, приведена до входу	15 мкВ
Частотний діапазон	100–2000 кГц
Нерівномірність АЧХ (не більше)	1 дБ
Полоса пропускання фільтра нижніх частот при виділенні обвідної сигналу	10 кГц
Динамічний діапазон	100 дБ
Коефіцієнт посилення	40000
Вхідний опір	1 МОм
Чутливість аналого-цифрового перетворювача на один розряд	4,88 мВ
Інтервал дискретизації	10 мкс

Граничне значення K_p для виділення сигналів АЕ від тріщин, при заданій чутливості апаратури, дорівнює трьом. Після проведення іспитів та запису сигналів АЕ на фізичному рівні побудови пристроїв запам'ятовування інформації при нульовому значенні порогу обмеження проводився аналіз залежностей зміни K_p від значення порогу обмеження для кожного сигналу АЕ. Типові залежності при проведенні іспитів зварних зразків зі сталі 0X18H10T, наведені на рис. 2,а, а відповідні їм зареєстровані сигнали АЕ зображені на рис. 2,б. Значення K_p обчислювались у відповідності з формулою (11). При нульовому порозі обмеження сигнали 1–4 мають значення $K_p > 3$ (сигнали від тріщин), а сигнали 5, 6 – $K_p < 3$ (сигнали, що виникають в процесі пластичної деформації). З введенням порогу обмеження відбувається зменшення значення K_p для обох типів сигналів. До значення порогу обмеження, що не перевищує 40–50 % від максимального значення амплітуди прийнятого сигналу, дане зменшення протікає відносно

плавно, а з подальшим збільшенням порогу обмеження виникає прискорення зменшення значення K_p .



a)



b)

Рис. 2. Залежність зміни K_p від порогу обмеження (a) для сигналів АЕ (б), зареєстрованих при проведенні іспитів зварного зразка зі сталі 0Х18Н10Т (розрахунки проведені за формулою (11))

Пилкоподібна зміна K_p , як і у випадку аналізу сигналу у вигляді трикутного імпульса, пов'язана зі стрибкоподібною зміною тривалості сигналу із-за його складної форми при кінцевому чисельному значенні порогу обмеження в процесі проведення ітерації за формулою (8). Причому, якщо зареєстрований сигнал має декілька піків, то із зростанням порогу обмеження виникає його розбиття на додаткові сигнали (А на сигналі 5, рис. 2,б). Однак, як показує

аналіз достатньо великої кількості інформації, розбиття не призводить до викидів на залежностях та не впливає на тенденцію у зміні залежності для основного сигналу. Це має важливе значення з практичної точки зору, оскільки усі сигнали зі значенням $K_p < 3$ із зростанням порогу обмеження не будуть інтерпритуватися як сигнали, які з'являються при виникненні та розвитку тріщин.

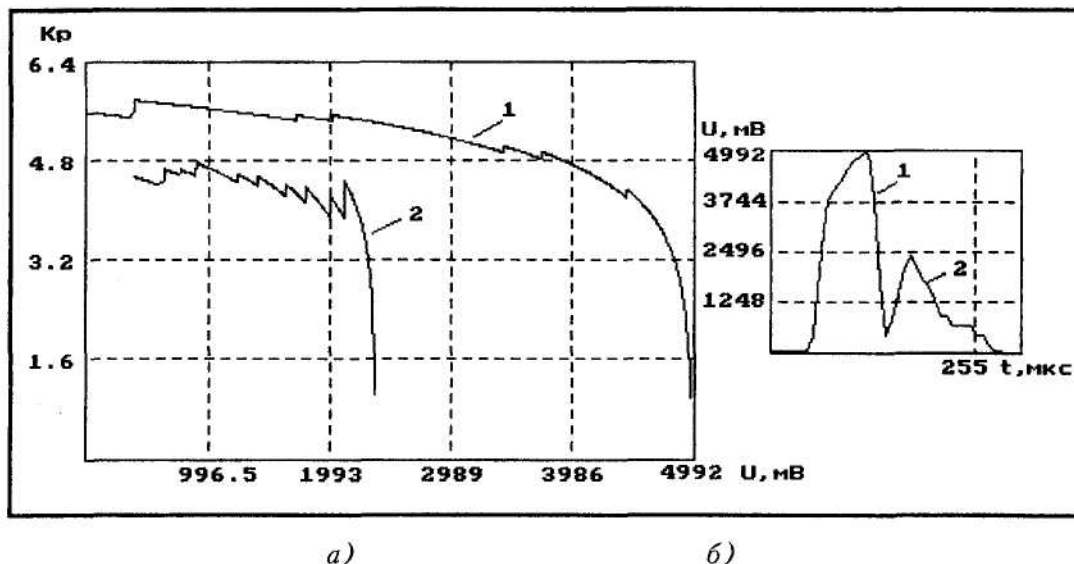


Рис. 3. Залежність зміни K_p від порогу обмеження (а) для сигналу (б), зареєстрованого при проведенні іспитів зварного зразка зі сталі 0X18H10T ($K_p > 3$) (розрахунки проведені за формулою (11))

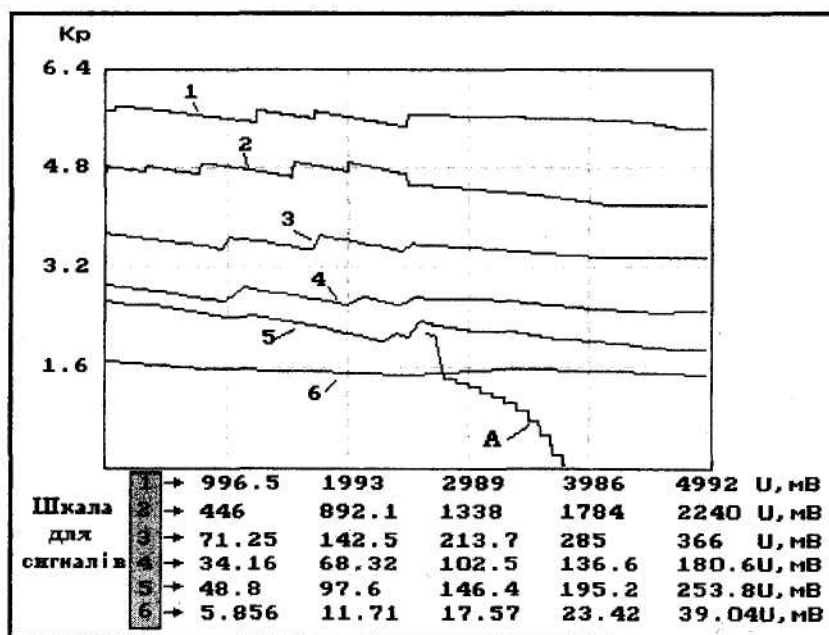


Рис. 4. Залежність зміни K_p від порогу обмеження для сигналів АЕ, зображених на рис. 2,б та зареєстрованих при проведенні іспитів зварного зразка зі сталі 0X18H10T (розрахунки проведені за формулою (10))

Найбільшу цікавість представляють сигнали АЕ із значенням $K_p > 3$, які також можуть мати складну форму з декількома піками. На рис. 3 зображена типова ситуація для даного випадку, де спостерігається та ж тенденція, яка описана вище.

З отриманих даних видно, що при розбивці сигналу не існує різких викидів в бік зменшення значення K_p із збереженням загальної тенденції для основного сигналу. Вплив додаткових сиг-

налів легко усунути, якщо проводити їх аналіз як подію АЕ з використанням часової зони між сигналами, що розглядалися в роботі [5].

Залежності, які наведені вище, отримані під час проведення аналізу сигналів за формулою (11). Подальший аналіз цих же сигналів здійснювали з урахуванням формули (12), тобто проводили аналіз згідно з формулою (10). Отримані результати показують, що до значення порогу обмеження 40–50 % від максимального значення амплітуди вплив другого члена у формулі (10) незначний. В зв'язку з цим алгоритм аналізу було змінено таким чином, що якщо поріг обмеження не перебільшує 50 % від максимального значення амплітуди прийнятого сигналу, то обчислення проводяться за формулою (12), інакше – згідно з формулою (10). Результати аналізу для сигналів, наведених на рис. 2,б, зображені на рис. 4. Видно, що з введенням поправки на поріг обмеження сигналів (формула (12)), відбувається стабілізація в падінні K_p та вирівнювання залежностей. Причому, на порогах обмеження, які наближаються до максимального значення амплітуди сигналу, досягається максимальне згладжування. Це відноситься до сигналів з $K_p > 3$ та з $K_p < 3$, що дозволяє задіяти критеріальну оцінку (1) при використанні методології подавлення завад шляхом введення порогу обмеження.

З практичної точки зору використання критеріальної оцінки для виділення сигналів АЕ при виникненні та розвитку тріщин можна поділити на дві задачі. Перша – фіксація та спостереження за розвитком макродефектів, коли не вимагається високої чутливості апаратури (в каналі реєстрації та посилення АЕ відсутні сигнали завад). При цьому розподіл сигналів можна здійснювати відносно граничного значення при заданій чутливості апаратури згідно формули (1) або відносно максимальної чутливості апаратури з використанням поправки, яка обчислюється за формулою (2). Друга задача – фіксація із спостереженням за розвитком мікродефектів при проведенні досліджень фізичних процесів, де вимагається максимальна чутливість апаратури. При цьому в каналі реєстрації та посилення АЕ, як правило, існують завади, позбавитися від яких можна лише з використанням порога обмеження.

Розподіл сигналів в даній ситуації можна здійснювати відносно граничного значення з використанням формул (11), (12). При цьому, необхідно використовувати гнучкий алгоритм обчислення, що базується на спостереженні за співвідношенням порогу обмеження та максимальної амплітуди сигналів, які реєструються як описано вище.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Новиков Н.В., Филоненко С.Ф. и др. К критерию определения источника сигнала акустической эмиссии при нагружении материалов // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 2. – С. 42–45.
2. Ляшко В.А., Смагленко Ф.П., Потемкин М.М. Связь параметра сигнала акустической эмиссии с термодинамическими и информационными характеристиками процесса изнашивания // Проблемы трения и изнашивания. – 1990. – Вып. 38. – С. 9–13.
3. Новиков Н.В., Филоненко С.Ф. Влияние параметров акустического тракта на критеріальную оценку выделения сигналов акустической эмиссии от трещин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1995. – № 1. – С. 47–52.
4. Маєвський С.М., Бабак В.П., Щербак Л.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі. – К: Либідь, 1993. – 200 с.
5. Филоненко С.Ф., Городыский Н.И., Щербаков А.В., Бирюков В.С. Обработка сигналов акустической эмиссии при испытаниях сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 5. – С. 40–44

БАБАК Віталій Павлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри наукових аналітичних та екологічних приладів та систем НТУУ “КПІ”.

Наукові інтереси:

- ультразвук в технічній діагностиці;
- обробка сигналів.

ФІЛОНЕНКО Сергій Федорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри наукових аналітичних та екологічних приладів та систем НТУУ “КПІ”.

Наукові інтереси:

- акустична емісія в технічній діагностиці.