

# ПОЛЯ ТА СИГНАЛИ У НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

---

УДК 534.6.08

## ОПТИМІЗАЦІЯ КРОКУ ВИМІРЮВАНЬ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

О. М. Мокрий

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: mokomo@lviv.farlep.net

Розглянута методика вимірювання просторового розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль у неоднорідних середовищах. Показано, що просторове розділення і похибка визначення швидкості є залежні величини і їх співвідношення залежить від кроку вимірювання. Запропонована методика оптимізації просторового розділення і точності вимірювання швидкості поверхневої акустичної хвилі.

**Ключові слова:** швидкість поверхневих акустичних хвиль, просторове розділення, неоднорідне середовище.

## OPTIMIZATION OF MEASUREMENT STEP OF SURFACE ACOUSTIC WAVE VELOCITY IN NON-HOMOGENEOUS MEDIUM

O. M. Mokryy

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The method of measurement of space distribution of the surface acoustic wave velocity in non-homogeneous medium is considered. It is shown that the spatial resolution and error of measurement of the surface acoustic wave velocity are dependent on the magnitudes and its ratio dependents on the step of measurement. The optimization method of the spatial resolution and precision measurement of the surface acoustic wave velocity is proposed. The method is based on the measurement by minimum step size and next processing of the experiment data.

**Keywords:** surface acoustic wave velocity, spatial resolution, non-homogeneous medium.

Акустичні властивості металів широко використовують для визначення стану металу і прогнозування ресурсу різноманітних об'єктів. Серед інших акустичних характеристик у неруйнівному контролі користуються швидкістю поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея. Ця величина дає змогу досліджувати та контролювати різноманітні явища та процеси, оскільки залежить від пружних модулів середовища та його густини [1]. Особливістю використання ПАХ є те, що можна вимірювати швидкість з високим просторовим розділенням. Це зумовлено тим, що ПАХ поширюються в поверхневому шарі глибиною  $\approx 2\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі [2]. Відповідно можна змінювати товщину досліджуваного поверхневого шару, вибираючи частоту ПАХ. Крім того, напрям поширення ПАХ теж можна легко змінювати з допомогою сучасних методів збудження. Вимірювання швидкості поширення ПАХ в різних напрямках дають можливість досліджувати ефекти, пов'язані із анізотропними властивостями матеріалів. До них належать текстура металів та залишкові механічні напруження [3, 4]. Ще однією особливістю використання швидкості ПАХ є можливість локальних вимірювань вздовж поверхні зразка для оцінки однорідності матеріалів [1, 4], визначення локальних областей пошкодження металів [1], дослідження пластичної деформації в металах [5], також таким способом можна визначити просторовий розподіл температури на поверхні зразка [6]. Локалізують ділянку поверхні зразка для вимірювань положенням збуд-

© О. М. Мокрий, 2017

жувального та приймального перетворювача. Сучасні технології дозволяють легко змінювати розташування перетворювачів та реєструвати їх координати з високою точністю. Це стосується як контактних п'єзоелектричних методів збудження та реєстрації ПАХ, так і ще більшою мірою безконтактних лазерних методів.

Точність визначення розташування перетворювача на поверхні зразка необхідна для локалізації ділянки вимірювань. Проте ще важливіше точно виміряти відстань між місцями реєстрації ПАХ для визначення її швидкості. Оскільки зміни швидкості часто є достатньо малі, то, відповідно, необхідна висока точність вимірювання як відстані, так і часу. З цієї точки зору важливим є оптимальний вибір розміру ділянки зразка, на якій вимірюють швидкість, оскільки він впливає на точність і просторове розділення вимірювань.

**Методика вимірювань швидкості ПАХ.** Традиційна методика вимірювання швидкості ПАХ полягає у збудженні хвилі на поверхні зразка і її реєстрації на одній або кількох ділянках на певній відстані від місця збудження [1, 5]. Швидкість визначають за часом, протягом якого ПАХ проходить певну відстань. Таким чином, для визначення швидкості ПАХ необхідно виміряти час і відстань. Для встановлення просторового розподілу швидкості необхідно виконати такі виміри на різних ділянках зразка. Одна з можливих схем вимірювань просторового розподілу швидкості ПАХ показана на рис. 1. Згідно з нею, поверхневу акустичну хвилю збуджують контактним перетворювачем і реєструють час надходження акустичного сигналу в різних місцях зразка безконтактним лазерним методом. Також визначають довжину  $L_i$  між місцями реєстрації акустичного сигналу. Завдяки вимірюванню знаходять середню швидкість на цій ділянці, яку назовемо кроком вимірювань. Відповідно отримуємо послідовність швидкостей  $V_i$ , які визначатимуть виразом

$$V_i = L_i / (t_i - t_{i+1}), \quad (1)$$

де  $t_i, t_{i+1}$  – час надходження сигналу у відповідні місця реєстрації зразка. Важливим є вибір кроку вимірювань  $L_i$ . За великого кроку вимірювань можна втратити деякі істотні особливості просторового розподілу швидкості. З іншого боку, існують обмеження на мінімальне його значення, які пов'язані із точністю вимірювань. Тому необхідно вибрати оптимальний крок для максимально достовірного вимірювання просторового розподілу швидкості ПАХ.

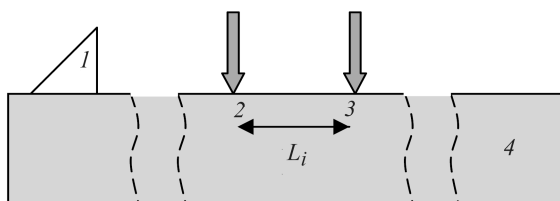


Рис. 1. Схема вимірювання просторового розподілу швидкості ПАХ: 1 – перетворювач для збудження ПАХ; 2, 3 – місця реєстрації ПАХ лазерним методом; 4 – зразок.

**Точність визначення швидкості ПАХ і просторове розділення.** Похибка вимірювання швидкості задається похибками визначення часу та відстані. Стандартне відхилення вимірювання швидкості ПАХ можна подати так [7]:

$$\left( \frac{\sigma_V}{V} \right)^2 = \frac{1}{L^2} (\sigma_x^2 + V^2 \sigma_t^2), \quad (2)$$

де  $V$  – швидкість ПАХ;  $L$  – відстань між ділянками реєстрації (крок вимірювання);  $\sigma_V, \sigma_x, \sigma_t$  – стандартні відхилення визначення швидкості, відстані і часу, від-

повідно. Величини  $\sigma_x$ ,  $\sigma_t$  залежать від характеристик обладнання та методики вимірювання.

Якщо переписати вираз (2) у вигляді

$$\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 L^2 = \sigma_x^2 + \sigma_t^2 V^2, \quad (3)$$

то бачимо, що сума  $\sigma_x^2 + \sigma_t^2 V^2$  – величина, яка залежить від вимірювальної системи і її можна використати для оцінки можливостей цієї системи. Ліва сторона виразу (3) містить похибку визначення швидкості і крок вимірювання. Ці величини характеризують просторовий розподіл швидкості, який можна визначити з допомогою цієї вимірювальної схеми.

У найпростішому випадку просторові неоднорідності швидкості можна описати з допомогою її просторової частоти  $\frac{2\pi}{X_p}$  та амплітуди  $V_1$  у вигляді

$$V = V_1 \sin \frac{2\pi}{X_p} x + V_0, \quad (4)$$

де  $V_1$  – амплітуда зміни швидкості;  $X_p$  – період просторової неоднорідності;  $x$  – координата. Розглянемо, за яких умов може бути зареєстрована просторова залежність швидкості, яку описують виразом (4). З одного боку, для реєстрації просторової неоднорідності крок виміру повинен бути мінімум в 2 рази менший за її період:

$$\frac{X_p}{2} > L, \quad (5)$$

з іншого боку, для реєстрації просторового розподілу швидкості ПАХ з амплітудою  $V_1$  необхідно забезпечити умову

$$V_1 > \sigma_V. \quad (6)$$

Підставивши умови (5) і (6) у вираз (3), отримаємо:

$$\frac{V_1^2 X_p^2}{4V^2} > \sigma_x^2 + \sigma_t^2 V^2. \quad (7)$$

Вираз (7) пов'язує характеристики просторової неоднорідності зразка із характеристиками вимірювальної системи. Ця умова дає можливість оцінити допустимі похибки вимірювання, які необхідні для реєстрації просторової гармоні-

ки зміни швидкості з амплітудою  $V_1$  і періодом  $X_p$ . Величину  $\frac{V_1^2 X_p^2}{4V^2}$  можна вважати характеристикою зразка, на основі якої можна оцінити параметри вимірювальної системи, що дозволить зареєструвати відповідний просторовий розподіл швидкості ПАХ. Як видно з цього виразу, зменшення похибок вимірювання дозволяє реєструвати просторові розподіли швидкості ПАХ з меншою амплітудою та вищою просторовою частотою.

На рис. 2 показані залежності між величинами  $V_1$  та  $X_p$  для різних значень  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 V^2}$ , розраховані за виразом (7). Величина  $V$  дорівнює 3000 м/с. Для кожної величини  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 V^2}$  допустимі значення  $V_1$  та  $X_p$  знаходяться вище відповідної кривої. Конкретна вимірювальна система має обмеження в реєстрації гармонік з високою просторовою частотою і малою амплітудою. Таким чи-

ном, використовуючи вираз (7), можна оцінити характеристики просторової неоднорідності швидкості ПАХ, які можна виміряти з допомогою певної вимірювальної системи. В деяких випадках виникає потреба зареєструвати просторові неоднорідності, параметри яких знаходяться на межі можливостей вимірювальної системи. Співвідношення між частотою і амплітудою просторової гармоніки, яку можна зареєструвати, як видно з виразу (7), залежить від вибору кроку вимірювання  $L$ . Збільшення  $L$  призводить до підвищення точності вимірювань швидкості і зменшення просторового розділення. Оскільки ці обидві величини є важливими, потрібно вибрати оптимальне значення кроку вимірювань. Очевидно, що його необхідно вибирати, виходячи із характеристик досліджуваних зразків, а також можливостей вимірювальної системи. Тому можна запропонувати такий критерій вибору кроку вимірювань. Оптимальним можна вважати мінімальний крок вимірювань, за якого швидкість у сусідніх ділянках відрізняється на значення, більше за суму похибок їх вимірів. В цьому випадку досягнемо мінімально необхідної точності для виявлення просторових неоднорідностей швидкості в зразку за максимального просторового розділення. Відповідно для просторово однорідних зразків, в яких швидкість майже не змінюється, крок буде максимально великим. Для зразків, в яких є великий градієнт швидкості, оптимальний крок вимірювання буде малим. Для вибору оптимального кроку  $L$  необхідно виконати попередні вимірювання просторового розподілу швидкості ПАХ у зразку.

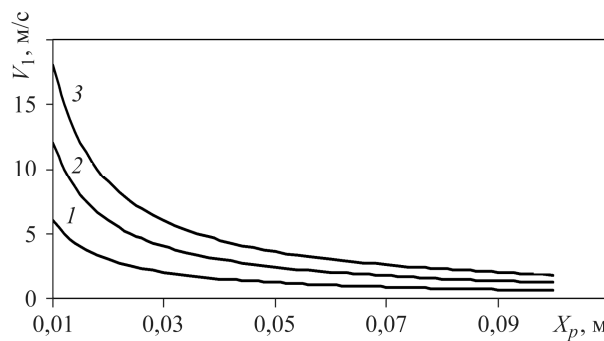


Рис. 2. Залежності між просторовим періодом зміни швидкості і її амплітудою для різних значень величини  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x^2 V^2}$  : 1 – 10 мкм; 2 – 20; 3 – 30 мкм.

Процедура вибору оптимального кроку  $L$  полягає у вимірюванні з мінімальним кроком. Згідно з отриманою послідовністю часів  $t_i$  і відомим кроком, можна розрахувати просторовий розподіл швидкості ПАХ. За наявності сусідніх ділянок, в яких швидкість відрізняється менше за похибку вимірювань, їх слід об'єднати в одну і розрахувати швидкість в об'єднаній ділянці. Після об'єднання похибка вимірювань швидкості в них, згідно з виразом (2), зменшиться. Якщо після цього знову в деяких сусідніх ділянках швидкості відрізнятимуться на значення, менше за похибки вимірювань, то ці ділянки теж слід об'єднати. Після необхідного повторення об'єднання ділянок вимірювання, отримаємо розподіл, в якому швидкість у сусідніх ділянках відрізнятиметься на достовірне значення. Крок вимірювань тоді буде мінімально можливим, що дасть змогу одержати максимальне просторове розділення. Таким чином, з допомогою запропонованого алгоритму, можна отримати оптимальні кроки вимірювань, які змінюватимуться залежно від просторового розподілу швидкості ПАХ.

### ВИСНОВКИ

Розглянуто методику вимірювання просторового розподілу швидкості ПАХ у неоднорідних середовищах. Проаналізовано зв'язок похибок вимірювальної

системи і характеристик просторового розподілу швидкості ПАХ, які можна зареєструвати цією системою. Показано, що для максимального використання можливостей виміральної системи необхідно оптимізувати співвідношення між просторовим розділенням та точністю визначення швидкості ПАХ. Таку оптимізацію можна здійснити шляхом вибору оптимального кроку вимірювання. Запропонована процедура вибору оптимального кроку вимірювання, яка полягає у вимірюваннях з мінімальним кроком і подальшій його оптимізації на основі отриманих результатів.

1. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л.* Скорость звука и структура стали и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 184.
2. *Викторов И. А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – С. 286.
3. *Mesurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves / D. Levesque, C. S. Lim, C. Padioleau, A. Blouin // J. Physics Conf.* – 2011. – **278**. – P. 1–4.
4. *Delsanto P. P., Mignogna R. B.* Ultrasonic separation of stress and texture effects in polycrystalline aggregates // *Journal of the Acoustical Society of America.* – 1990. – **87**. – P. 215–224.
5. *Дослідження лазерним методом просторового розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль у пластично деформованій сталі / В. В. Кошовий, О. М. Мокрий, М. І. Греділь, І. М. Романишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – № 4. – С. 56–61.
6. *Takahashi M., Ihara I.* Ultrasonic monitoring of internal temperature distribution in a heated material // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 47. – P. 3898–3898.
7. *Johnson C. and Thompson R.B.* The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation.* – 1993. – **Vol. 12**. – P. 2121–2128.

*Одержано 22.09.2017*