

МЕТОДИКА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ

О. М. Мокрий, П. М. Семак

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

E-mail: ovmokryu@ipm.lviv.ua, semak@ipm.lviv.ua

Розглянуто методику вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль для дослідження металів із використанням п'єзоелектричного перетворювача. Проаналізовано конструкцію перетворювача, в якому збудження та реєстрація поверхневих акустичних хвиль відбуваються шляхом трансформації поздовжньої хвилі в поверхневу і, навпаки, з допомогою звукопроводів у формі призми. Описано причини виникнення похибки вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль від зміни температури перетворювача і можливі шляхи їх зменшення. Показано, що перетворювач, в якому використовують дві призми для реєстрації акустичних хвиль, послаблює ці похибки. Сформульовано умови, коли можна здійснити температурну стабілізацію такого перетворювача. Наведено приклад реалізації температурної компенсації перетворювача та встановлено, що його температурна стабілізація можлива в достатньо широкому діапазоні швидкостей досліджуваного зразка.

Ключові слова: швидкість поверхневих акустичних хвиль, п'єзоелектричні перетворювачі.

THE METHOD OF TEMPERATURE STABILIZATION OF THE TRANSDUCER FOR MEASURING SURFACE ACOUSTIC WAVE VELOCITY

O. M. Mokryy, P. M. Semak

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The method of measuring velocity of surface acoustic waves for investigation of metals with application of a piezoelectric transducer is considered. The transducer in which excitation and recording of the acoustic waves occurs by transformation of a longitudinal wave to a surface wave and back is analyzed, employing acoustic lines in the prism-like form. The causes of measuring an error which appears when measuring the velocity of the surface acoustic waves due to the transducer temperature change and possible ways of their decrease are analyzed. It is shown that the transducer construction, which incorporates two prisms for acoustic waves recording, allows us to decrease this error. Conditions of temperature stabilization of such a transducer are formulated. The example of realization of the transducer temperature compensation is proposed. It is shown that temperature stabilization of the transducer can be realized in a wide velocity range of the investigated specimen.

Keywords: surface acoustic wave velocity, piezoelectric transducer.

Вимірювання акустичних властивостей металів широко використовують у неруйнівному контролі для оцінки їх стану. Тут здебільш вимірюють швидкості поверхневих акустичних хвиль (ПАХ). Це пов'язано як із зручністю вимірювань, так і з можливістю досліджувати за швидкістю ПАХ різноманітні явища, оскільки вона залежить від залишкового механічного напруження, пластичної деформації, наводнювання металу та від його структури [1, 2]. Зазвичай зміни швидкості ПАХ достатньо малі і для їх виявлення необхідні високоточні вимірювання. Тому актуальним є аналіз і мінімізація джерел похибок вимірювань та розробка на цій основі нових високоточних методик.

Джерела похибок залежать від багатьох чинників: методів збудження та реєстрації ПАХ, а також самої методики вимірювання швидкості. Розглянемо методи вимірювання швидкості на основі контактного збудження та реєстрації ПАХ з використанням п'єзоелектричного ефекту, який найпоширеніший у неруйнівном-

му контролі. Методика визначення швидкості полягає у вимірюванні двох величин: часу проходження акустичним імпульсом певної відстані, а також цієї відстані. Один з найпростіших шляхів – знаходження часу проходження акустичного сигналу і відстані між двома перетворювачами, які послідовно розміщують на різних відстанях один від одного. Проте недоліком такого підходу є необхідність вимірювати з високою точністю відстань між збуджувальним та реєструвальним перетворювачами, що викликає певні труднощі [1, 3]. Ефективнішим є метод, в якому збуджувальну та реєструвальну частини перетворювача жорстко з'єднують, забезпечуючи так постійну відстань між ними [1, 3, 4]. Для вимірювань перетворювач необхідно прокалібрувати з допомогою еталонних зразків з відомою швидкістю ПАХ.

Тут одним із джерел похибки визначення швидкості ПАХ є температурна нестабільність перетворювача [1]. Такі похибки притаманні багатьом перетворювачам. Основою температурних змін характеристик є температурні залежності властивостей матеріалів елементів перетворювача. Тому в деяких випадках для прецизійних вимірювань використовують схему, коли п'єзоелектричний елемент кріплять безпосередньо на досліджуваній зразок без проміжних конструктивних елементів [5]. Проте за збудження і реєстрації ПАХ з допомогою призми [6] цей шлях реалізувати неможливо.

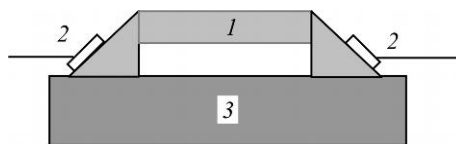
Для перетворювачів, які використовують для визначення швидкості ПАХ, важлива температурна залежність швидкості акустичних хвиль в елементах перетворювача, а також зміна їх лінійних розмірів зі зміною температури. Їх температура може мінятися внаслідок зміни температури навколишнього середовища, а також нагрівання під час збудження акустичних хвиль, оскільки за перетворення електричної енергії в механічну значна її частина переходить у тепло. Під час прецизійних вимірювань необхідно враховувати температурні зміни властивостей перетворювача. Особливо це важливо тоді, коли перепади зовнішньої температури можуть бути суттєві. Найпростіший шлях зменшити температурну похибку перетворювача – стабілізувати його температуру. Але це ускладнює обладнання і часто збільшує час вимірювань. Інший спосіб полягає у вимірюванні його температури і відповідному коригуванні одержаних результатів. Послабити вплив температурної нестабільності також можна, використовуючи додатковий перетворювач, температура якого така сама, як і в основного, розміщеного на еталонному зразку. Додатковий перетворювач дає можливість оцінити вплив зміни температури на його параметри. Проте найдієвіший шлях зменшити ці похибки – створити перетворювачі, параметри яких слабо змінюються з температурою. Для цього використовують матеріали з властивостями, які несуттєво змінюються з температурою. Проте це не завжди можна реалізувати, оскільки матеріали перетворювача вибирають на основі багатьох критеріїв, які часто суперечать один одному. Інший загальний підхід базується на взаємній компенсації різноманітних температурних впливів. Саме його використовуємо в запропонованому перетворювачі для визначення швидкості ПАХ.

Методика вимірювань. За традиційної схеми вимірювань швидкості ПАХ [1, 3] застосовують перетворювач із двома жорстко з'єднаними призмами, одна з яких збуджує, а інша реєструє хвилі (рис. 1). Імпульс поздовжньої акустичної хвилі поширюється від п'єзоелектричної пластини через призму з оргскла до поверхні зразка. На зразок акустична хвиля падає під кутом і трансформується в ПАХ, яка поширюється по поверхні зразка. Пройшовши певну відстань, ПАХ попадає на приймальну призму, де частина її трансформується в повздовжню хвилю і реєструється п'єзопластиною. Час проходження сигналу в цьому перетворювачі:

$$t_1 = t_{np1} + t_{zp1} + t_{np2}, \quad (1)$$

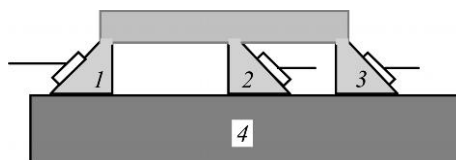
де t_{np1} та t_{np2} – час проходження акустичної хвилі крізь призми 1 та 2 відповідно; t_{zp1} – час проходження ПАХ поверхнею зразка.

Рис. 1. Вимірювання швидкості ПАХ:
1 – перетворювач; 2 – п'єзоелемент;
3 – зразок.



З допомогою калібрування можна визначити часи t_{np1} та t_{np2} , а також відстань, яку проходить ПАХ по зразку, а отже, знайти її швидкість. Зі зміною температури перетворювача часи t_{np1} та t_{np2} зміняться через температурну залежність швидкості акустичної хвилі в призмах перетворювача. Ці температурні впливи можуть бути сумірні із вимірюваними ефектами, оскільки часто досліджують досить незначні зміни швидкості. Для компенсації цієї похибки необхідно калібрувати перетворювач під час вимірювань з допомогою зразка із відомою швидкістю. Проте ця процедура збільшує трудомісткість і час вимірювань.

Рис. 2. Перетворювач для визначення швидкості ПАХ з двома реєструвальними призмами:
1 – призма збудження ПАХ;
2, 3 – призми їх реєстрації; 4 – зразок.



Для її спрощення запропоновано конструкцію перетворювача, в якому акустичний сигнал приймають дві призми, розміщені послідовно (рис. 2). Акустичний імпульс збуджується призмою 1 і поширюється зразком, після чого послідовно реєструється призмами 2 і 3. Ці два зареєстровані сигнали проходять різний шлях і зміщені за часом. Вимірявши часове зміщення між ними і різницю шляхів проходження, можна знайти швидкість ПАХ. Час проходження обох сигналів можна подати як

$$t_1 = t_{np1} + t_{zp1} + t_{np2},$$

$$t_2 = t_{np1} + t_{zp1} + t_{zp2} + t_{np3}, \quad (2)$$

де t_1, t_2 – часи проходження акустичного сигналу, зареєстрованого призмами 2 і 3 відповідно; $t_{np1}, t_{np2}, t_{np3}$ – часи проходження акустичної хвилі крізь призми 1; 2 та 3; t_{zp1}, t_{zp2} – часи проходження ПАХ по зразку між призмами 1 і 2 та 2 і 3. Різниця часів t_2 і t_1 відповідно буде:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_{zp2} + t_{np3} - t_{np2}. \quad (3)$$

Таким чином, різниця часів проходження двох акустичних сигналів містить доданок, який залежить від часу проходження ПАХ ділянками зразка. Як і в попередньому випадку, з допомогою калібрування перетворювача на еталонних зразках можна визначити різницю часів $t_{np3} - t_{np2}$, а також відстань, яку долає ПАХ упродовж часу t_{zp2} , а отже, за величиною Δt знайти її швидкість.

Вплив нестабільності температури на точність вимірювання швидкості. Розглянемо похибку вимірювань, спричинену зміною параметрів перетворювача внаслідок відхилення його температури від тієї, за якої його прокалибували. Основними причинами температурної похибки вимірювань є два механізми: зміна часу проходження акустичної хвилі в призмах перетворювача через зміну її

швидкості з температурою та зміна розміру ділянки зразка, яку долає ПАХ в результаті температурного розширення елементів перетворювача, що також змінює час її проходження. Зі зростанням температури перетворювача швидкість акустичної хвилі в його призмах, виготовлених із оргскла, зменшується, через що збільшується час проходження акустичної хвилі. Із підвищенням температури зростає і відстань між призмами, що також збільшує час проходження ПАХ по зразку. В конструкції перетворювача, зображеній на рис. 1, обидва механізми змінюють час проходження сигналу одного знака, що призводить до їх додавання і росту сумарної похибки. Інша ситуація, коли перетворювач (рис. 2) має дві реєструвальні призми. Як бачимо з виразу (3), час проходження акустичної хвилі крізь призму 2 віднімається від часу її проходження по зразку, що відкриває можливість скомпенсувати температурну похибку пристрою. Розглянемо зміну різниці часу проходження сигналу через перетворювач з двома приймальними призмами. Вираз (3) можна переписати у вигляді

$$\Delta t = \frac{L}{V_{зр}} + \frac{h_3}{V_{np}} - \frac{h_2}{V_{np}}, \quad (4)$$

де L – довжина ділянки зразка між призмами, на якій визначають швидкість ПАХ; h_2, h_3 – шляхи проходження акустичної хвилі в призмах 2 і 3. Зі зміною температури внаслідок зміни відстані L та швидкості V_{np} одержимо:

$$\Delta t(\Delta T) = \frac{L(1 + \alpha\Delta T)}{V_{зр}} + \frac{(h_3 - h_2)}{V_{np}(1 + \beta\Delta T)}, \quad (5)$$

де α – лінійний коефіцієнт температурного розширення для матеріалу перетворювача; β – коефіцієнт температурної зміни швидкості для речовини його призм. Таким чином, внаслідок зміни температури перетворювача виникне похибка вимірювання часу:

$$\delta\Delta t = \Delta t - \Delta t(\Delta T) = \frac{L\alpha\Delta T}{V_{зр}} + \frac{(h_3 - h_2)\beta\Delta T}{V_{np}(1 + \beta\Delta T)}, \quad (6)$$

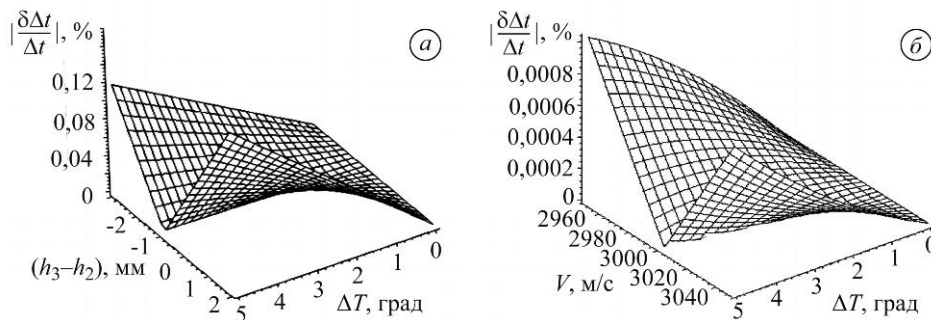


Рис. 3. Відносна температурна похибка вимірювання часу за зміни температури ΔT : a – залежно від різниці шляху в призмах перетворювача $h_3 - h_2$; b – залежно від швидкості поверхневої акустичної хвилі в зразку.

Цю величину можна мінімізувати вибором розмірів конструктивних елементів перетворювача, а також матеріалу, з якого він виготовлений. Оскільки у виразі присутня швидкість ПАХ зразка, то конкретний перетворювач з мінімальним значенням $\delta\Delta t$ можна виготовити для певної групи матеріалів з близьким значенням швидкості ПАХ $V_{зр}$. Для прикладу розглянемо перетворювач, виготовлений з оргскла ($\alpha = 6,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град, $\beta = -3$ м/(с·град), $V_{np} = 2760$ м/с), як зразок – сталь зі швидкістю ПАХ 3000 м/с. Відстань між приймальними перетворювачами візьмемо рівною 20 мм. На рис. 3 подана розрахована за цими даними залежність від-

носної похибки визначення часу проходження ПАХ по поверхні зразка від величини $h_3 - h_2$ і різниці між температурою, за якою відкалібровано перетворювач, і його температурою під час вимірювань. Отже, температурна похибка вимірювання часу і, відповідно, похибка вимірювання швидкості може становити кілька десятків відсотка. З іншого боку, за оптимального значення величини $h_3 - h_2$ її можна мінімізувати. Температурна похибка вимірювання часу зменшиться, оскільки компенсують температурну зміну швидкості акустичної хвилі в призмах перетворювача, змінюючи температурну відстань між призмами.

Таким чином, мінімальну похибку можна визначити за похибкою різниці шляхів у призмах перетворювача $h_3 - h_2$, а також враховуючи діапазон значень швидкостей зразка. З рис. 3а видно, що відхилення від оптимального значення різниці $h_3 - h_2$ на 0,1 мм призводить до похибки $\sim 0,005\%$, що в багатьох випадках прийнятне і точність виготовлення перетворювача можна легко реалізувати. З іншого боку, важливим також є діапазон швидкостей ПАХ зразка, за якого можна досягнути необхідної температурної похибки. На основі виразу (6) оцінено відносну похибку визначення часу (рис. 3б). Як бачимо, зі зміною швидкості ПАХ на 50 м/с температурна похибка вимірювання часу становитиме $\sim 0,001\%$, що дає можливість використовувати запропонований метод температурної стабілізації параметрів перетворювача для вимірювання зміни швидкості в деякому діапазоні швидкостей ПАХ зразка.

ВИСНОВКИ

Запропонована конструкція п'єзоелектричного перетворювача для вимірювання швидкості ПАХ, в якому реєструють дві хвилі, які здолали різну відстань по поверхні зразка. Показано, що зміну часу проходження акустичної хвилі в результаті зміни температури перетворювача можна мінімізувати. Вплив температури послаблено шляхом компенсації температурної зміни швидкості в призмах перетворювача і температурної зміни відстані між приймальними призмами.

1. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л.* Скорость звука и структура стали и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
2. *Rapid imaging of microstructure using spatially resolved acoustic / S. D. Sharples, S. D. Clark, W. Li, M. G. Somekh // 1st Int. Symp. on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications, July 16–18, 2008. – Montreal, Canada. – 2008. – 6 p.*
3. *Johnson C. and Thompson R. B.* The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1993. – 12. – P. 2121–2128.
4. *Мокрий О. М., Кошовий В. В., Семак П. М.* Методика вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль для діагностики стану металу // Відбір та обробка інформації. – 2014. – 41(117). – С. 43–48.
5. *Крауткрамер И., Крауткрамер Г.* Ультразвуковой контроль материалов: Справ. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
6. *Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А.* Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с.

Одержано 07.10.2015