

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

О. М. Мокрий, І. М. Романишин

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

E-mail: o.mokryy@gmail.com

Проаналізовано методичні аспекти вимірювання швидкості поверхневих акустичних релеївських хвиль. Основну увагу зосереджено на методиці визначення зміни швидкості поверхневих хвиль під впливом певних чинників на досліджуваний об'єкт та висвітлено основні джерела похибки. Встановлено, що точність зменшується внаслідок зміни температури вимірювального обладнання та перетворювача, а також через нестабільність акустичного контактного шару між елементами перетворювача та об'єктом досліджень. Експериментально оцінено температурну нестабільність під час тривалої роботи установки, а також нестабільність, спричинену контактним акустичним шаром між перетворювачем та об'єктом досліджень. Для компенсації температурної нестабільності вимірювальної системи використано зразок порівняння. Проаналізовано можливість застосовувати схеми із ним для послаблення ролі температурної нестабільності та похибки від нестабільності акустичного контакту перетворювача з досліджуваним об'єктом.

Ключові слова: акустичні хвилі, хвилі Релея, вимірювання швидкості акустичних хвиль, акустичний контакт.

OPTIMIZATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE VELOCITY OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

O. M. Mokryy, I. M. Romanyshyn

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

The methodological aspects of measuring the velocity of Rayleigh surface waves are considered. The main attention is paid to the method for determining the change in surface wave velocity under the influence of certain factors on the object of study. The main sources of error in determining the change in surface acoustic wave velocity are discussed. The use of a transducer with rigidly connected elements for exciting and recording surface acoustic waves to determine the change in velocity is examined. A distinctive feature of such a transducer is the stable measurement base length, which eliminates the need for its determination during the measurement process. It is shown that the main sources of decreased surface acoustic wave measurement accuracy are the temperature instability of the measuring equipment and the transducer, as well as the instability of the acoustic contact layer between the transducer elements and the object of study. The instability of the acoustic contact is caused by the uncertainty in the distribution of the coupling fluid between the transducer and the specimen during the bonding process, leading to changes in the acoustic signal propagation time. The source of temperature instability is random changes in the ambient temperature. Another source of such instability is the heating of equipment elements due to the release of heat when electrical and acoustic energy pass through them. This is particularly important for the transducer, where electrical energy is converted into acoustic energy, as a significant portion of it is transformed into heat. The magnitude of temperature instability arising from prolonged system operation, as well as the instability caused by the installation of the transducer on the object of study, is experimentally evaluated. The use of a reference sample to compensate for the temperature instability of the measurement system is considered. The possibility of using a measurement scheme with a reference sample to reduce temperature instability and the error caused by the instability of the acoustic contact between the transducer and the object of study is analyzed.

Keywords: acoustic waves, Rayleigh waves, measurement of the velocity of acoustic waves, acoustic contact.

Вступ. Для розвитку сучасних технологій та створення нових матеріалів необхідно вдосконалити методи їх вивчення. Перспективними є акустичні, оскільки

© О. М. Мокрий, І. М. Романишин, 2024

вони неруйнівні і можуть давати важливу інформацію про об'єкт досліджень. Одна з основних акустичних величин, що характеризує конденсовані середовища – швидкість поширення акустичних хвиль. Її часто застосовують для оцінки різноманітних явищ та матеріалів, в тому числі в неруйнівному контролі [1–6].

Швидкість залежить від пружних сталей середовища і його густини [7]. Також чинники, які призводять до зміни цих величини, можна опосередковано виявити за швидкістю поверхневої акустичної хвилі (ПАХ). Серед них – фазові переходи, пористість, механічні напруження, текстура металу, густина дислокацій тощо. Слід зауважити, що зручно вимірювати не саму швидкість, а її зміни під дією певних впливів, оскільки швидкість акустичної хвилі в матеріалі залежить від багатьох неконтрольованих причин. З іншого боку, таку зміну можна визначити зі суттєво більшою точністю, ніж саму швидкість [8].

ПАХ Релея поширюються по поверхні в шарі матеріалу товщиною, що близька довжині хвилі. З допомогою цих хвиль можна визначити характеристики поверхневих шарів матеріалів різної товщини, яка залежить від їх частоти. Відповідно, методи визначення швидкості ПАХ і об'ємних хвиль різняться.

У багатьох випадках швидкість акустичних хвиль змінюється несуттєво – на кілька відсотків або менше. Тому важливо розробити високоточні методи вимірювання швидкості ПАХ, а також оптимізувати їх до конкретних завдань.

Аналіз джерел похибок вимірювань. Швидкість поширення акустичної хвилі визначають за часом її проходження певної відстані в досліджуваному матеріалі. Тому поряд із вимірюванням часу актуально визначити відстань, що також складно через необхідну високу точність. Для ПАХ це завдання суттєво спрощується із використанням перетворювача, в якому збуджувальна та приймальна частини жорстко з'єднані між собою (рис. 1) [9]. Відстань, яку долає акустична хвиля, є незмінною для даного перетворювача. База вимірювання зберігається постійною за його переміщення. Стандартне відхилення швидкості σ_V визначають за виразом [9]

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

де L – база вимірювань, V – швидкість, σ_x , σ_t – стандартні відхилення відстані та часу, відповідно. Як бачимо, зменшити стандартне відхилення швидкості можна, збільшивши базу вимірювань і зменшивши стандартні відхилення відстані та часу. База вимірювань обмежена розмірами зразка і однорідної області, а також інтенсивністю загасання ПАХ у матеріалі. Для конкретних вимірювань можна вибрати оптимальне її значення [3]. Величину σ_x вважатимемо незмінною під час вимірювань, оскільки використовуємо перетворювач із постійною базою вимірювань. Проаналізуємо похибки вимірювання, які призводять до зміни часу проходження акустичного сигналу. Стандартне його відхилення можна записати так:

$$\sigma_t^2 = \sigma_{t0}^2 + \sigma_{tT}^2 + \sigma_{tc}^2, \quad (2)$$

де σ_{t0} , σ_{tT} , σ_{tc} – стандартні відхилення, пов'язані з інструментальними характеристиками обладнання, температурною нестабільністю обладнання, перетворювача та зразка, а також з неконтрольованою зміною часу проходження акустичної хвилі крізь шар контактної рідини між перетворювачем та досліджуваним матеріалом, відповідно.

Таким чином, можна виділити три основні групи похибок: інструментальна вимірювального обладнання; вимірювань, спричинена температурною нестабільністю досліджуваного зразка, вимірювального обладнання та перетворювача;

зумовлена впливом невизначеності акустичного контактного шару між перетворювачем та досліджуваним матеріалом.

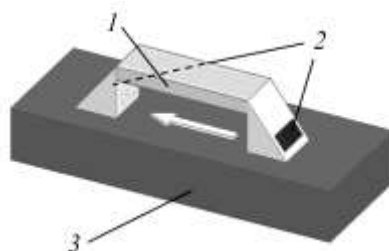


Рис. 1. Перетворювач для вимірювання швидкості ПАХ, розміщений на об'єкті контролю:
1 – перетворювач, 2 – п'єзоелементи, 3 – об'єкт контролю,
стрілкою показано ділянка поширення ПАХ.

Сучасна техніка дає можливість вимірювати часові інтервали з достатньо малою похибкою, а тому можна вважати, що інструментальна похибка суттєво менша за дві інші. В подальшому аналізуватимемо шляхи зменшення лише двох останніх джерел похибок шляхом вибору оптимальної схеми вимірювання, яка суттєво залежить від поставлених завдань. Одним із типових застосувань швидкості ПАХ є визначення її зміни в матеріалі під дією певних чинників. Наприклад, такі вимірювання можна використати, досліджуючи пластичну деформацію, наводнювання, втомні зміни, обробку матеріалу під час різноманітних технологій. Вимірюють швидкість у початковому стані матеріалу і після дії відповідного чинника. Тут важливо це здійснювати в однакових умовах, оскільки їх нестабільність може призвести до неконтрольованих змін швидкості ПАХ. Особливо це актуально, коли вони незначні. В першу чергу йдеться про вимірювання за однакової температури, оскільки її зміна може значно вплинути на час проходження сигналу через вимірювальну систему і об'єкт дослідження. Температура впливає не тільки на швидкість поширення ПАХ у матеріалах, а й в елементах конструкції перетворювача. З її зміною змінюються часові затримки вимірювального обладнання. Ці впливи слід мінімізувати, оскільки загальна похибка вимірювання часу проходження акустичного імпульсу, як правило, незначна і становить кілька наносекунд. Джерелами температурної нестабільності умов вимірювання є вплив зовнішнього середовища, а також нагрів обладнання внаслідок роботи, через що змінюються його характеристики. В перетворювачі під час генерації акустичних хвиль втрати на тепло можуть перевищувати 50% [10]. Досліджуваний матеріал теж нагрівається через контакт із перетворювачем та через поглинання ним акустичної хвилі. Це призводить до зміни часу проходження акустичної хвилі. Наприклад, в оргсклі, з якого виготовлені призми перетворювача, температурний коефіцієнт швидкості становить 0,12%/град.

Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є термостабілізація умов вимірювання, проте це не завжди можливо і, крім того, ускладнюється процес. Ефективнішими є методики, які дають можливість послабити цей ефект. На рис. 2 подано залежність зміни часу проходження акустичного сигналу через зразок низьковуглецевої сталі після ввімкнення вимірювальної установки [11]. Використовували перетворювач із базою вимірювань 60 мм і частотою акустичної хвилі 3 МГц. Як видно із рисунку, час проходження зміщується приблизно на 0,12 нс/хв, що може призвести до відчутної похибки вимірювань.

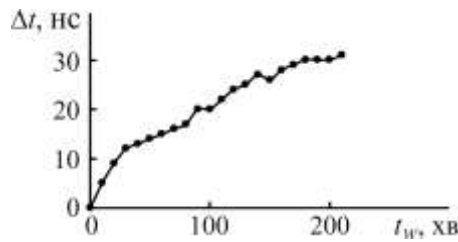


Рис. 2. Залежність зміни часу проходження сигналу Δt від часу роботи вимірювальної установки t_w .

Іншим важливим чинником, який суттєво впливає на точність визначення швидкості ПАХ, є нестабільність контактної рідини, який використовують, щоб полегшити проходження акустичної хвилі від перетворювача до об'єкта дослідження і навпаки. Оскільки амплітуда коливань хвилі становить десятки нанометрів, то для їх передавання між перетворювачем та об'єктом досліджень поміщають контактну рідину. Цей шар, який за кожного розташування перетворювача є неповторюваним, впливає на проходження акустичної хвилі. Так виникає неконтрольована похибка часової затримки сигналу. Оцінювали часову невизначеність від нестабільності контактної рідини, коли перетворювач багато разів встановлювали на той самий зразок і визначали час проходження ПАХ. Застосовували перетворювач із базою 60 мм, частота акустичної хвилі 3 МГц, як контактну рідину вживали гліцерин. Для десяти встановлень розраховували стандартне відхилення, яке становило 1,9 нс. Таким чином, вплив невизначеності акустичного контакту співмірний із впливом температурної нестабільності.

Оптимізація методики вимірювань. Існує кілька шляхів, щоб послабити вплив нестабільності температури та контактної рідини. Особливо складно зменшити вплив невизначеності акустичного контакту. Основні зусилля тут слід спрямувати на підбір форми контактної поверхні перетворювача, зменшення її шорсткості, створення перетворювача із контактною поверхнею, яка максимально відповідає формі поверхні зразка, а також на вибір контактної рідини із оптимальними властивостями. Інший підхід полягає у додатковому визначенні характеристик контактної рідини під час вимірювань [12].

Зменшити вплив нестабільності температури на похибку вимірювання швидкості можна ефективніше. Серед шляхів, які її мінімізують, є: вимірювання температури елементів схеми та внесення відповідних поправок, а також використання спеціальної конструкції перетворювача, яка послабить цей вплив. Проте ці підходи суттєво ускладнюють вимірювання та часто лише частково зменшують вплив температури. Ефективніші схеми вимірювань, які дають можливість цей вплив скомпенсувати.

Розглянемо схеми, що мінімізують вплив нестабільності температури та акустичного контакту (рис. 3), які відрізняються складністю, а також стійкістю до дії цих джерел похибок вимірювань.

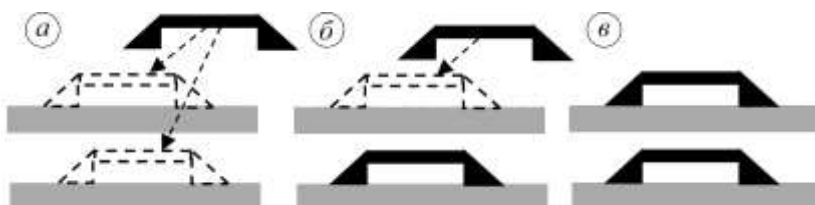


Рис. 3. Схеми вимірювання швидкості ПАХ.

а) Тут перетворювач послідовно розташовують на досліджуваному об'єкті та зразку порівняння і вимірюють швидкість поширення ПАХ (рис. 3а). Її визначають за часом проходження сигналом відстані на поверхні зразка, що дорівнює базі вимірювань, а також крізь елементи перетворювача. Знаходять різницю часу проходження сигналу, коли перетворювач розміщений на досліджуваному об'єкті і на зразку порівняння. В цьому випадку вона буде:

$$\Delta t = t_{t2} + t_{c2} + \frac{L}{V_{R2}} - \left(t_{t1} + t_{c1} + \frac{L}{V_{R1}} \right), \quad (3)$$

де t_{ti} – затримка сигналу в перетворювачі та елементах обладнання, t_{ci} – його затримка в шарі контактної рідини, V_{Ri} – швидкість ПАХ у матеріалі; якщо $i = 1$, то перетворювач розміщений на зразку порівняння, а якщо $i = 2$ – то на досліджуваному об'єкті. Таким чином, згідно з виразом (3), за величиною Δt та відомих L та V_{R1} можна знайти швидкість ПАХ в досліджуваному зразку:

$$V_{R2} = \frac{LV_{R1}}{(\Delta t + t_{t1} + t_{c1} - (t_{t2} + t_{c2}))V_{R1} + L}. \quad (4)$$

Нестабільність температури призведе до зміни часового зсуву сигналу в перетворювачі та обладнанні, який буде однаковий під час встановлення перетворювача на досліджуваній об'єкт та зразок порівняння ($t_{t1} = t_{t2}$). Часова нестабільність проходження сигналу через нестабільність акустичного контакту буде різною для кожного встановлення. Таким чином, у цій схемі основною є похибка від нестабільності акустичного контакту за встановлення перетворювача на об'єкт досліджень і зразок порівняння. В цьому випадку через температурну нестабільність вимірювального обладнання, досліджуваного зразка, а також конструкційних елементів перетворювача похибки будуть мінімальні, оскільки ці зміни достатньо повільні (рис. 2) і їх можна вважати постійними під час вимірювань.

б) У цій схемі (рис. 3б) використовують два ідентичні перетворювачі. Один встановлюють на об'єкт досліджень, а інший – стаціонарно на зразок порівняння. Тому в останньому випадку похибка, спричинена нестабільністю контактної шару, є постійною і не впливає на точність вимірювання. Визначають зміну часу проходження акустичної хвилі в об'єкті досліджень відносно зразка порівняння до і після впливу певного чинника на цей об'єкт. Джерелом похибки тут є лише нестабільність акустичного контакту за встановлення перетворювача на об'єкт контролю.

в) Тут використовують два ідентичні перетворювачі, один з яких встановлюють на об'єкт досліджень, а інший – на зразок порівняння (рис. 3в). Обидва розміщують стаціонарно. Таку схему застосовують для вивчення часових змін швидкості ПАХ у матеріалах, зокрема, властивостей сталевих зразка після наводнення. Вона позбавлена впливу нестабільності акустичного контакту, оскільки він стаціонарний. Також відсутня температурна нестабільність, оскільки температура впливає на обидва вимірювальні канали однаково, а отже, ці зміни компенсуються.

Таким чином, в усіх трьох схемах вплив нестабільності температури вимірювань скомпенсований. Похибка від нестабільності акустичного контакту тут різною. Якщо зміна швидкості ПАХ значно перевищує похибку, зумовлену нестабільністю акустичного контакту, можна використовувати схему а). У схемі із одним стаціонарним перетворювачем вплив нестабільності акустичного контакту слабший, оскільки він стосується лише нестаціонарного перетворювача (схема б)). Недоліком такої схеми є необхідність використовувати два однакових перетворювачі. Схема в) позбавлена впливу нестабільності акустичного контакту, проте

її можна застосовувати тільки для досліджень, під час яких зберігається незмінним акустичний контакт перетворювача зі зразком.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано методики визначення швидкості та реєстрації ПАХ під час контактного їх збудження. Оцінено вплив температурної нестабільності та невідзначеності параметрів акустичного контактного шару рідини на точність визначення зміни швидкості ПАХ. Встановлено, що зменшити вплив нестабільності температури можна, використовуючи зразок порівняння. Негативний вплив нестабільності контактного шару завжди присутній під час встановлення перетворювача, тому лише за його стаціонарного розміщення можна усунути це джерело похибки вимірювань.

1. Lu, Y.; Xu, C.; Pan, Q.; Li, D. Research on an ultrasonic longitudinal critically refracted wave detection method for the depth distribution of stress. *Metals*. **2022**, 12(10), 1602. <https://doi.org/10.3390/met12101602>
2. Schneider, D.A. *LWave® – A Nondestructive device for testing thin films, coatings and material surfaces by laser induced surface acoustic waves*; Fraunhofer IWS Dresden, **2013**.
3. Mokryy, O.; Tsyrunyk, O. Technique for measuring spatial distribution of the surface acoustic wave velocity in metals. *Archives of Acoustics*. 2016, **41**(4), 741–746. <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0071>
4. Gartsev, S.; Köhler, B. Direct measurements of Rayleigh wave acoustoelastic constants for shot-peened superalloy. *NDT & E International*. **2020**, 113, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102279>
5. Xuan, W.; Yuan, M.; Ji, X.; Xu, W.; Chen, Y.; Zeng, L. Local stress measurement in thin aluminum plates based on zero-group-velocity Lamb mode. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. **2023**, 36(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00855-z>
6. Sarris, G.; Haslinger, S.G.; Huthwaite, P.; Lowe, M.J. Ultrasonic methods for the detection of near surface fatigue damage. *NDT & E International*. **2023**, 135, 102790. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102790>
7. *Acoustic surface waves*; Oliner, A.A., Ed.; Topics in Applied Physics, Vol. 24; Springer-Verlag, 1978.
8. Truell, R.; Elbaum, C.; Chick, B.B. *Ultrasonic methods in solid state physics*; Academic Press, 2013.
9. Johnson, C.; Thompson, R.B. The spatial resolution of Raileigh wave, acoustoelastic measurement of stress. In *Review of Progress in Quantitative Nondescription Evolution*; Thompson, D.O., Chimenti, D.E., Eds.; Plenum Press, 1993, pp 2121–2128. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2848-7_272
10. Skalskyi V.R.; Sulym G.T. *Basics of acoustic methods of non-destructive testing: educational manual*; Ivan Franko LNU Publishing Center, 2010. (in Ukrainian)
11. Mokryy, O.M.; Koshovyv, V.V.; Semak, P.M. Method of measuring the velocity of surface acoustic waves to diagnose the state of the metal. *Information Extraction and Processing*. **2014**, 41(117), 43–48. (in Ukrainian)
12. Skalskyi, V.R.; Mokryi, O.M.; Rudavskyi, D.V.; Kanyuk, Yu.I. The method of determining the velocity of acoustic waves in solids taking into account the influence of acoustic contact. Patent of Ukraine 119902, IPC G01H 5/00, December 10, 2018. (in Ukrainian)

Одержано 14.05.2024