

ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 534.6.08

О. М. Мокрий, В. В. Кошовий, П. М. Семак

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ МЕТАЛУ

The method of measuring surface acoustic wave velocity using contact prism piezoelectric transducer, in which the excitation and registering parts are rigidly linked as well as using technique of laser registration of these waves, is considered. An approach where laser technique is used to create the reference samples that are used to calibrate the contact piezoelectric transducer is suggested. The influence of temperature changes of transducer for measurement accuracy is analyzed and requirements to the reference sample, in which the measurement error is minimal, are formulated.

Keywords: *surface acoustic waves, acoustic wave velocity.*

Розглянуто методику вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль за допомогою контактної призмової п'єзоелектричної перетворювача, в якому збуджуюча та реєструюча частини є жорстко зв'язані між собою, а також методику з використанням лазерної реєстрації цих хвиль. Запропоновано підхід, в якому лазерну методику застосовують для створення еталонних зразків, які використовують для калібрування контактної п'єзоелектричної перетворювача. Проаналізовано вплив зміни температури перетворювача на точність вимірювань і сформульовано вимоги до еталонного зразка, при яких похибка вимірювань буде мінімальна.

Ключові слова: *поверхневі акустичні хвилі, швидкість акустичних хвиль.*

Діагностика стану металів є важливим завданням неруйнівного контролю. Серед різноманітних методів діагностики ефективними є акустичні методи, в яких використовується поширення різноманітних типів хвиль у досліджуваних об'єктах. При цьому вимірюють швидкість поширення, поглинання та розсіювання акустичних хвиль. Ці параметри залежать від таких чинників, як структура металу, внутрішні напруження, пластична деформація, ступінь наводнення тощо [1]. Зв'язки акустичних властивостей металів із іншими характеристиками (твердістю, деградаційними змінами та ін.) дають змогу проводити їх непрямі вимірювання, що може бути використано для прогнозування ресурсу різноманітних об'єктів господарства.

Важливе місце в дослідженні стану металу займають поверхневі акустичні хвилі (ПАХ). Їх особливістю є те, що вони поширюються в приповерхневому шарі зразка, проникаючи в глибину на величину, рівну кільком довжинам хвиль. Область частот акустичних хвиль, які використовуються в неруйнівному контролі, становить від одиниць до десятків мегагерц. Для ПАХ величина частоти передусім визначає глибину проникнення хвилі в зразок, що в більшості матеріалів становить від долей до кількох міліметрів. Одним з найбільш поширених акустичних параметрів, які використовують для досліджень властивостей металу, є швидкість акустичних хвиль [1]. Це пояснюється наявністю методик, які дають можливість її вимірювати з високою точністю, а також її чутливістю до різноманітних впливів на метал. Слід відмітити, що вимірювання швидкості ПАХ має ряд переваг порівняно із вимірюванням швидкості об'ємних акустичних хвиль. Насамперед це можливість проводити вимірювання майже у будь-яких зразках, оскільки для вимірювань потрібна лише одна поверхня, тоді як для вимірювання

© О. М. Мокрий, В. В. Кошовий, П. М. Семак, 2014

швидкості об'ємних хвиль, як правило, потрібні зразки, в яких є дві поверхні, розміщені паралельно, причому з достатньо великою точністю [2].

Слід відмітити, що саму величину швидкості ПАХ складно використовувати для оцінки стану металу. Більш дієвим є використання величини зміни швидкості під дією певних чинників. Це пов'язано з тим, що величина швидкості акустичних хвиль може бути різною в металі однієї і тієї ж марки залежно від певних відхилень у технології його виготовлення [3]. Зміна ж швидкості, яка супроводжує певні процеси в металі, що досліджуються, є достатньо малою і тому співмірна з початковим розкидом значень швидкості.

Хоча вимірюванню швидкості поверхневих акустичних хвиль присвячено достатньо багато робіт, в наш час також продовжують розроблятися нові методики, що зумовлене необхідністю вирішення нових завдань [4]. В цій роботі для збудження та реєстрації ПАХ використовуються призмові перетворювачі [5] і визначається час проходження акустичної хвилі по шляху призма–поверхня зразка–призма. Час проходження ПАХ вимірюють для різних відстаней між призмами. На підставі цих даних розраховують швидкість ПАХ. В цій методиці обмеження точності пов'язане з неточністю вимірювання відстані між призмами. Це обмеження усувається в методиці із жорстко зв'язаними збуджуючою та приймальною призмами [1]. Збуджуюча та приймальні призми виконані конструктивно як одне ціле, що приводить до стабільної відстані, яку проходить ПАХ. Це позбавляє необхідності проводити виміри відстані між призмами і дає можливість спростити вимірювання, зберігши їх високу точність.

Крім контактних методів, існують безконтактні лазерні методи вимірювання швидкості ПАХ [6]. Основна відмінність полягає в способі збудження чи/ї реєстрації ПАХ. Ці методи мають ряд переваг порівняно з контактними методами. Передусім це точна локалізація і малий розмір ділянки, в якій реєструється ПАХ, що пов'язано з розміром плями зондуючого лазерного променя на поверхні зразка. Використання лазерної реєстрації ПАХ не вимагає приклеювання перетворювача до зразка і відповідно не спотворює акустичного поля. Особливо привабливим є простота переміщення лазерного променя по поверхні зразка і можливість з високою точністю визначити координати положення променя лазера на зразку, що важливо для вимірювання швидкості ПАХ. Водночас безконтактні лазерні методи мають і свої недоліки. До них слід віднести більшу складність юстування вимірювальної схеми і більш критичні вимоги до умов вимірювань, насамперед до вібрацій. Це приводить до того, що лазерні методи визначення швидкості ПАХ, попри свої переваги, є більш трудомісткі порівняно із контактними методами.

Враховуючи переваги і недоліки різних методів, ми запропонували методику вимірювання швидкості ПАХ, в якій використовуються одночасно контактні та безконтактні методи реєстрації акустичних хвиль. Це дає змогу оптимізувати процес досліджень відносно точності та необхідних трудозатрат при вимірюваннях.

Методика вимірювань швидкості ПАХ. Схема установки для вимірювання швидкості ПАХ зображена на рисунку. Радіоімпульс з генератора подається на вимірюючий перетворювач, за допомогою якого збуджується та реєструється ПАХ, зареєстрований сигнал підсилюють, оцифровують за допомогою осцилографа і записують у пам'ять комп'ютера. На основі отриманої інформації знаходять час затримки сигналу при його проходженні через вимірювальний перетворювач і досліджуваний зразок. Таким самим способом знаходять час затримки сигналу в еталонному зразку. Різниця часів затримки сигналу в досліджуваному та еталонному зразках дає змогу, з допомогою калібрувальної залежності, знайти швидкість ПАХ у досліджуваному зразку.

Важливою частиною вимірювальної установки є вимірювальний перетворювач (див. 2 на рисунку), в якого збуджуюча і приймальна призми жорстко зв'язані

ні. Об'ємна повздовжня акустична хвиля збуджується п'єзоелектриком, поширюється у призмі і падає на границю середовищ призма–досліджуваний зразок під кутом α , який визначається характеристиками матеріалу призми і зразка. Значення цього кута вибирають таким, щоб акустична хвиля не проходила в досліджуваний зразок, а перетворювалась у ПАХ, яка поширюється по поверхні зразка. ПАХ поширюється по границі середовищ призма–зразок і далі по вільній поверхні зразка до приймальної призми. У приймальній призмі відбувається обернена трансформація поверхневої хвилі в об'ємну і її реєстрація приймальним п'єзоелектриком. Отже, час проходження сигналу через вимірювальний перетворювач складається з часів проходження через різні ділянки, і лише одна з них пов'язана із поширенням ПАХ по поверхні зразка. Під час вимірювання реєструють сумарний час затримки, на основі якого треба знайти швидкість ПАХ на вільній поверхні зразка. Найпростіше це зробити за допомогою калібрування вимірювального перетворювача. Для цього необхідно мати зразки із відомою величиною швидкості ПАХ. Вимірявши часову затримку сигналу для цього вимірювального перетворювача для зразків із різною величиною швидкості ПАХ, можна отримати калібрувальну залежність, на основі якої визначати швидкість ПАХ для досліджуваних зразків. Використання калібрувальної залежності дає можливість відносно просто і надійно визначати швидкість ПАХ, вимірюючи лише час затримки сигналу і не проводячи вимірювання відстані, яку пройшла по поверхні зразка хвиля.

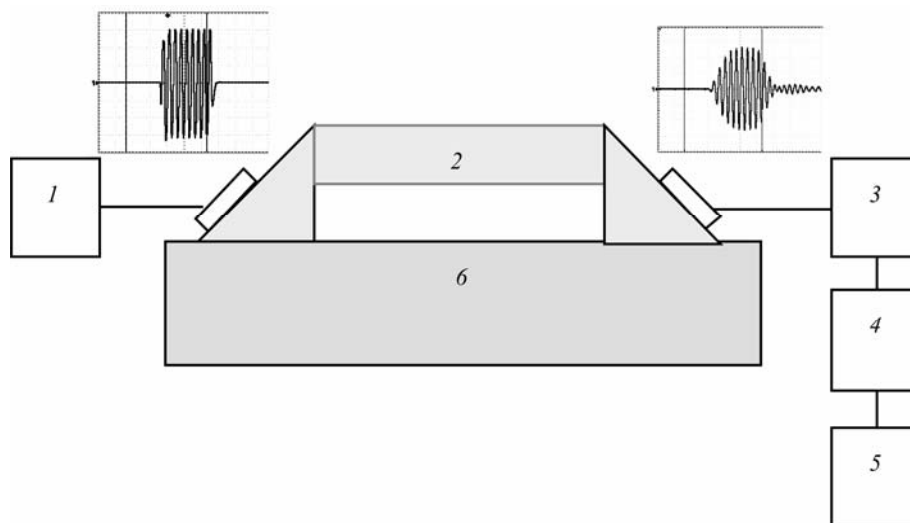


Схема установки для вимірювання швидкості поширення поверхневих акустичних хвиль: 1 – генератор; 2 – перетворювач; 3 – підсилювач; 4 – осцилограф; 5 – комп'ютер; 6 – зразок.

Величини швидкостей ПАХ еталонних зразків, виготовлених із різних матеріалів, можна знайти за допомогою лазерних методів вимірювання швидкості ПАХ, які дають змогу провести вимірювання з високою точністю. Перевага цих методів базується на можливості локалізувати зону реєстрації ПАХ до ділянки розміром декілька десятків мікрометрів, відсутності акустичного контакту перетворювача із зразком, а також можливістю легко переміщати реєструючий лазерний промінь по зразку з великою точністю.

Однією з основних джерел похибок вимірювання швидкості ПАХ є температура нестабільність перетворювача [1]. Зміна температури перетворювача виникає внаслідок нагріву перетворювача при перетворенні електричної енергії в акустичну, а також внаслідок нестабільності зовнішніх температурних умов. На-

грів перетворювача залежить від потужності акустичних імпульсів, які використовують при вимірюваннях, їх тривалості і частоти повторення. Зовнішні температурні умови часто є мало контрольовані і при тривалих вимірюваннях можуть значно змінюватись. Зміна температури вимірювального перетворювача призводить до зміни швидкості акустичної хвилі в ньому і, відповідно, змінюється загальний час проходження сигналу. Це може сприйматись як зміна швидкості ПАХ досліджуваного зразка. Крім того, зміна температури перетворювача призводить до зміни його розмірів, що теж спричинює зміну часу проходження сигналу.

Оцінимо величину похибки вимірювань, яка виникає внаслідок температурної зміни швидкості акустичної хвилі у призмах перетворювача. Прийmemo, що температура змінюється на 5°C, призми перетворювача виготовлені із оргскла (швидкість повздовжньої хвилі рівна 2700 м/с, проводиться дослідження сталеного зразка (швидкість ПАХ дорівнює 3000 м/с). Також задамо типові розміри перетворювача – шлях проходження акустичної хвилі в призмах перетворювача 10 мм, а шлях проходження ПАХ по зразку – 20 мм. Для оргскла температурний коефіцієнт зміни швидкості становить близько 0,12%/град. Загальний час проходження сигналу через призми становить 3,704 мкс, час проходження ПАХ по зразку становить 6,667 мкс. При зміні температури на 5°C час проходження акустичної хвилі через призми перетворювача зміниться на 0,022 мкс. Ця величина становить 0,33% від часу проходження ПАХ по поверхні зразка. Крім того, зміна розмірів призм перетворювача та розмірів ділянки проходження ПАХ по зразку внаслідок температурного розширення буде становити 0,03% (коефіцієнт лінійного розширення $6 \cdot 10^{-5}$ 1/град). Зміна розмірів приведе до зміни часу проходження сигналу на 3 нс, що становитиме 0,05% від часу проходження ПАХ по поверхні зразка. Таким чином сумарна величина похибок, спричинена нестабільністю температури перетворювача, є достатньо велика і часто співмірна із величинами досліджуваних ефектів у металах [7].

Методика, в якій визначається різниця часів проходження хвиль в еталонному та досліджуваному зразках, дає змогу зменшити похибку, пов'язану із нестабільністю температури вимірювального перетворювача. При вимірюваннях визначають не весь час проходження сигналу, а лише різницю часів запізнення сигналу в досліджуваному й еталонному зразках. Таким чином, швидкість ПАХ досліджуваного зразка буде:

$$V = V_e + \Delta V(\Delta t), \quad (1)$$

де V – швидкість ПАХ досліджуваного зразка; V_e – швидкість ПАХ еталонного зразка; ΔV – різниця швидкостей в зразку і еталоні, знайдена за допомогою калібрувальної залежності; Δt – різниця часів проходження сигналу під час вимірювання в досліджуваному зразку і еталоні.

Час затримки сигналу під час вимірювання швидкості в досліджуваному зразку можна записати так:

$$t_s = \frac{a}{V_{ss}} + \frac{b}{V_{lon}}, \quad (2)$$

де t_s – час проходження сигналу через вимірювальний перетворювач; a – розмір області зразка, по якій поширюється ПАХ; b – ефективна сумарна довжина шляху в призмах, по якому проходить повздовжня акустична хвиля; V_{ss} – швидкість ПАХ у зразку; V_{lon} – швидкість повздовжньої хвилі в призмах перетворювача. Відповідно, під час вимірювання швидкості ПАХ еталону час затримки

$$t_e = \frac{a}{V_{se}} + \frac{b}{V_{lon}}, \quad (3)$$

де V_{se} швидкість ПАХ в еталоні. Відповідно різниця часів проходження сигналу для еталону та зразка така:

$$t_e - t_s = a \left(\frac{1}{V_{se}} - \frac{1}{V_{ss}} \right), \quad (4)$$

На основі калібрувальної залежності, вимірявши величину $t_e - t_s$, можна визначити швидкість у досліджуваному зразку V_{ss} .

При калібруванні перетворювача при певній температурі він характеризується відповідними значеннями величин a , b , V_{lon} . У випадку зміни температури перетворювача ці величини теж змінюються, що спричинює похибку вимірювань. При зміні температури перетворювача змінюється час проходження акустичної хвилі через нього внаслідок температурної зміни швидкості в елементах перетворювача, а також змінюються розміри перетворювача внаслідок лінійного температурного розширення. Для температури, відмінної від температури, при якій було здійснено калібрування замість виразу (2) необхідно записати

$$t_s = \frac{a + \Delta a(\Delta T)}{V_{ss}} + \frac{b + \Delta b(\Delta T)}{V_{lon} + \Delta V_{lon}(\Delta T)}, \quad (5)$$

де ΔT – зміна температури відносно температури калібрування; $\Delta a(\Delta T)$, $\Delta b(\Delta T)$, $\Delta V_{lon}(\Delta T)$ – температурні зміни відповідних величин. Вираз (4) при зміні температури запишемо у такому вигляді:

$$t_e - t_s = a \left(\frac{1}{V_{se}} - \frac{1}{V_{ss}} \right) + \Delta a(\Delta T) \left(\frac{1}{V_{se}} - \frac{1}{V_{ss}} \right). \quad (6)$$

З цього виразу видно, що за умови вимірювання різниці часів проходження хвиль в досліджуваному та еталонному зразках можна скомпенсувати температурні зміни, пов'язані зі зміною швидкості V_{lon} у призмах перетворювача і з розмірами призми перетворювача b , оскільки ці величини відсутні у (6). Водночас у співвідношенні (6) є додатковий доданок порівняно із виразом (4), який не врахований при калібруванні і призводить до похибки вимірювань швидкості. Цю похибку можна зменшити за допомогою вибору характеристик еталонного зразка, а саме величина другого доданку у виразі (6) буде тим менша, чим ближчими будуть значення швидкостей ПАХ еталона та досліджуваного зразка. У випадку дослідження впливів різноманітних чинників на швидкість зразка швидкості еталонного і досліджуваного зразків можна зробити максимально близькими, коли еталон буде виготовлений з тієї самої речовини, що і досліджуваний зразок. В цьому випадку різниця швидкостей між еталонним та досліджуваним зразком буде задаватись значенням величини змін швидкості в зразку під дією досліджуваних ефектів.

Отже, порівняння часів проходження сигналу в еталонному та досліджуваному зразках у процесі вимірювань і вибору оптимального еталонного зразка дає змогу суттєво зменшити похибку вимірювання, пов'язану із температурною нестабільністю перетворювача.

ВИСНОВКИ

Запропоновано оптимізовану методику вимірювання швидкості ПАХ у металах із використанням перетворювача із жорсткозв'язаними збуджуючою та реєструючою призмами. Вимірювання базується на використанні двох методик – лазерної для створення еталонних зразків і методики з використанням контактної реєстрації для безпосереднього вимірювання швидкості досліджуваних зразків. Вимірюється різниця часів проходження акустичних хвиль в еталонному та досліджуваному зразках і на основі калібрувальної залежності визначається швид-

кість ПАХ. Показано, що використання оптимізованого еталонного зразка дає змогу суттєво зменшити похибку вимірювань, пов'язану із температурною нестабільністю перетворювача.

1. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л.* Скорость звука и структура стали и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
2. *Труел Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
3. *Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И. М. Полетика, Н. М. Егорова, О. А. Куликова, Л. Б. Зуев // Журн. техн. физики. – 2001. – 71, Вып. 3. – С. 37–40.*
4. *Гаранин Г. В., Ларионов В. В., Лидер А. М.* Лабораторная установка для измерения скорости распространения ультразвуковых волн в наводороженных металлах // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3. – С. 55–60.
5. *Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А.* Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с.
6. *Wagner J. W.* Optical Detection of ultrasound / Ed. R. N. Thurston // Physical Acoustics: Ultrasonic Measurement Methods. – 1990. – XIX. – P. 201–265.
7. *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.*

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

*Одержано
09.04.2014*