

УДК 534.6

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ НА ПОВЕРХНІ СТАЛЕВОГО ЗРАЗКА.*Скальський В.Р., Мокрий О.М.**Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
e-mail: skalsky.v@gmail.com, tokoto@lviv.farlep.net.*

Запропоновано методику визначення розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль в твердих тілах на основі використання контактного п'єзоелектричного перетворювача з двох клинів, які жорстко з'єднані між собою. Методика дозволяє оптимізувати роздільну здатність і чутливість вимірювань залежно від розподілу швидкості на поверхні. Розглянуто критерії, згідно яких можна вибрати величину роздільної здатності в певній ділянці об'єкта досліджень. Її застосування проілюстровано на визначенні розподілу швидкості поверхневої акустичної хвилі на поверхні сталюого пластично деформованого зразка.

Ключові слова: пластична деформація, п'єзоелектричний перетворювач, поверхнева акустична хвиля, роздільна здатність.

Предложена методика определения распределения скорости поверхностных акустических волн в твердых телах на основании использования контактного пьезоэлектрического преобразователя из двух клиньев, которые жестко соединены между собой. Методика позволяет оптимизировать разрешающую способность и чувствительность измерений в зависимости от распределения скорости на поверхности. Рассмотрены критерии, согласно которым можно избрать величину разрешающей способности в некотором участке объекта исследований. Ее использование проиллюстрировано на определении распределения скорости поверхностной акустической волны на поверхности стального пластически деформированного образца.

Ключевые слова: пластическая деформация, пьезоэлектрический преобразователь, поверхностная акустическая волна, разрешающая способность.

The method of determination of velocity distribution of surface acoustic waves in solid has been proposed using piezoelectric transducer composed from two rigidly jointed wedges. The technique allows to optimize the resolution and sensitivity of the measurements depending on the velocity distribution at the surface. The criteria of the resolution selection at the certain area of the object under testing has been considered. Method has been illustrated in case of velocity distribution determination of acoustic waves at the surface of the plastically deformed steel specimen.

Keywords: plastic deformation, piezoelectric transducer, surface acoustic wave, resolution.

Вступ

Акустичні методи ефективно застосовують для дослідження стану металу. З допомогою методів акустичної емісії [1] та ультразвукової дефектоскопії [2] можна виявляти дефекти, їх координати та орієнтацію в елементах конструкцій. Разом з тим важливо діагностувати стан металу перед самим утворенням дефекту, а також стан, який виник після впливу різноманітних технологічних чинників. Таке діагностування можна здійснювати за величиною зміни характеристик металу. Для цього зручно використовувати показник зміни швидкості акустичних хвиль, в тому числі поверхневих (ПАХ). Їх швидкість поширення залежить від пружних модулів і густини, тому зміни цих характеристик під дією різних

фізичних чинників спричиняють зміну швидкості ПАХ [3]. Вона також чутлива до виникнення різних мікрodefektів та мікропор [4, 5], зміни текстури металу [6], залишкових механічних напружень [7], фазового стану [4] тощо. Особливістю використання показника швидкості ПАХ в неруйнівному контролі є можливість визначати її розподіл на поверхні об'єкта контролю, оскільки можна легко змінювати місце збудження та реєстрації хвилі. Ця властивість ПАХ є важливою для діагностування стану металу, оскільки часто зміни в ньому носять локальний характер. Виникнення defektів та ділянок із передedefekтним, тобто таким, що максимально наближений до утворення defektу станом, є просторово локалізованим. Сюди можна віднести виникнення локальної пластичної

деформації в металі під дією експлуатаційних навантажень.

З метою оцінки залишкового ресурсу виробу ефективною є оцінка розмірів області, в якій відбулась пластична деформація. Її можна визначити за допомогою визначення розподілу швидкості ПАХ на поверхні зразка. В пластично деформованій ділянці металу спостерігається зменшення величини швидкості проходження ПАХ [4, 8]. Іншим прикладом використання розподілу швидкості ПАХ є аналіз стану металу після різноманітних локальних технологічних процесів [4]. Така методика застосована для діагностики зварних швів [9]. Окремо можна виділити методику визначення розподілу температури на поверхні зразка з допомогою вимірювання розподілу швидкості ПАХ [10]. Отже, існує низка важливих прикладних і наукових аспектів, для вирішення яких необхідно вимірювати розподіл швидкості ПАХ на поверхні зразка і тому актуальним є розвиток методів його побудови.

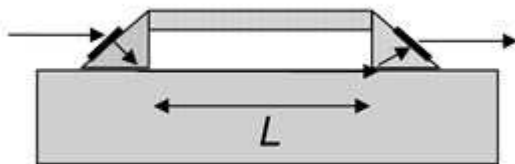


Рисунок 1 – Конструкція перетворювача з жорстким з'єднанням механізмів

Традиційна методика вимірювання швидкості ПАХ полягає у збудженні хвилі на поверхні зразка і її реєстрації в одній або декількох ділянках на певній відстані між первинними перетворювачами. Швидкість визначають за вимірюваною величиною часу, протягом якого ПАХ проходить цю відстань. Таким чином, для вимірювання швидкості ПАХ необхідно вимірювати час і відповідну відстань. Зазначимо, що оскільки часто зміни швидкості ПАХ є достатньо малими, то вимірювання цих величин необхідно проводити з високою точністю. Часову затримку акустичної хвилі можна виміряти достатньо точно за допомогою відносно простих вимірювальних засобів та обладнання. Більш складним є вимірювання відстані між ділянками, на яких реєструється ПАХ. Найпростішим вирішенням питання вимірювання відстані є використання перетворювача із жорстко з'єднаними клинами (рис. 1). В ньому ПАХ збуджують з допомогою одного клина і реєструють іншим. Визначають

час проходження ПАХ відстані L , яка є базою вимірювань і може бути визначена методом калібрувальних замірів. Перевагою такого первинного перетворювача є відсутність потреби вимірювати відстань, оскільки вона задана конструкцією перетворювача. З іншого боку, постійна величина бази перетворювача є недоліком, бо не дозволяє вимірювати просторові неоднорідності, величина яких менша за розмір бази. З точки зору роздільної здатності ефективнішою є схема вимірювань, в якій клини переміщують один відносно іншого. Вона дозволяє змінювати базу вимірювання відповідно до розмірів неоднорідностей об'єкта досліджень, проте необхідність вимірювати положення перетворювачів з великою точністю є її недоліком.

Роздільна здатність і точність вимірювання є обернено пропорційними величинами. Зі збільшенням величини бази вимірювань точність вимірювання швидкості зростає, а роздільна здатність – зменшується. Таким чином, існує необхідність оптимізації цих двох величин під час дослідження конкретного об'єкта. Розглянуті схеми вимірювань не дозволяють проводити таку оптимізацію. Тому нами запропонована схема з використанням перетворювача із жорстко з'єднаними клинами, який під час вимірювань зміщується на величину, меншу за його базу. Таку схему можна використовувати для визначення швидкості ПАХ в одній ділянці зразка відносно іншої. Її перевагою є можливість змінювати роздільну здатність під час вимірювань.

2. Методика вимірювання швидкості ПАХ.

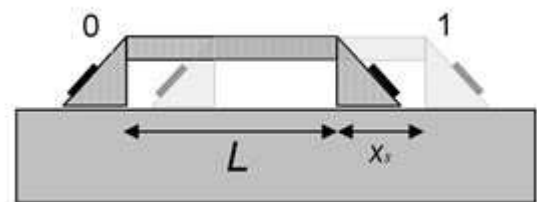


Рисунок 2 – Схема вимірювання при переміщенні перетворювача

Розглянемо методику вимірювання розподілу швидкості ПАХ на поверхні зразка з допомогою перетворювача, показаного на рис. 1. Переміщуючи перетворювач по поверхні зразка (рис. 2) можна виміряти розподіл швидкості ПАХ. Таким перетворювачем визначається усереднена швидкість ПАХ на відстані, яка дорівнює його базі, а роздільна

здатність визначається величиною бази перетворювача. Розглянемо випадок, коли переміщення відбувається в напрямку поширення ПАХ. Час проходження акустичної хвилі через перетворювач буде визначено як:

$$t = t_p + t_{sp} + t_g, \quad (1)$$

де t_p – час проходження акустичної хвилі через клини перетворювача, t_{sp} – час проходження ПАХ по поверхні зразка, t_g – час проходження акустичної хвилі через контактні шари склейки між клинами перетворювача та зразком. Калібруванням визначають величини t_p і t_g , а також базу вимірювання для конкретного перетворювача. Для цього використовують вимірювання часу проходження сигналу через перетворювач на зразках із відомою швидкістю поширення ПАХ. Після калібрування перетворювача можна знайти швидкість ПАХ об'єкта контролю, вимірявши час проходження t :

$$V = \frac{L}{t_{sp}}. \quad (2)$$

Величину t_{sp} знаходять з виразу (1) за отриманих з калібрування величин t_p та t_g .

Розглянемо випадок, коли перетворювач під час вимірювання переміщують на величину, меншу за його базу. Час проходження акустичної хвилі по поверхні зразка t_{sp0} , коли перетворювач знаходиться в положенні 0, і час t_{sp1} в положенні перетворювача 1, як показано на рис. 2, буде:

$$t_{sp0} = t_0 + t_s, \quad t_{sp1} = t_1 + t_s, \quad (3)$$

де t_0 – час проходження акустичним імпульсом першої ділянки, на яку був зміщений перетворювач в нульовому положенні, t_1 – час проходження другої ділянки, на яку був зміщений перетворювач в іншому положенні, t_s – час проходження ділянки зразка, яка є спільною для обох положень перетворювача. Відповідно можна записати:

$$V_0 = \frac{x_s}{t_0}, \quad V_1 = \frac{x_s}{t_1}, \quad (4)$$

де V_0, V_1 – швидкості ПАХ в різних ділянках, на які зміщували перетворювач, x_s – величина зміщення перетворювача (крок вимірювань).

Якщо t_1 представити як $t_{sp1} - t_{sp0} + \frac{x_s}{V_0}$, то швидкість V_1 можна виразити, виходячи з (4):

$$V_1 = \frac{V_0}{\frac{t_{sp1} - t_{sp0}}{x_s} V_0 + 1}. \quad (5)$$

Вираз (5) дозволяє знайти величину швидкості в одній ділянці зразка відносно іншої, якщо відома різниця часів проходження імпульсу в двох положеннях перетворювача $t_{sp1} - t_{sp0}$ і величина зміщення перетворювача x_s .

Таким чином, з урахуванням (5) можна знайти розподіл швидкості в області локальної неоднорідності, якщо її розмір менший за базу перетворювача L . Методика полягає в проведенні вимірювань в різних ділянках зразка при послідовному зміщенні перетворювача з однорідної в неоднорідну область. Це дозволяє знайти розподіл швидкостей ПАХ в неоднорідній області, за виразом (5). В якості V_0 використовують відому швидкість однорідної області зразка, а V_1 відповідає усередненій швидкості неоднорідної частини зразка на ділянці шириною, що дорівнює величині зміщення x_s . Перевагою даного методу вимірювань є можливість довільно змінювати величину кроку вимірювань.

Разом з тим, важливо оцінити похибку визначення швидкості, пов'язану із неточністю визначення кроку вимірювань x_s , оскільки необхідність вимірювати його з високою точністю може суттєво ускладнити вимірювання і, відповідно, робить методику неефективною. Стандартне відхилення визначення швидкості V_1 , яка спричинена похибкою вимірювання величини зміщення x_s , буде:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} \approx \frac{1}{V_1} \sqrt{\left(\frac{\partial V_1}{\partial x_s}\right)^2} \delta x_s, \quad (6)$$

де δx_s – похибка визначення величини зміщення перетворювача. Виходячи з (5) та (6), можна отримати:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} \approx \frac{1}{V_1} \frac{V_0^2}{\left(\frac{t_{sp1} - t_{sp0}}{x_s} V_0 + 1\right)^2} \frac{t_{sp1} - t_{sp0}}{x_s^2} \delta x_s \quad (7)$$

і відповідно:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} \approx \frac{V_1}{V_1} \frac{t_{sp1} - t_{sp0}}{t_1} \frac{\delta x_s}{x_s} \quad (8)$$

Ураховуючи, що згідно (3) $t_{sp1} - t_{sp0} = t_1 - t_0$, вираз (8) можна записати так:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} \approx \left(1 - \frac{t_0}{t_1}\right) \frac{\delta x_s}{x_s} \quad (9)$$

Як видно з (9), похибка визначення швидкості визначається як похибкою визначення зміщення x_s , так і величиною

$1 - \frac{t_0}{t_1}$, тобто співвідношенням часу

проходження хвилі t_0 на початковій ділянці зразка і t_1 – на новій. На практиці в більшості випадків зміна швидкості ПАХ під впливом різноманітних факторів становить менше

кількох відсотків. Це означає, що $1 - \frac{t_0}{t_1} \ll 1$ і

похибка визначення величини V_1 , спричинена неточністю вимірювання кроку, буде суттєво менша за похибку визначення самого кроку x_s .

Таким чином, зміщуючи перетворювач на величину меншу від бази вимірювання, можна змінювати роздільну здатність. В такій схемі вимірювання поєднані переваги методики використання перетворювача із жорстким з'єднанням клинів (відсутність необхідності вимірювати відстань із високою точністю) і методики із використанням двох окремих перетворювачів (можливість змінювати крок вимірювань)

3. Оцінка оптимальної величини кроку вимірювань.

Як зазначено вище, основною перевагою запропонованої методики вимірювання розподілу швидкості ПАХ на поверхні зразка є можливість довільно змінювати крок вимірювання для різних ділянок. Обмеження на

величину кроку зумовлено розміром бази перетворювача (крок не може бути більшим за базу перетворювача). Важливим є питання про критерії вибору кроку вимірювання, оскільки він впливає на точність і роздільну здатність і тому повинен вибиратись на основі похибки, яку дозволяє забезпечити вимірювальне обладнання, а також просторових характеристик зміни швидкості об'єкту досліджень. Початковий крок вимірювання вибирають, виходячи з характеристик обладнання і методики вимірювання швидкості, а також доступних даних про неоднорідності в зразку. На основі отриманих експериментальних даних він може бути уточнений. Розглянемо, яким чином можна уточнювати крок вимірювання для отримання більш близького до справжнього розподілу швидкості.

Проаналізуємо найпростіший випадок, коли швидкість ПАХ лінійно змінюється із відстанню

$$V = ax, \quad (10)$$

де a – коефіцієнт, x – координата.

Стандартне відхилення визначення швидкості ПАХ перетворювачем із жорстким з'єднанням клинів матиме вигляд [11]:

$$\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 = \frac{1}{x_s^2} (\sigma_x^2 + V^2 \sigma_t^2), \quad (11)$$

де: σ_V , σ_x , σ_t – стандартні відхилення визначення швидкості, відстані і часу відповідно. Величини σ_x та σ_t визначаються характеристиками обладнання та методиками вимірювання. У загальному випадку величину σ_V , згідно (11), можна представити у вигляді:

$$\sigma_V = \frac{k}{x_s}, \quad (12)$$

де $k = V \sqrt{\sigma_x^2 + V^2 \sigma_t^2}$. Для оцінки адекватності вимірювання швидкості ПАХ введемо величину, яка характеризує відхилення вимірюваного значення швидкості в ділянці зразка, що дорівнює кроку вимірювання x_s :

$$\varepsilon = \int_0^{x_s} (\Delta V_a + \sigma_V - \Delta V)^2 dx, \quad (13)$$

де ΔV_a – середня зміна швидкості ПАХ на даному кроці вимірювання, ΔV – зміна швидкості ПАХ в конкретній точці зразка відносно початку кроку вимірювань. Величина $\Delta V_a + \sigma_V$ характеризує вимірювану зміну

швидкості на кроці вимірювання, а ΔV є справжньою зміною швидкості відносно початку кроку вимірювань. Величина ε дозволяє оцінити відхилення значення виміряної швидкості від справжньої, яке спричинене просторовою дискретністю вимірювань і наявністю похибки вимірювань. Для конкретної ділянки величину оптимального кроку вимірювань x_s можна знайти з умови мінімуму величини ε . Ураховуючи (10) – (12), вираз (13) можна записати як

$$\varepsilon = \int_0^{x_s} \left(\frac{ax_s}{2} + \frac{k}{x_s} - \Delta V \right)^2 dx. \quad (14)$$

Відповідно з виразу (14) отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{a^2 x_s^3}{12} + \frac{k^2}{x_s} \quad (15)$$

Мінімальне значення величини ε знайдемо, продиференціювавши вираз (15) по x_s та прирівнявши отриманий результат до нуля. Таким чином, одержимо значення оптимального кроку вимірювань, за якого виміряний та справжній розподіл будуть максимально близькими:

$$x_{sop} = \sqrt{\frac{2k}{a}}. \quad (16)$$

Як бачимо, величина кроку залежить від точності вимірювань і зміни швидкості ПАХ. На рис. 3 показана двовірна залежність оптимального кроку для різних значень k та a . Зі збільшенням точності вимірювань оптимальна величина кроку зменшується. З іншого боку, за малої зміни швидкості (величина a мала) крок повинен зростати. В граничному випадку, коли зразок однорідний ($a = 0$), оптимальний крок повинен бути максимально великим. Крім того, з умови мінімуму величини ε випливає, що величини k та a теж мають бути мінімальні, що є достатньо очевидно і підтверджує правильність виразу (15).

Як відзначено вище, вираз (16) справедливий за умови лінійної зміни швидкості в межах ділянки вимірювання. У випадку нелінійної залежності швидкості від координати вираз для величини оптимального кроку може бути іншим. Також обмеженням використання отриманого виразу для оптимізації кроку вимірювання є те, що точне значення величини a невідоме, а відомим є лише її значення з

певною похибкою, яке отримане з експерименту. Таким чином, використання виразу (16) ускладнене необхідністю визначати a , яка може бути оцінена за різницею швидкості в сусідніх ділянках вимірювання. Часто різниця швидкості в сусідніх ділянках є меншою за похибки її вимірювання, що робить неможливим визначення a .

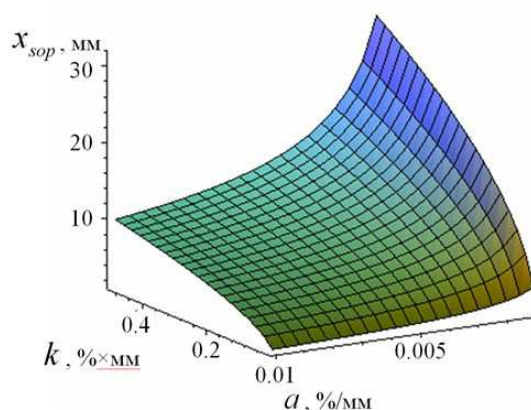


Рисунок 3 – Залежність оптимального кроку вимірювань від величин k та a

Більш практичним є підхід, який полягає в об'єднанні сусідніх ділянок кроків вимірювання у випадку, коли швидкості в них відрізняються на величину, меншу за похибку вимірювання. Таке об'єднання відповідає збільшенню кроку вимірювання. Якщо в сусідніх ділянках швидкості відрізняються на величину, меншу за похибку вимірювання, то ці ділянки не розрізняються. Тому під час їх об'єднання не втрачається інформація про розподіл швидкості, а з іншого боку збільшення кроку призводить до зменшення похибки вимірювань. Після необхідного числа повторів цієї процедури швидкість ПАХ в усіх ділянках буде відрізнятися на достовірну величину. Критерієм вибору кроку вимірювань в цьому випадку є досягнення різниці швидкостей між сусідніми ділянками, більшої за похибки їх вимірювання. Це задає величину мінімально необхідної роздільної здатності. При цьому реалізується компроміс між точністю вимірювань та роздільною здатністю.

Таким чином, отримують розподіл швидкості максимально близьким до справжнього. Ефективним такий підхід робить те, що об'єднувати ділянки можна після проведення вимірювань під час опрацювання їх результатів. Для цього спочатку проводять вимірювання з мінімальним кроком. Після цього змінюють кроки вимірювань в сторону збільшення на основі запропонованого

критерію. В результаті можемо отримати різну величину кроку в різних ділянках об'єкта контролю. В тих його частинах, де просторові зміни швидкості великі, крок повинен бути малим, а в тих ділянках, в яких зміни швидкості малі – великим. У випадку однорідного матеріалу крок вимірювання повинен бути максимально великим. Треба відзначити, що якісно ці висновки співпадають із висновками, отриманими із виразу (16). Проте підкреслимо, що підхід, який базується на об'єднанні кроків вимірювання, є більш загальним і з практичної точки зору більш простішим.

4. Застосування методики вимірювання розподілу швидкості на поверхні пластично деформованого зразка.

Методика вимірювання розподілу швидкості ПАХ із змінним кроком використана для дослідження сталевого зразка із неоднорідною пластичною деформацією. Зразок із ферито – перлітної сталі мав переріз робочої частини $15 \times 7 \text{ мм}^2$. (рис. 4).

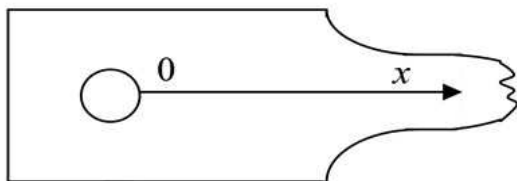


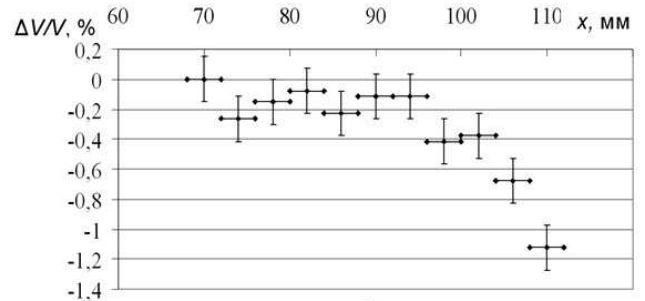
Рисунок 4 – Форма пластично деформованого зразка

Неоднорідний розподіл пластичної деформації створено в результаті розтягу. Її неоднорідність спричинила відповідну неоднорідність швидкості ПАХ. Вимірювання швидкості ПАХ здійснювали згідно методики [12] з використанням жорсткоз'єднаного перетворювача із базою вимірювання 70 мм. Для вимірювання застосовували імпульси тривалістю кілька мікросекунд і частотою заповнення 3 МГц. Вимірювали різниці часу проходження сигналу за різних положень перетворювача. На основі цих даних швидкість розраховували за виразом (5). У недеформованій ділянці зразка вона становила 3030 м/с, а початковий крок вимірювань – 4 мм. На рис. 5 приведено зміну швидкості відносно недеформованої частини зразка, яка дорівнює:

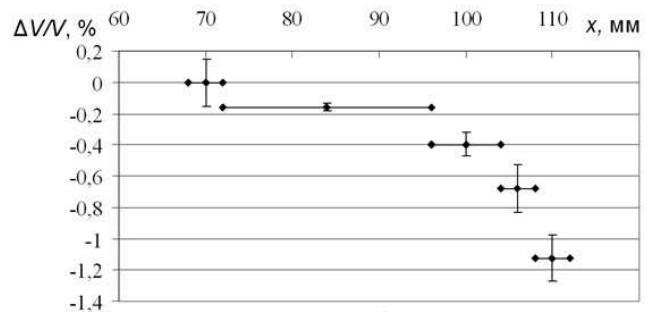
$$\Delta V = V - V_0, \quad (17)$$

де V_0 – швидкість в недеформованій частині зразка. На рис. 5, а приведені дані вимірювань. Бачимо, що в області зразка, близькій до місця

розриву, спостерігається різке зменшення швидкості. На рис. 5, б показано результат оптимізації кроку шляхом об'єднання ділянок вимірювання.



а



б

Рисунок 5 – Одномірний розподіл швидкості ПАХ пластично деформованого зразка до (а) і після оптимізації кроку вимірювання (б), горизонтальні відрізки – області, в яких знаходили швидкість, вертикальні відрізки – довірчі інтервали

В області зразка, в якій швидкість мало змінюється і, відповідно, довірчі інтервали в сусідніх ділянках перекриваються, крок вимірювання збільшився. На графіку це відповідає утворенню ділянок з координатами 72 – 96 мм та 96 – 104 мм. В правій частині зразка, де швидкість сильно змінюється, розмір кроку залишився початковим. Таким чином, з допомогою оптимізації кроку вимірювання відбулось усереднення значень швидкості в ділянках, в яких вона відрізнялась менше за похибку вимірювання і тим самим отримана залежність стала ближчою до справжнього розподілу швидкості.

Застосування п'єзоелектричного перетворювача на основі клинів, які жорстко з'єднані між собою, для визначення просторового розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль дозволяє, використовуючи один перетворювач, проводити вимірювання з різною роздільною здатністю. Показано, що за малих змін швидкості поверхневої акустичної

хвилі, похибка вимірювання швидкості є набагато меншою за похибку визначення положення перетворювача, що суттєво спрощує методику. Запропонований критерій вибору величини роздільної здатності дозволяє її оптимізувати залежно від властивостей об'єкта контролю та похибки вимірювання швидкості.

1. Назарчук З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук. – техн. пос. у 3 т. – Т.3.: Засоби та застосування методу акустичної емісії / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наукова думка, 2009. – 327 с.

2. Крауткремер Й. Ультразвукової контроль матеріалів. Справочник/ Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

3. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах /И. А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 286 с.

4. Муравьев В. В. Скорость звука и структура стали и сплавов / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.

5. Черемской П. Г. Поры в твердом теле / П. Г. Черемской, В. В. Слезов, В. И. Бетехин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.

6. Levesque D. Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves / D. Levesque, C. S. Lim, C. Padioleau, A. Blouin // Journal of Physics: Coonference Series.– 2011. – 278. – P. 1 – 4.

7. Lu W–Y. Measurement of acoustoelastic effect of Rayleigh surface waves using laser ultrasonics. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation vol.17: Edited by Thompson and D.E. Chimenti / W-Y. Lu, L. W. Peng, S. Holland. – Plenum Press, New York, 1998. – P. 1643–1648.

8. Кошовий В.В. 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 // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – №4. – С. 56 – 61.

9. Быченко В. А. Лазерно–ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно–космической техники/ В.А. Быченко // Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2011. – №7. – С.45 – 50.

10. Ihara I. Laser-Ultrasonic Monitoring of Temperature Distribution of Material surface during Heating/ I. Ihara, M. Takahashi // 1st International Symposium on Laser – Ultrasonics, July 16-18 2008, Montreal, Canada.

11. Johnson C. The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol.12: Edited by Thompson and D.E. Chimenti / C. Johnson, R. B. Thompson. – Plenum Press, New York, 1993. – P. 2121 – 2128.

12. Мокрий О. М. Методика вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль для діагностики стану металу / О. М. Мокрий, В. В. Кошовий, П. М. Семак // Відбір і обробка інформації. – 2014. – 41(117). – С.43 – 48.

Поступила в редакцію 07.05.2018 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Карпаш О. М., докт. техн. наук, проф. Сердюк О. Є.