

## НОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

**В.Р. Скальський, О.М. Мокрий, П.П. Великий, П.М. Долішній, Я.Д. Толопко**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: skalsky.v@gmail.com

Розглянуто особливості вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль за допомогою контактної перетворювача, в якого збуджуюча та приймальна частини жорстко з'єднані між собою. Запропоновано нову методику вимірювання швидкості таким перетворювачем з використанням зразка порівняння. Здійснено вимірювання швидкості поверхневих хвиль в сталених зразках. Також виміряна швидкість в цих зразках з допомогою лазерної ультразвукової технології для апробації нового методу. Показано ефективність використання запропонованої методики. Бібліогр. 12, рис. 5.

*Ключові слова:* поверхневі акустичні хвилі, вимірювання швидкості, перетворювач

Швидкість акустичних хвиль визначається пружними властивостями матеріалу та його густиною [1]. Ці величини залежать від різноманітних чинників: фазового складу, дефектності структури, рівня механічних напружень тощо [2]. Оскільки вимірювання швидкості акустичних хвиль неруйнівні, то це відкриває перспективи розвитку неруйнвної діагностики стану металу відповідальних конструкцій для їх моніторингу впродовж тривалої експлуатації, особливо за умови вичерпання планового ресурсу. В металах зміну величини швидкості можуть викликати різноманітні процеси, а саме: зварювання [3], наклеп [4], гартування [2], пластична деформація [5], в тому числі біля вершини тріщини [6] тощо.

Вимірювання швидкості акустичних хвиль як засобу контролю стану металу є важливим завданням, яке має свої особливості. Одна з них полягає у малих значеннях змін швидкості під дією різних чинників. Як правило, величина зміни швидкості становить менше кількох відсотків, що вимагає високої точності вимірювань. Також часто зміни швидкості акустичних хвиль мають просторово неоднорідний характер, що зумовлює потребу в методиках, які дозволяють проводити вимірювання з високим розділенням. Серед різних типів пружних хвиль перспективними з точки зору використання в неруйнвному контролі є поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) [2, 7]. Їх використання дозволяє відносно просто вибирати і неперервно змінювати зону вимірювань, яка визначається положенням перетворювача. Також відзначимо можливість локалізування області вимірювань за товщиною зразка матеріалу, оскільки глибина проникнення ПАХ задається її частотою, що дозволяє досліджувати об'єкти із шаруватою структурою [7]. Разом з тим зауважимо, що використання ПАХ для неруйнвного контролю обмежується лише поверхневими шарами об'єкту.

В даний час існують ефективні методики вимірювання швидкості ПАХ [8, 9], які дозволяють вирішувати певні завдання неруйнвного контролю. Проте розвиток техніки, впровадження нових матеріалів і умов їх експлуатації вимагає створення сучасних методів оцінки їх стану, в тому числі з використанням ПАХ. Тому важливим завданням є розвиток методик вимірювання їх швидкості.

Цей процес полягає у вимірюванні часу проходження акустичною хвилею певної відстані, а також визначенні її значення. Оскільки точність вимірювання швидкості часто необхідна досить висока, то і вимірювання цих величин необхідно провести з високою точністю. Сучасні методики та обладнання дозволяють виміряти час проходження акустичного сигналу з достатньою точністю. Точне вимірювання відстані, яку пройшла акустична хвиля, є більш складним завданням. Для його вирішення часто використовують оптичні методи. Інший шлях полягає у використанні контактної перетворювача, в якому приймальна та збуджуючі частини є жорстко з'єднані між собою, як показано на рис. 1 [2].

ПАХ збуджується за допомогою призми, в якій повздовжня акустична хвиля падає під кутом до поверхні об'єкту контролю. Після проходження по поверхні об'єкту контролю відбувається перетворення ПАХ в об'ємну хвилю та її прийом за допомогою п'єзоелектричного приймача. Відстань між приймальною та передаючою призмами, яку проходить ПАХ, є незмінною, що виключає необ-

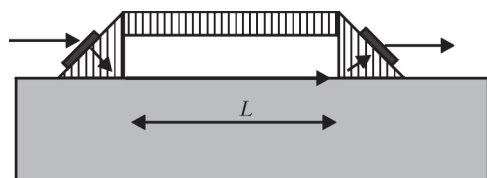


Рис. 1. Схема перетворювача з жорстким з'єднанням ( $L$  – база перетворювача)

хідність її вимірювання. Її можна визначити, про-калібрувавши перетворювач за допомогою зразка з відомою швидкістю поширення ПАХ. Разом з тим, калібрування перетворювача вимагає певних затрат часу, а також наявності зразків із відомою швидкістю поширення ПАХ. Розглянемо просту методику вимірювання швидкості ПАХ в одному зразку матеріалу відносно швидкості в іншому зразку, яка може бути реалізована за допомогою некаліброваного перетворювача.

**Методика вимірювання швидкості ПАХ.** Нехай вимірювання розподілу швидкості ПАХ відбувається вздовж прямої, напрям якої співпадає з напрямком поширення хвилі. В цьому випадку можна визначити розподіл швидкості ПАХ, пересуваючи послідовно перетворювач в напрямку цієї прямої та вимірюючи затримку часу проходження хвилі для кожного положення. Важливою характеристикою цих вимірювань є відстань, на яку пересувається перетворювач. Розглянемо випадок, коли переміщення перетворювача відбувається на крок  $X$ , який менший за базу вимірювання (рис. 2). Як показано в праці [10], швидкості ПАХ в ділянках, на які змістився перетворювач, пов'язані виразом:

$$V_1 = \frac{V_0}{\frac{t_1 - t_0}{X} V_0 + 1}, \quad (1)$$

де  $V_1$  – швидкість ПАХ в новій ділянці довжиною  $X$ , на яку змістився перетворювач;  $V_0$  – швидкість ПАХ в початковій ділянці, з якої змістився перетворювач;  $t_0$  – час проходження ПАХ через перетворювач в положенні «0»;  $t_1$  – час проходження ПАХ через перетворювач в положенні «1». Вираз (1) дозволяє визначити зміну швидкості  $\Delta V = V_1 - V_0$  для певних ділянок об'єкту контролю і також відносну зміну швидкості  $\Delta V/V_0$ . Такі вимірювання особливо зручно проводити у випадку, коли в об'єкті контролю існує ділянка, в якій швидкість є іншою і розмір ділянки менший за розмір бази перетворювача. Особливістю цих вимірювань є те, що перетворювач не потрібно калібрувати. Як видно з виразу (1), для визначення швидкості в новій ділянці необхідно виміряти різницю часів проходження акустичної хвилі в двох положеннях перетворювача та величину кроку  $X$ , на яку його зміщено. Важливо оцінити вплив похибки вимірювання

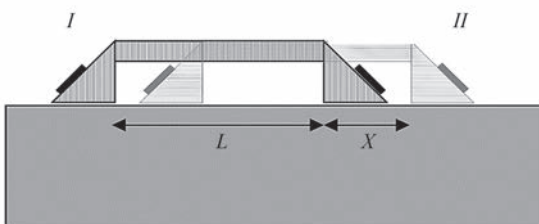


Рис. 2. Схема вимірювань за переміщення перетворювача на величину, меншу за базу вимірювань: I – положення «0»; II – «1»

кроку на точність визначення швидкості ПАХ, оскільки необхідність вимірювати його з високою точністю серйозно може ускладнити вимірювання та, відповідно, зробить методику неефективною. Стандартне відхилення визначення швидкості  $V_1$ , яка спричинена похибкою вимірювання величини зміщення  $X$ , буде:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{1}{V_1} \frac{\partial V_1}{\partial X} \delta X, \quad (2)$$

де  $\delta X$  – похибка визначення величини зміщення перетворювача.

Можна, виходячи з (1) та (2), отримати:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{1}{V_1} \frac{V_0^2}{\left(\frac{t_1 - t_0}{X} V_0 + 1\right)^2} \frac{t_1 - t_0}{X^2} \delta X \quad (3)$$

і відповідно:

$$\frac{\delta V_1}{V_1} = \frac{t_1 - t_0}{t_{X1}} \frac{\delta X}{X}, \quad (4)$$

де  $t_{X1} = X/V_1$  – час проходження ПАХ через нову ділянку на яку змістився перетворювач.

Як видно з цього виразу, похибка визначення швидкості визначається як похибкою визначення зміщення  $X$ , так і величиною  $\frac{t_1 - t_0}{t_{X1}}$ . На практи-

ці в більшості випадків зміна швидкості ПАХ під впливом різноманітних факторів становить менше кількох відсотків. В цьому випадку  $\frac{t_1 - t_0}{t_{X1}} \ll 1$

і тому, згідно з (4) похибка визначення величини  $X$  спричинить суттєво меншу похибку визначення швидкості  $V$ .

Цей висновок є важливим, оскільки дозволяє проводити вимірювання зміщення перетворювача з невисокою точністю. Наприклад, якщо час проходження акустичної хвилі за переміщення перетворювача змінюється на  $10^{-2}$ , то похибка визначення величини переміщення спричинить в 100 разів меншу похибку визначення швидкості ПАХ. Це суттєво спрощує вимірювання, оскільки високоточні вимірювання швидкості можна проводити, використовуючи достатньо прості засоби вимірювання відстані. Таким чином, запропонована методика може бути ефективною, оскільки не вимагає прецизійного вимірювання відстані та, з іншого боку, перетворювач не потрібно калібрувати. Область застосування цього підходу може полягати як у дослідженні просторових неоднорідностей швидкості в різноманітних об'єктах, так і в створенні зразків матеріалів для калібрування перетворювачів.

**Експериментальні дослідження методики вимірювання швидкості ПАХ.** Схема експери-

менту, яка дозволяє визначити швидкість в зразку за допомогою методики, в якій використовується некалібрований перетворювач показана на рис. 3. Два зразки склеюються між собою так, щоб їхні поверхні, по яких поширюється ПАХ, співпадали. Перетворювач розміщують так, щоб його випромінююча призма контактувала з одним зразком, а приймальна – з іншим. Відповідно ПАХ збуджується на поверхні зразка порівняння, проходить акустичний контакт на границі зразків та приймається приймальною призмою на поверхні досліджуваного зразка. Сумарна затримка ПАХ складається із часу проходження по зразку порівняння, досліджуваному зразку та шару склейки перетворювача до зразка. Приймаємо, що час проходження місця склейки є незмінний в процесі вимірювань. Для вимірювання швидкості в досліджуваному зразку необхідно визначити часи поширення ПАХ через перетворювач  $t_0$  та  $t_1$  в двох різних його положеннях із зміщенням на величину кроку  $X$ . Згідно з виразом (1) на основі даних та величини зміщення  $X$  можна визначити швидкість в досліджуваному зразку.

Для перевірки даної методики були виготовлені сталеві зразки розмірами  $50 \times 10 \times 15$  мм<sup>3</sup> з різними швидкостями поширення ПАХ. Напрямо поширення ПАХ співпадав з довгим ребром зразка. Відповідно зразки з різною швидкістю склеювались так, що загальний розмір склеєних зразків становив  $100 \times 10 \times 15$  мм<sup>3</sup>. Внаслідок акустичного контакту ПАХ проходила з одного зразка в інший. Для реалізації методики вимірювання створено перетворювач (рис. 1) з ідентичними приймальною та збуджуючими призмами, виготовленими з оргскла. На відповідні грані призм приклеювали п'єзокераміку з резонансною частотою 2,5 МГц. База перетворювача становила 30 мм. Для збудження перетворювача використовувався промодульований сигнал з генератора тривалістю кілька мікросекунд і частотою заповнення 2,5 МГц.

Після проходження через призми перетворювача та по поверхні зразка сигнал підсилювався та реєструвався за допомогою осцилографа Tektronix TDS 1012, де його порівнювали із опорним сигналом для визначення часової затримки акустичної хвилі. Перетворювач розміщували на склеєних зразках, як показано на рис. 3, в двох різних положеннях, відстань між якими була 20 мм. Вимірю-

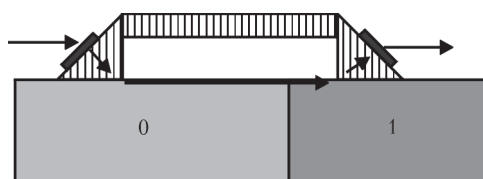


Рис. 3. Схема вимірювань швидкості некаліброваним перетворювачем; 0 – зразок порівняння; 1 – досліджуваний об'єкт контролю

вали різницю часів проходження акустичної хвилі для цих двох положень. Один зразок (№ 1) по чергово з'єднувався з іншими зразками. Визначалась їх швидкість відносно цього зразка. Швидкість ПАХ в цьому зразку визначалась незалежним методом з використанням лазерної техніки.

Лазерні методи вимірювання швидкості дозволяють реєструвати ПАХ в невеликій ділянці зразка, є безконтактними, дозволяють легко змінювати область реєстрації ПАХ [11]. Проте їх застосування обмежується складністю обладнання, яке часто можна застосовувати лише в лабораторних умовах, а також в деяких випадках викликана необхідністю підготовки поверхні об'єкту контролю до вимірювань. Для вимірювання швидкості ПАХ в зразку №1 використовували дефлекційний метод реєстрації цих хвиль [12]. Метод базується на відхиленні відбитого лазерного променя від поверхні зразка в результаті його зміщення під дією акустичної хвилі. Внаслідок періодичного нахилу поверхні відбувається сканування лазерного променя, який періодично зміщується із чутливої ділянки фотоприймача. Таким чином, модулюється інтенсивність лазерного випромінювання, яке падає на фотоприймач. Для збільшення лінійного зміщення скануючого променя фотоприймач розміщували на відстані 70 см від поверхні зразка. Оскільки дефлекційний метод вимагає дзеркального відбитого променя, то поверхня зразка № 1 була відполірована. Схема вимірювальної установки для вимірювання швидкості показана на рис. 4. ПАХ на поверхні зразка 4 збуджували за допомогою контактної призми перетворювача 3 на частоті 2,5 МГц і приймали за допомогою He-Ne лазера THORLABS HRR005 1 з довжиною хвилі випромінювання 0,63 мкм і потужністю 0,5 мВт. В якості фотоприймача 2 використову-

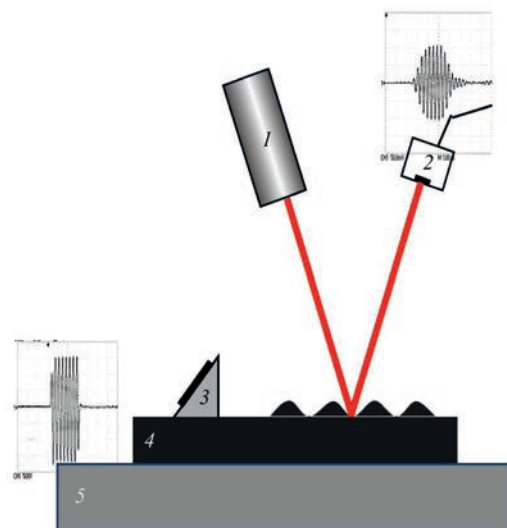


Рис. 4. Схема установки для вимірювання швидкості ПАХ: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – призмий перетворювач; 4 – зразок; 5 – мікрометричний столик

вали фотодіод S6468. Після підсилення сигнал з фотоприймача подавали на осцилограф Tektronix TDS 1012, де порівнювали його з опорним сигналом для визначення часової затримки акустичної хвилі. Похибка вимірювання часового зсуву між сигналами становила 2 нс. Для вимірювання відстані між ділянками реєстрації ПАХ використовували мікрометричний столик 5, який дозволяв визначати переміщення зразка з точністю  $5 \cdot 10^{-3}$  мм.

Вимірювання швидкості ПАХ в зразку проводили шляхом реєстрації ПАХ в кількох ділянках зразка. Вимірювали відстань між ділянками реєстрації та часовий зсув між ПАХ, прийнятими в різних ділянках і на основі цих даних визначали швидкість. Отримано залежність часового зсуву ПАХ від координати плями лазерного променя та на основі цих вимірювань визначено величину швидкості ПАХ для досліджуваного зразка, яка дорівнює  $2966 \pm 3$  м/с. Похибка визначення швидкості ПАХ лазерним методом визначається в основному похибкою вимірювання відстані між ділянками реєстрації ПАХ.

Отримана величина швидкості ПАХ в зразку № 1 була використана для визначення швидкості в інших зразках запропонованим методом. Часове зміщення за переміщення перетворювача по склесних зразках становило 28 нс для зразків № 1 – № 2 і 44 нс для зразків № 1 – № 3. Відповідні величини розрахованих швидкостей ПАХ за виразом (1) становлять для зразка № 2 – 2953 м/с, для № 3 – 2946 м/с. Для оцінки правильності отриманих результатів вимірювань проведено вимірювання швидкості ПАХ в зразках № 2 та № 3 лазерним дефлекційним методом аналогічно як і для зразка № 1. Для цього ці зразки також були відполіровані та для збудження ПАХ в них використовувався призмий перетворювач (рис. 5), за допомогою якого збуджувались ПАХ частотою 2,5 МГц. Отримані результати становлять для зразка № 2 – 2959 м/с, і для № 3 – 2949 м/с. Таким чином, різниця між результатами вимірювань двома методами становить 0,2 %, що можна вважати задовільним результатом.



Рис. 5. Стальний зразок із призмий перетворювачем: 1 – призмий перетворювач; 2 – пляма зондуючого лазерного променя; 3 – зразок

## Висновки

Запропоновано метод вимірювання швидкості ПАХ в металах, який дозволяє за допомогою перетворювача із жорстким з'єднанням передаючої та приймальної частини визначати швидкість в твердих тілах. Методика базується на визначенні швидкості в об'єкті контролю відносно відомої швидкості в зразку порівняння. Особливістю методики є можливість працювати з некаліброваним перетворювачем.

Перевагою запропонованого методу є використання достатньо простого обладнання, оскільки вимірювання відстані можна проводити із невеликою точністю. Порівняно із лазерними методами, методика є простішою, а також підготовка поверхні об'єкту контролю є суттєво простішою.

Проведені вимірювання швидкості ПАХ запропонованим методом і методом з лазерною реєстрацією показали співмірні результати. Тому методика може бути використана для прецизійних вимірювань швидкості акустичних хвиль, а також для створення зразків з відомою швидкістю для калібрування перетворювачів.

## Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій*. Т.1. Київ, Наукова думка.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
3. Kumar A., Choudhary B.K., Laha K. et al. (2003) Characterisation of microstructure in 9 % chromium ferritic steels using ultrasonic measurement. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **56**, 483–497.
4. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. (1991) *Акустическая тензометрия (теория и практика)*. Кишинев, Штиинца.
5. Скальський В.Р., Мокрий О.М. (2018) Оцінка пошкодженості феритно-перлітної сталі за величиною зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 3–7.
6. Akhshik S., Ahmadi M. (2006) Ultrasonic Non-destructive evaluation of stress around the tip of a crack. *Asia-Pacific Conference on NDT. Nov. 5–10, 2006*. Auckland, New Zealand, pp. 1–8.
7. Викторов И.А. (1981) *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва, Наука.
8. Gasteau D. et al. (2016) Single crystal elastic constants evaluated with surface acoustic waves generated and detected by lasers within polycrystalline steel samples. *Journal of Applied Physics*, **119**, 043103.
9. Li D., Zhao P., Gunning N. et al. (2014) Measurement of surface acoustic wave velocity using phase shift mask and application on thin film of thermoelectric material. *APS Meeting Abstracts*.
10. Скальський В.Р., Мокрий О.М. (2018) Методика визначення розподілу швидкості поверхневої акустичної хвилі на поверхні сталевих зразків. *Методи та прилади контролю якості*, **1**(40), 22–29.
11. Wagner J.W. (1990) Optical detection of ultrasound in Physical Acoustics. *Ultrasonic Measurement Methods*, V. XIX. Boston, Academic Press.
12. Murfin A.S., Soden R.A.J., Hatrick D., Dewhurst R.J. (2000) Laser-ultrasound detection systems: a comparative study with Rayleigh waves. *Measurement Science and Technology*, **11**, 1208–1219.

References

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structure elements*. Vol. 1. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Sound velocity and structure of steels and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
3. Kumar, A., Choudhary, B.K., Laha, K. et al. (2003) Characterisation of microstructure in 9 % chromium ferritic steels using ultrasonic measurement. *Transact. of the Indian Inst. of Metals*, **56**, 483-497.
4. Bobrenko, V.M., Vangeli, M.S., Kutsenko, A.N. (1981) *Acoustic strain gauge measurement (theory and practice)*. Kishinyov, Shtiintsa [in Russian].
5. Skalskyi, V.R., Mokryy, O.M. (2018) Evaluation of damage level in ferritic-pearlitic steels by the value of the change of longitudinal acoustic wave velocity. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 3–7 [in Ukrainian].
6. Akhshik, S., Ahmadi, M. (2006) Ultrasonic non-destructive evaluation of stress around the tip of a crack. *In: Proc of Asia-Pacific Conf. on NDT. (Nov. 5–10, 2006, Auckland, New Zealand)*, 1–8.
7. Viktorov, I.A. (1981) *Surface acoustic waves in solids*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Gasteau, D. et al. (2016) Single crystal elastic constants evaluated with surface acoustic waves generated and detected by lasers within polycrystalline steel samples. *J. Appl. Phys.*, **119**, 043103.
9. Li, D., Zhao, P., Gunning, N. et al. (2014) Measurement of surface acoustic wave velocity using phase shift mask and application on thin film of thermoelectric material. *APS Meeting Abstracts*.
10. Skalskyi, V.R., Mokryy, O.M. (2018) Procedure for determination of the distribution of surface acoustic wave velocity on steel surface sample. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, **1**(40), 22–29 [in Ukrainian].
11. Wagner, J.W. (1990) *Optical detection of ultrasound in physical acoustics. Ultrasonic Measurement Methods*, Vol. XIX. Boston, Academic Press.
12. Murfin, A.S., Soden, R.A.J., Hatrick, D., Dewhurst, R.J. (2000) Laser-ultrasound detection systems: A comparative study with Rayleigh waves. *Measurement Sci. and Technol.*, **11**, 1208–1219.

НОВАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В.Р. Скальский, О.М. Мокрый, П.П. Великий, П.М. Долишний, Я.Д. Толопко

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.  
E-mail: skalsky.v@gmail.com

Рассмотрены особенности измерения скорости поверхностных акустических волн с помощью контактного преобразователя, у которого возбуждающая и приемная части жестко соединены между собой. Предложена новая методика измерения скорости таким преобразователем с использованием образца сравнения. Осуществлено измерение скорости поверхностных волн в стальных образцах. Также измерена скорость в этих образцах с помощью лазерной ультразвуковой технологии для апробации нового метода. Показана эффективность использования предложенной методики. Библиогр. 12, рис. 5.

Ключевые слова: *поверхностные акустические волны, измерения скорости, преобразователь*

NEW PROCEDURE FOR DETERMINATION OF SURFACE ACOUSTIC WAVE VELOCITY

V.R. Skalskyi, O.M. Mokryy, P.P. Velykyi, P.M. Dolishnyi, J.D. Tolopko

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NASU of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.  
E-mail: skalsky.v@gmail.com

The paper deals with the features of measurement of the velocity of surface acoustic waves, using a contact transducer, in which the exciting and receiving parts are rigidly coupled. A new procedure is proposed for velocity measurement by such a transducer, using a reference sample. Measurement of surface wave velocity in steel samples was performed. The velocity in these samples was also measured, using laser ultrasonic technology for testing the new method. The effectiveness of the proposed procedure application is shown. 12 Ref. , 5 Fig.

Keywords: *surface acoustic waves: velocity measurement, transducer*

Поступила в редакцию 15.07.2019

Новая книга

**Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений** / Под ред. проф. В.А. Троицкого. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2018. – 196 с.

Сборник содержит 11 ранее опубликованных статей сотрудников отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона, а также рекламные материалы различных методов неразрушающего контроля.

