

ВПЛИВ ЗАГЛИБИН ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. МОКРИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo2323@gmail.com

Експериментально показано значний вплив наявності заглибин поверхні елемента конструкцій на результати вимірювання розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль за використання п'єзоелектричних контактних перетворювачів із жорстким з'єднанням збуджуючої та реєструючої призми. Встановлено, що відхилення від площини спричинює появу додаткової затримки акустичного сигналу, що може призводити до суттєвої похибки вимірювання швидкості. Стверджується, що така часова затримка спричинена проходженням акустичного сигналу через додатковий шар контактної рідини, який виникає між призмою перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу. Бібліогр.10, рис. 7.

Ключові слова: елементи конструкцій, поверхня, поверхневі акустичні хвилі

Зміна швидкості акустичних хвиль є ефективним інструментом діагностування стану металів і сплавів [1–3]. Особливо зручно тут використовувати поверхневі акустичні хвилі (ПАХ), оскільки на поверхні елемента конструкцій є доступ до його різних ділянок, в яких можна їх збуджувати та реєструвати. Величина швидкості ПАХ залежить від пружних модулів та густини середовища, в якому вона поширюється і є чутливою до багатьох процесів, які спричиняють її зміну. Вимірюючи швидкість ПАХ, можна досліджувати текстуру металу [4], залишкові механічні напруження [5], наявність різноманітних дефектів та структуру металу [3] тощо. Велика кількість чинників, що впливають на величину зміни швидкості ПАХ, з одного боку дозволяє використовувати її для діагностування стану металу, а з іншого ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

Ефективним для оцінювання стану металу є визначення розподілу швидкості ПАХ на поверхні елемента конструкції. Характер такого розподілу містить додаткову інформацію, яка може бути використана для діагностування. Часто різні ділянки елемента конструкції піддаються неоднорідним впливам температури, механічних напружень, хімічних та інших чинників. Звідси зміни стану металу проходять нерівномірно по його об'єму та площі поверхні. Порівнюючи швидкість ПАХ в різних ділянках, можна оцінити вплив фізичних чинників на стан металу. Наприклад, якщо існує певний розподіл циклічних механічних напружень в елементі конструкції, то можна оцінювати зміну стану металу під дією цих напружень на основі вимірювання розподілу швидкості ПАХ [3]. Іншим прикладом можуть бути неоднакові

зміни стану металу в верхній та нижній частинах трубопроводів, що відбуваються за рахунок різного хімічного впливу середовища, яке знаходиться в ньому. Ще одним прикладом використання вимірювання розподілу швидкості на поверхні досліджуваної конструкції є можливість оцінювати залишкові механічні напруження на основі акустопружного ефекту. Їх величина є, як правило, неоднорідна по об'єму конструкції, що дає можливість відділити зміну швидкості ПАХ, спричинену механічними напруженнями, від змін, які зумовлені іншими фізичними чинниками. Отже, вимірювання розподілу швидкості ПАХ по поверхні металу є дієвим інструментом для оцінки його стану, а розроблення методики є важливим та актуальним завданням. В багатьох випадках величина зміни швидкості ПАХ становить кілька відсотків і менше, що вимагає відповідної прецизійної методики вимірювань.

Ефективною методикою, яка дозволяє забезпечувати високу точність вимірювань є використання контактних п'єзоелектричних перетворювачів для збудження та реєстрації ПАХ, в яких збуджуюча та реєструюча частини пристрою жорстко з'єднані (рис. 1) [3, 6]. П'єзоелемент збуджує поздовжню акустичну хвилю, яка проходить призмю і на поверхні призма-метал трансформується в ПАХ. Проїшовши відстань між призмами, ПАХ на поверхні іншої призми перетворюється знову

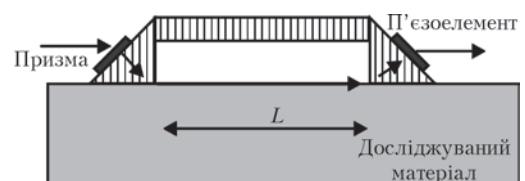


Рис. 1. Конструкція перетворювача з жорстким з'єднанням, L – база перетворювача

у об'ємну хвилю, яка реєструється приймальним п'єзоелементом. Перевагою таких перетворювачів є постійність відстані між збуджуючою та реєструючою призми, що забезпечує стабільність бази вимірювань і позбавляє необхідності її постійно вимірювати.

Дана методика може бути використана для дослідження і контролю багатьох пошкоджень на поверхні металів. Разом з тим існують деякі загальні обмеження її застосування і одним із них є вплив нерівностей поверхні матеріалу на результат вимірювання розподілу швидкості ПАХ. Оцінка і врахування похибки вимірювання швидкості, яка спричинена нерівністю поверхні досліджуваного матеріалу, є важливою для практичного використання ПАХ в неруйнівному контролі, оскільки об'єкти контролю часто мають форму поверхні, яка відхиляється від площини. Для зменшення впливу локального відхилення форми рекомендують зменшити площу контактної ділянки перетворювача [3]. У роботі [7] досліджено вплив криволінійності поверхні на швидкість ПАХ. Разом з тим виникнення похибки вимірювання швидкості, яка пов'язана зі складною формою поверхні, недостатньо вивчено і, зазвичай, її вплив на результати вимірювань ігнорують [3, 8, 9]. Як показано далі, такий підхід може призвести до значних помилок під час вимірювання швидкості ПАХ.

В даній роботі проаналізовано вплив відхилення форми поверхні від площини на визначення швидкості ПАХ за використання перетворювача, в якому жорстко з'єднані випромінююча та приймальні призми. Розглядався випадок, коли поверхня досліджуваного елемента є плоскою і в ній створена локальна заглибина. Незначні відхилення від площини можуть призводити до зміни часу проходження акустичного сигналу і помилково трактуватись як локальна зміна швидкості ПАХ.

Можна припустити, що зміна часу проходження акустичної хвилі, спричинена відхиленням форми поверхні від площини, пов'язана з кількома механізмами. Один з них зумовлений зміною умов проходження акустичної хвилі із контактної ділянки збуджуючої призми перетворювача в зразок і навпаки – із зразка в приймальну призму перетворювача. Інші механізми спричинені зміною швидкості ПАХ на криволінійній поверхні твердого тіла і зміною довжини шляху, який прохо-

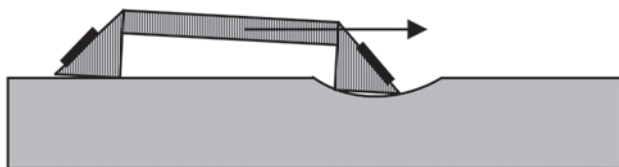


Рис. 2. Розміщення перетворювача на поверхні зразка із заглибиною. Стрілкою показано напрям переміщення перетворювача

дить хвиля. Проводиться вивчення впливу нерівності поверхні на вимірювання швидкості ПАХ лише за механізмом, який спричинений зміною умов проходження акустичної хвилі із перетворювача в досліджуваний матеріал і навпаки. Розмір нерівності поверхні приймався більшим за контактну ділянку призми перетворювача.

Методика досліджень. Для вивчення впливу відхилення форми поверхні зразка від площини використовували зразки розміром $150 \times 15 \times 10$ мм із маловуглецевої сталі, в яких були створені локальні заглибини глибиною $0,1 \dots 0,5$ мм і поперечним розміром $8 \dots 16$ мм. (рис. 2). Використовували жорстко з'єднаний перетворювач із розміром контактних ділянок збуджуючої і реєструючої призми 5 мм і відстанню між ними $L = 20$ мм (рис. 1). Вимірювали зміну часу проходження акустичного сигналу залежно від положення перетворювача на поверхні зразка відносно заглибини. В якості контактної рідини використовували гліцерин, масло I-20, евкаліптове масло. Акустичну хвилю збуджували у вигляді радіоімпульсу тривалістю кілька мікросекунд і частотою заповнення 3 МГц. Похибка визначення часу проходження акустичного сигналу становила 4 нс. Використовували методику вимірювання часу затримки сигналу, описану у праці [10]. Досліджували розподіл швидкості ПАХ вздовж прямої, яка проходила через ділянку із заглибиною. Перетворювач пересували в напрямку поширення ПАХ з дискретністю 1 мм і вимірювали час проходження акустичного сигналу по шляху: збуджуюча частина перетворювача – поверхня зразка – приймальна частина перетворювача. Положення перетворювача визначали за координатою його краю.

На рис. 3 показано результати розподілу зміни часу проходження акустичного сигналу від положення перетворювача на поверхні матеріалу. На графіках спостерігали два максимуми, величина яких зростає із ростом глибини заглибини. Ці максимуми часової затримки акустичного сигналу виникають, коли контактні ділянки призми перетворювача співпадають з місцем заглибини. Оскільки перетворювач послідовно пересувають по поверхні матеріалу, то на початку графіка його контактні поверхні повністю лежать на плоскій ділянці зразка і час проходження ПАХ по зразку в цьому положенні приймається за нульовий рівень. З подальшим переміщенням перетворювача приймальна частина насувається на заглибину, час проходження сигналу зростає і після того, як вона проходить її, знову зменшується. За подальшого переміщення перетворювача його призми знаходяться на плоскій ділянці зразка, а заглибина знаходиться між ними. Зміщуючи перетворювач далі по поверхні, на ділянку впадини насувається інша призма перетворювача, що знову супрово-

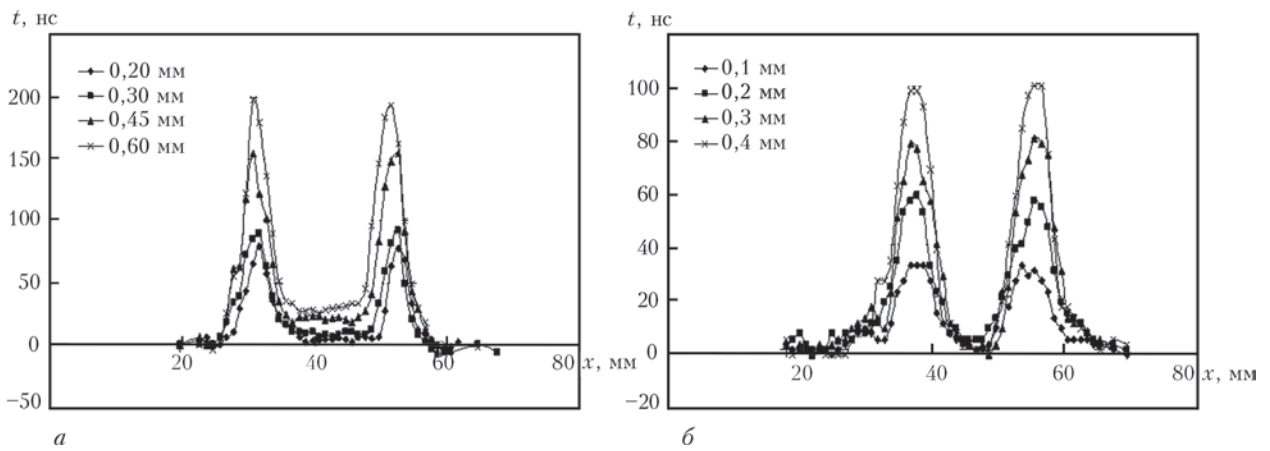


Рис. 3. Залежність часового зміщення проходження акустичного сигналу через жорстко з'єднаний перетворювач залежно від його положення за наявності заглибини на поверхні зразка: *а* – ширина заглибини 8 мм; *б* – 16; цифри на графіку показують її глибину

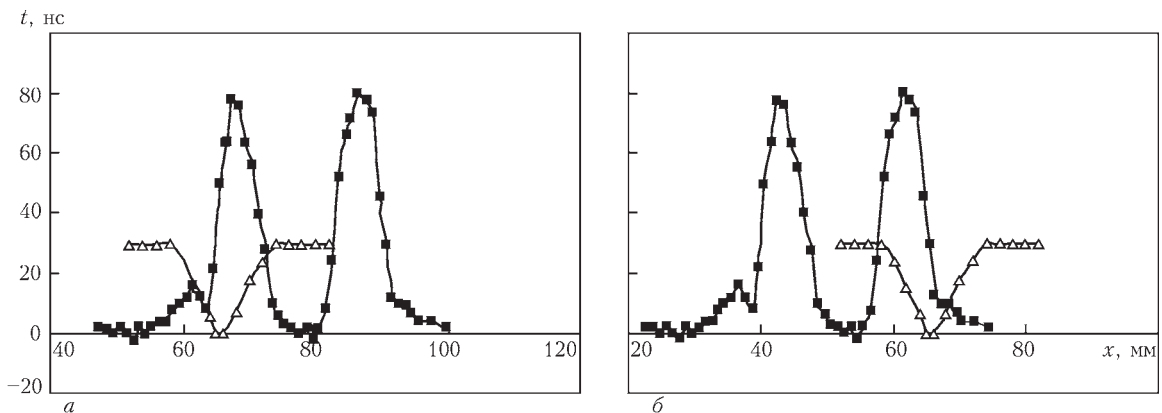


Рис. 4. Взаємне розміщення заглибини на поверхні зразка та часового зміщення акустичного сигналу від положення перетворювача. *а* – часове зміщення залежно від координати правої призми перетворювача, *б* – часове зміщення залежно від координати лівої призми перетворювача, ■ – часове зміщення, ▲ – форма заглибини

джується збільшенням часового зміщення проходження сигналу. Таким чином, наявність впадини на поверхні зразка спричиняє часову затримку акустичного сигналу, яка залежить від взаємного розміщення призм перетворювачів та заглибини. На рис. 3 приведені результати для заглибин двох розмірів: 8 і 16 мм. Як видно з графіків, часова затримка зростає із ростом глибини заглибини і зменшується з ростом її ширини.

Для більш детального аналізу механізму виникнення часового зміщення на рис. 4 приведено залежності цього зміщення від координат центру правої (*а*) і лівої (*б*) контактних ділянок призм перетворювача відносно форми поверхні зразка. На рис. 4, *а* видно, що положення першого часового максимуму співпадає з правою частиною заглибини, тобто часовий зсув виникає, коли права призма перетворювача проходить через праву частину заглибини. Відповідно на рис. 4, *б* максимум співпадає з лівою частиною заглибини. Це дає підстави вважати, що наявність двох максимумів пов'язана з існуванням двох призм в перетворювачі. Кожна з призм дає збільшення часу проходження сигналу, коли їх положення співпадає із нахиленою ділянкою поверхні матеріалу, причому для різних призм нахил поверхні є різного знаку.

Оскільки часове зміщення акустичного сигналу пов'язано із проходженням ним шару контактної рідини, то були проведені дослідження із використанням різних її видів. Результати експерименту для заглибини глибиною 0,3 мм і шириною 16 мм показані на рис. 5. Використовували контактні рідини з різною швидкістю поширення акустичних хвиль. Так, в гліцерині швидкість становить 1920 м/с, в маслі І-20 – 1500 м/с, в евкалиптовому маслі – 1270 м/с. Аналогічні дослідження були проведені для заглибин 0,1, 0,2 та 0,4 мм. В усіх випадках спостерігається збільшення часової затримки зі зменшенням швидкості акустичної хвилі контактної рідини.

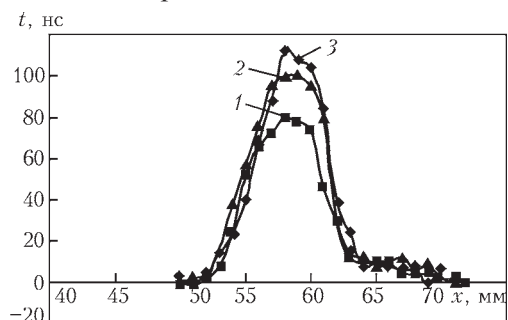


Рис. 5. Розподіл часового зсуву проходження акустичного сигналу для різних контактних рідин: 1 – гліцерин; 2 – масло І-20; 3 – евкалиптове масло

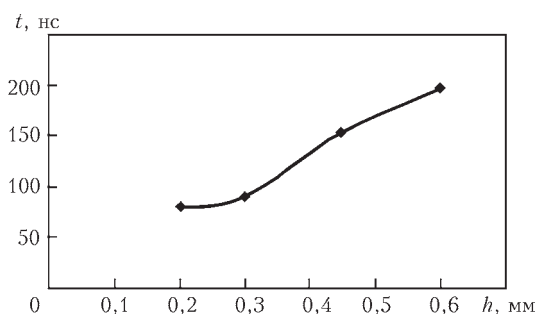


Рис. 6. Залежність максимуму часового зміщення від глибини заглибини; h – глибина заглибини

Аналіз отриманих результатів. Як видно з результатів проведених експериментів, нерівності поверхні, які більші за розмір робочої ділянки збуджуючої і приймаючої частин перетворювача, можуть сильно вплинути на результат вимірювання часової затримки сигналу. Якісно виникнення додаткової часової затримки можна пояснити так. У випадку наявності зміни кривини поверхні матеріалу виникає щілина між поверхнею контактної ділянки перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу. Ця щілина заповнюється контактною рідиною і акустична хвиля повинна пройти додатково шар цієї рідини, що спричинює часову затримку сигналу. Відповідно величина часової затримки визначається кутом нахилу контактної ділянки перетворювача відносно поверхні матеріалу. На рис. 6 приведено залежність величини часової затримки сигналу від глибини заглибини. Видно, що спостерігається монотонна, майже лінійна залежність між цими величинами. Це пояснюється тим, що зі збільшенням глибини заглибини зростає розмір щілини між поверхнею призми перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу.

Важливим також є положення цієї щілини відносно призми перетворювача. На рис. 7 схематично показані чотири можливі положення перетворювача відносно заглибини. Оскільки в ділянці контакту поверхні призми перетворювача та матеріалу є непаралельні, то контакт відбувається тільки одним ребром призми. Як видно з рис. 7, для кожної призми перетворювача контакт матеріалу може бути або з ребром ближнім до п'єзоелемента (наприклад, права призма в положенні 2 на рис. 7), або з протилежним до п'єзоелемента ребром (наприклад, обидві призми в положенні 1 на рис. 7). Залежно від того, яким ребром призма контактує з поверхнею матеріалу, величина додаткового часового зміщення має різну величину. Як показано на рис. 1, акустична хвиля проходить в призму з протилежного від п'єзоелемента боку. Тому за контакту із матеріалом протилежного від п'єзоелемента ребра, час проходження акустичного сигналу практично не збільшується. У випадку контакту призми з ребром, ближнім до п'єзоелемента, виникає щілина, яка заповнюється

ся контактною рідиною і яку повинна пройти додатково акустична хвиля. Залежності, показані на рис. 4, підтверджують правильність міркувань. На рис. 4, а показано залежність приросту часу проходження сигналу від положення правої призми перетворювача, а на рис. 4, б – лівої. Видно, що максимум часового приросту виникає, коли права призма перетворювача знаходиться в положенні, що відповідає позиції 2 на рис. 7. Відповідно положення лівої призми призводить до додаткової часової затримки, коли вона знаходиться в позиції 3 рис. 7. Таким чином, збільшення часу проходження акустичної хвилі відбувається тільки у випадку, коли призма перетворювача контактує з поверхнею матеріалу ребром, протилежним до п'єзоелемента. Ці експериментальні результати підтверджують пояснення виникнення часової затримки акустичного сигналу.

Оскільки затримка акустичного сигналу пропорційна часу проходження акустичної хвилі через шар контактної рідини, то вона залежить від швидкості акустичної хвилі в рідині. На рис. 5 приведена залежність часової затримки акустичного сигналу від типу контактної рідини. Спостерігається монотонне збільшення часу затримки акустичного сигналу зі зменшенням швидкості акустичної хвилі в контактній рідині, що підтверджує правильність тлумачення запропонованого механізму зміни часу проходження акустичної хвилі.

На основі врахування швидкості акустичних хвиль в контактних рідинах та відповідних величин часових затримок можна розрахувати ефективну товщину їх шару. Значення товщини цього

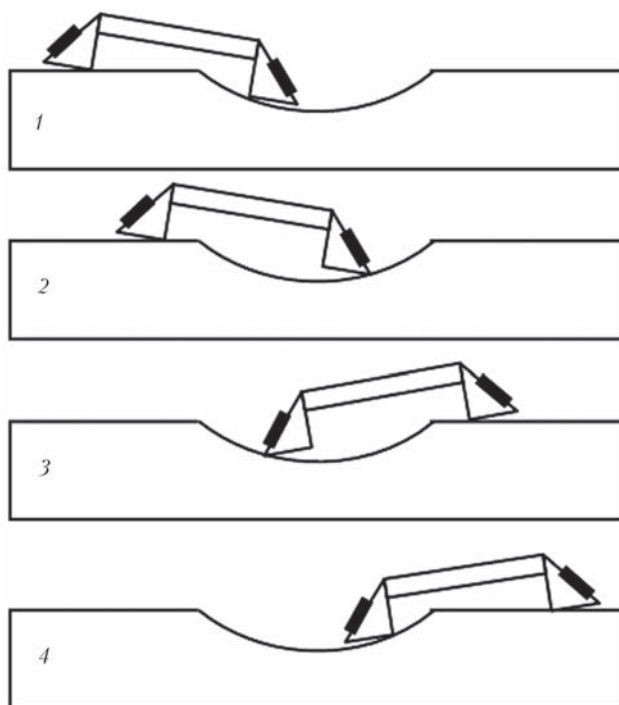


Рис. 7. Можливі положення перетворювача відносно заглибини

шару узгоджується із розміром щілини між призмюю перетворювача та поверхнею зразка. Наприклад, для заглибини глибиною 0,3 мм розрахована ефективна товщина шару контактної рідини становить 0,15 мм, а товщина клиновидної щілини між перетворювачем та зразком змінюється від 0 до 0,23 мм. Отримана залежність часової затримки від величини швидкості акустичної хвилі в контактній рідині вказує на можливість зменшити вплив нерівності поверхні шляхом підбору відповідної рідини. Можна рекомендувати використання контактної рідини із великою швидкістю поширення акустичних хвиль для зменшення часової затримки, спричиненої нерівністю поверхні.

На основі отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок про значний вплив нерівності поверхні на результати вимірювання швидкості. Похибка вимірювання часу проходження ПАХ може становити, залежно від форми заглибини і типу контактної рідини, десятки і сотні наносекунд. Для нашого перетворювача із величиною бази вимірювання 20 мм час проходження ПАХ для сталі становить 6,7 мкс. Відповідно похибка вимірювання часу, спричинена формою поверхні, може перевищувати 1 %, що є значною величиною, оскільки часто досліджувані ефекти призводять до зміни швидкості, яка є меншою кількох відсотків. Таким чином, за наявності відхилення форми поверхні від площини необхідно враховувати можливий її вклад у зміну часу проходження акустичного сигналу.

Висновки

Вплив нерівності поверхні досліджуваного матеріалу на вимірювання швидкості ПАХ проявляється у додатковій часовій затримці сигналу.

Виникнення часової затримки проходження акустичного сигналу внаслідок нерівності поверхні відбувається за рахунок часу проходження акустичного сигналу через додатковий шар контактної рідини.

Часова затримка акустичного сигналу залежить від типу контактної рідини, яка використовується. Для зменшення похибки вимірювання швидкості ПАХ на поверхні із нерівностями пропонується використовувати контактну рідину з якомога більшою швидкістю поширення акустичних хвиль.

Часова затримка, спричинена відхиленням форми досліджуваного матеріалу від площини, може становити суттєву величину і повинна бути врахована під час визначення швидкості ПАХ.

Список літератури

1. Скальський В. Р., Назарчук З. Т., Гірний С. І. (2012) Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструкційної сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, 68–75.
2. Запорожец О. И., Дордиенко Н. А., Михайловский В. А. (2016) Акустические и упругие свойства составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440. *Металлофизика и новейшие технологии*, **6**, 795–813.

3. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
4. Levesque D., Lim C. S., Padioleau C., Blouin A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *Journal of Physics: Conference Series*, **278**, 1–4.
5. Пуро А. Э. (1996) Акустическая томография поверхностных напряжений. *Акустический журнал*, **42**, **1**, 112–115.
6. Johnson C. (1993) 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, New York, Plenum Press, 2121–2128.
7. Викторов И. А. (1981) *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва, Наука.
8. The Stress State Identification of Critical Bridge Component using Nonlinear Acoustic (2014). *Final Report for NCHRP IDEA*, Project 158.
9. Mokryy O., Tsyurulnyk O. (2016) Technique for Measuring Spatial Distribution of the Surface Acoustic Wave Velocity in Metals. *Archives of Acoustics*, **4**, 741–746.
10. Мокрый О. М., Кошовый В. В., Семак П. М. (2014) Методика вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль для діагностики стану металу. *Відбір і обробка інформатії*. **41**(117), 43–48.

References

1. Skalsky, V.R., Nazarchuk, Z.T., Gigny, S.Y. (2012) Effect of electrolytically absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, **4**, 68-75 [in Ukrainian].
2. Zaporozhets, O.I., Dordienko, N.A., Mikhajlovsky, V.A. (2016) Acoustic and elastic properties of the components of WWER-440 reactor vessel wall. *Metallofizika i Novejschie Tekhnologii*, **6**, 795-813 [in Russian].
3. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Velocity of sound and structure of steel and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
4. Levesque, D., Lim, C.S., Padioleau, C., Blouin, A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *J. of Physics: Conference Series*, **278**, 1-4.
5. Puro, A.E. (1996) Acoustic tomography of surface stresses. *Akusticheskij Zhurnal*, **42**(1), 112-115 [in Russian].
6. Johnson, C. (1993) The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 12*. Ed. by Thompson and D.E. Chimenti, New York, Plenum Press, 2121-2128.
7. Viktorov, I.A. (1981) *Sound surface waves in solid bodies*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. (2014) The stress state identification of critical bridge component using nonlinear acoustic. *Final Report for NCHRP IDEA*, Project 158.
9. Mokryy, O., Tsyurulnyk, O. (2016) Technique for measuring spatial distribution of the surface acoustic wave velocity in metals. *Archives of Acoustics*, **4**, 741-746.
10. Mokry, O.M., Koshovy, V.V., Semak, P.M. (2014) Procedure of measurement of the velocity of surface acoustic waves for diagnostics of metal state. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **41**(117), 43-48 [in Ukrainian].

ВЛИЯНИЕ УГЛУБЛЕННИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, О. М. МОКРЫЙ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo2323@gmail.com

Експериментально показано значительное влияние наличия углублений поверхности элемента конструкций на результаты измерения распределения скорости поверхностных акустических волн при использовании пьезоэлектрических контактных

преобразователей с жестким соединением возбуждающей и регистрирующей призм. Установлено, что отклонение от плоскости служит причиной появления дополнительной задержки акустического сигнала, что может приводить к существенной погрешности измерения скорости. Утверждается, что такая временная задержка вызвана прохождением акустического сигнала через дополнительный слой контактной жидкости, который возникает между призмой преобразователя и поверхностью исследуемого материала. Библиогр. 10, рис. 7.

Ключевые слова: элементы конструкций, поверхность, поверхностные акустические волны

INFLUENCE OF DEPRESSIONS ON THE SURFACE OF STRUCTURAL ELEMENTS ON MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

V.R. SKALSKII, O.M. MOKRYI

G.V.Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,
5 Naukova Str., Lviv, E-mail: skalsky.v@gmail.com,
mokomo2323@gmail.com

The considerable impact of presence of depressions on the surface of a structural element on the results of measurement of distribution of surface acoustic wave velocity was shown experimentally for the case of application of piezoelectric contact transducers with rigid coupling of the exciting and recording prisms. It is found that deviations from a plane result in an additional delay of the acoustic signal that may lead to a significant error in velocity measurement. It is stated that a temporary delay is caused by acoustic signal passing through an additional layer of couplant that forms between the transducer prism and studied material surface. 10 Ref., 7 Fig.

Keywords: structural elements, surface, surface acoustic waves

Надійшла до редакції
31.05.2018



THE 72ND IIW ANNUAL
ASSEMBLY AND
INTERNATIONAL
CONFERENCE

Bratislava, Slovakia

7th – 12th July 2019

The annual event of the International
Institute of Welding IIW 2019

www.iiw2019.com

The main topic of the International Conference:

New Progressive Materials and Welding
Methods in the Automotive Industry

Hosted by



Conference Secretariat

