

УДК 539.4:669.778

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

Досліджено вплив пластичної деформації сталі Ст.3 на швидкість поверхневих акустичних хвиль Релея, вимірною методом лазерної реєстрації. Встановлено, що пластична деформація призводить до появи анізотропії акустичних властивостей, яку, згідно з оцінкою залишкових механічних напружень, в основному визначає текстура сталі.

**Ключові слова:** *поверхневі акустичні хвилі, пластична деформація, швидкість поверхневих акустичних хвиль, внутрішні механічні напруження.*

Акустичні властивості (АВ) металів залежать від різноманітних чинників: фазового складу, дефектності структури, рівня механічних напружень тощо [1, 2]. Оскільки вимірювання АВ неруйнівні, то це відкриває перспективи розвитку неруйнівної діагностики стану металу відповідальних конструкцій для моніторингу їх тримкості впродовж тривалої експлуатації, особливо за умови вичерпання планового ресурсу. Останнім часом актуальне вимірювання АВ зразків із просторово-неоднорідними властивостями. Їх можуть викликати процеси, які досліджують акустичними методами, а саме: зварювання [3, 4], наклеп [5], вальцювання [6], гартування [1], пластична деформація [7], в тому числі біля вершини тріщини [8], тощо. Зазначимо також вимірювання механічних напружень, які переважно теж є просторово-неоднорідні, на основі акустопружного ефекту [5, 9, 10]. Такі дослідження вимагають методик, які б давали можливість визначити АВ локально. Один із можливих підходів поряд з томографічними методами, а також дослідженням розсіювальних характеристик металів, полягає у вимірюванні АВ у певній невеликій ділянці зразка [1, 11], перевагою якого є відносна простота реалізації.

Для реалізації цього підходу ефективним є використання поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея [1–3, 5, 11–13]. Порівняно із об'ємними, ПАХ мають низку особливостей, які роблять їх зручнішими для визначення локальних АВ. Першочергово – це можливість легко локалізувати зону вимірювань, яка визначається положенням збуджувального і приймального перетворювачів. Також слід відзначити можливість локалізувати область вимірювань по товщині зразка, оскільки глибину проникнення ПАХ задає їх частота.

Значно розширює можливості ПАХ застосування лазерної техніки для їх збудження чи реєстрації [14]. Лазери не спотворюють акустичних полів, дають змогу збільшити просторове розділення та працювати в області вищих частот, хоча і дещо ускладнюють вимірювання. Зазначимо, що для дослідження металів лазерною технікою використовують як суто безконтактні схеми, де ПАХ збуджують і реєструють за допомогою лазерного випромінювання [11, 14], так і схеми, де лазерне збудження ПАХ поєднують із п'єзоелектричною реєстрацією [3, 15]

*Контактна особа: О. М. МОКРИЙ, e-mail: ovmokryu@ipm.lviv.ua*

чи, навпаки, п'єзоелектричне збудження ПАХ супроводжується лазерною реєстрацією [16].

Нижче, застосовуючи лазерну реєстрацію, дослідили вплив попереднього пластичного деформування сталі на просторовий розподіл швидкості ПАХ.

**Методика експериментальних досліджень.** Використовуючи ПАХ, можна визначати АВ у приповерхневому шарі зразка. Глибина проникнення хвилі в зразок  $\sim 2\Lambda$ , де  $\Lambda$  – довжина ПАХ. Для частот у діапазоні від сотень кГц до десятків МГц, застосованих в ультразвуковому контролі, товщина цього шару в сталях може становити від десятих часток до десятків мм. По поверхні зразка область дослідження задають положенням ділянок збудження та реєстрації ПАХ. Часто використовують контактні призмові давачі, які можна встановити в різних місцях на поверхні зразка, що дає змогу вибрати просторову область вимірювання [17]. Проте найбільше просторове розділення можна отримати лазерними методами збудження та реєстрації ПАХ [11, 14], оскільки згадані області тут визначаються розміром плями лазерного променя, яка може становити десятки  $\mu\text{m}$ . Використовували схему вимірювань, у якій ПАХ збуджували контактним призмовим давачем, а реєстрували безконтактним дефлекційним лазерним методом. Дефлекційний метод реєстрації ПАХ полягає у відхиленні лазерного променя, відбитого від деформованої внаслідок проходження ПАХ поверхні зразка [14, 18]. Відбитий промінь зміщується відносно фотоприймача, а отже, змінюється його потужність, реєстрована фотоприймачем. Призмовий давач кріпили на досліджуваному зразку, а ділянка реєстрації ПАХ переміщувалась шляхом сканування лазерного променя. Загальна схема вимірювань наведена на рис. 1. Збуджувальний акустичний радіоімпульс із частотою заповнення 2,5 МГц і тривалістю кілька  $\mu\text{s}$  подавали на призмовий давач, який збуджував ПАХ у досліджуваному зразку. Зразок кріпили на двокоординатному мікрометричному столику, який давав змогу визначати переміщення з точністю  $5 \cdot 10^{-3}$  мм. ПАХ реєстрували з допомогою He-Ne лазера (THORLABS HRR005) потужністю 0,5 mW. Сигнал (рис. 2), зареєстрований фотоприймачем S6468, підсилений і оцифрований, записувався в пам'ять комп'ютера. Реєстрували сигнали для різних положень лазерного променя на зразку і кореляційним методом знаходили час між ними [19]. Похибка визначення часового зсуву між сигналами 2 ns. Швидкість ПАХ розраховували, виходячи із часового зсуву між сигналами, зареєстрованими в різних ділянках зразка, та відстанню між ними.

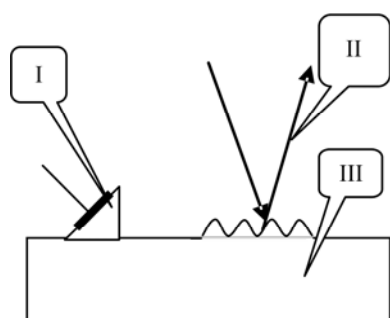


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Схема експерименту: I – давач ПАХ; II – лазерний промінь; III – зразок.

Fig. 1. The scheme of the experiment: I – surface acoustic wave transducer; II – laser beam; III – specimen.

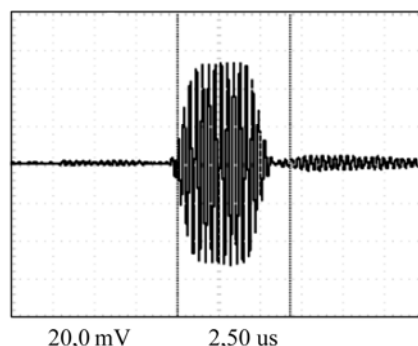


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Приклад сигналу, зареєстрованого фотоприймачем.

Fig. 2. Example of the signal detected by photodetector.

Досліджували призматичні зразки зі сталі Ст.3 довжиною 220 mm і поперечним перерізом робочої частини 10×40 mm. Навантажували їх активним розтягом із швидкістю 0,5 mm/min до руйнування. Діаграма навантаження наведена на рис. 3. Після розриву поверхню зразків шліфували і полірували. Показано (рис. 4) орієнтацію системи координат відносно розірваного зразка і відстань  $L$ , що відповідає середині ділянки між двома положеннями лазерного променя, в якій вимірювали швидкість ПАХ. Перед вимірюваннями зразки витримували впродовж чотирьох місяців для проходження релаксаційних процесів.

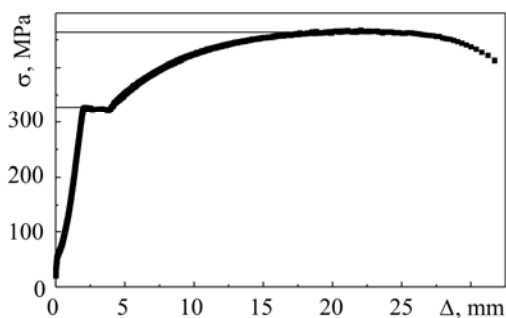


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Діаграма навантаження сталі Ст.3.

Fig. 3. The stress–strain curve for steel Ст.3.

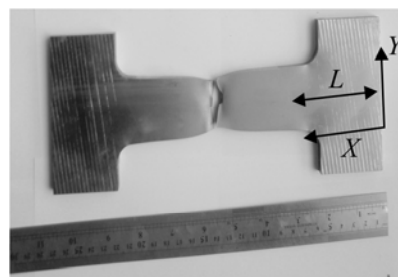


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Розірваний зразок.

Fig. 4. Broken specimen.

**Результати та їх обговорення.** Швидкість ПАХ вимірювали до і після деформації зразка. Відстань між ділянками реєстрації 10 mm. Досліджували швидкість ПАХ у двох напрямках поширення – паралельному (криві 1, швидкість  $V_1$ ) і перпендикулярному (криві 2, швидкість  $V_2$ ) до прикладання напруження під час розриву зразка (рис. 5). На графіках наведені зміни швидкості ПАХ відносно максимального значення. У недеформованих зразках швидкість ПАХ у різних напрямках поширення однакова для всіх ділянок. Після розриву зразки набули просторової неоднорідності за швидкістю ПАХ, а також швидкості стали різними для хвиль, які поширюються в різних напрямках, однак на початку зразка ( $L = 20 \dots 30$  mm) вони однакові у межах точності вимірювань і становлять 3040 m/s.

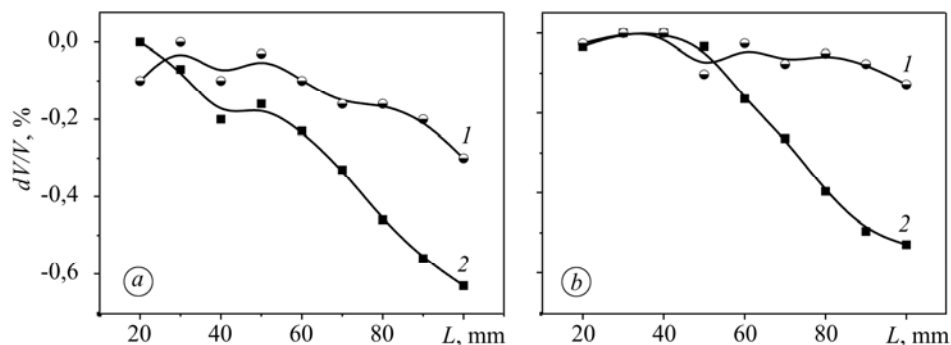


Рис. 5. Залежність швидкості ПАХ, які поширюються паралельно (1) та перпендикулярно (2) до напрямку розтягу, від відстані  $L$ : а – зразок № 1; б – зразок № 2.

Fig. 5. Surface acoustic waves velocity vs. distance,  $L$ , in the propagation direction parallel (1) and perpendicular (2) to tension direction: a – specimen № 1; b – specimen № 2.

За малих значень  $L$  зразок не піддається пластичній деформації, тому швидкість ПАХ незмінна. З наближенням до ділянки розриву обидві швидкості знижуються: значення  $V_1$  зменшилось на 0,1...0,2%, а  $V_2$  – на 0,6% від початкового.

Сповільнення ПАХ пояснюють появою дислокацій, мікропошкоджень та мікронапружень [1, 5, 12, 20]. Водночас виявлена різниця у зміні швидкостей ПАХ  $V_1$  і  $V_2$ , які поширюються паралельно і перпендикулярно відносно напрямку прикладеного напруження. Отже, деформований зразок стає анізотропним. Вказують [9] дві загальні причини анізотропних властивостей – це текстура і внутрішні механічні напруження (макронапруження) металу. Причому наголошують, що питання розділення цих двох механізмів у загальному випадку на основі акустичних вимірювань до кінця не вирішене.

Щоб проаналізувати вклади цих механізмів, оцінимо механічні напруження, які необхідні для спричинення отриманих експериментально змін швидкості ПАХ. Враховуючи, що розмір зразків по одній координаті (10 mm) суттєво менший за розміри по двох інших (40 та ~110 mm), можна в деякому наближенні розглядати поле напружень у них як двовимірне [5, 9]. Тоді одну компоненту тензора напружень приймають рівною нулю, а саме  $\sigma_{33} = 0$ . Для плоских напружень під час оцінки вкладу механічних напружень можна використати підхід [9, 19], за якого зміна швидкості ПАХ така:

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \beta_1 \sigma_{11} + \beta_2 \sigma_{22}; \quad \frac{\Delta V_2}{V_2} = \beta_2 \sigma_{22} + \beta_1 \sigma_{11}, \quad (1)$$

де  $V_1$  і  $V_2$  – швидкості ПАХ;  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  – компоненти тензора залишкових механічних напружень у системі координат, показаній на рис. 4;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коефіцієнти, які визначають через константи пружності другого і третього порядків.

Акустопружний ефект на основі зміни швидкості ПАХ досліджували в праці [5], де для сталі Ст.3 наведені такі коефіцієнти:  $\beta_1 = -2,6$  1/ТПа,  $\beta_2 = 1$  1/ТПа. Згідно з експериментальними даними (рис. 5), біля ділянки розриву маємо  $\Delta V_1/V_1 = 0,001$  і  $\Delta V_2/V_2 = 0,006$ . Якщо припустити, що така зміна швидкості ПАХ спричинена внутрішніми напруженнями, то за рівнянням (1) напруження становили би  $\sigma_{11} = -1470$  МПа,  $\sigma_{22} = -2880$  МПа. Тобто вони є стискальні і суттєво перевищували б напруження, яке приклали до зразка під час пластичної деформації (див. рис. 3). Тому можна зробити висновок, що залишкові внутрішні напруження є недостатні для створення таких суттєвих змін швидкостей ПАХ, які спостерігали під час експерименту. З іншого боку, зразки підготували так, щоб зменшити внутрішні залишкові напруження. Отже, домінуючий вклад в анізотропію зразка вносить текстура металу, яка виникає під час його пластичного деформування. Зазначимо, що текстура зразка набула саме внаслідок пластичної деформації, оскільки до навантаження швидкість ПАХ для різних напрямків поширення була однаковою в межах точності вимірювань. Такий ж висновок зробили і в праці [9], де вказано, що в багатьох випадках початкова анізотропія призводить до суттєвішої зміни швидкості акустичних хвиль порівняно зі змінами, викликаними механічними напруженнями. Врахування впливу текстури особливо актуально під час визначення напружень методами акустопружності. Дослідили механічні напруження в наклепаному шарі металу ультразвуковим, рентгенівським та руйнівним (методом Давиденкова – пошаровим травленням) методами [5]. Результати ультразвукових досліджень відрізнялися від отриманих двома іншими методами. Механічні напруження тут розраховували без урахування змін швидкості, спричиненими пластичною деформацією. Зроблено висновок про можливо більший вклад пластичної деформації в зміну швидкості порівняно із вкладом механічних напружень. Наприклад, вплив текстури необхідно враховувати під час визначення механічних напружень в ділянці зварного шва акустичними методами.

Запропонований [21, 22] можливий шлях вирішення цієї проблеми, який полягає у виконанні металографічних досліджень для визначення характеристик текстури металу та оцінці її впливу на АВ. Зазначимо, що текстура металу може виникнути не тільки за дії пластичних деформацій, але і під впливом термічної обробки [22]. Отже, врахування впливу текстури важливо для інтерпретації результатів акустичних досліджень широкого кола явищ у металах.

## ВИСНОВКИ

Виміряно просторовий розподіл швидкості поверхневих акустичних хвиль Релея в сталі Ст.3 за їх лазерної реєстрації під час неоднорідної пластичної деформації. Виявлено, що швидкість поверхневих акустичних хвиль зменшується з наближенням до області розриву зразка і залежить від напрямку поширення. На основі оцінки залишкових напружень, згідно з акустопружним ефектом, встановлено, що основний вклад у виникнення акустичної анізотропії пов'язаний із текстурою сталі.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано влияние пластической деформации стали Ст.3 на скорость поверхностных акустических волн Рэлея, измеренной методом лазерной регистрации. Определено, что пластическая деформация приводит к появлению анизотропии акустических свойств, которые, согласно оценки остаточных механических напряжений, в основном определяются текстурой стали.

*SUMMARY.* The effect of steel Ст.3 plastic deformation on the surface acoustic Raleigh waves velocity measured by the laser registration method is studied. It is revealed that plastic deformation causes anisotropy of the steel acoustic properties, which, according to the evaluated residual stresses, are determine mainly by the steel texture.

1. *Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л.* Скорость звука и структура стали и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
2. *Обнаружение* микродефектов в металлах на основе изучения акустических полей / Ю. В. Жилтухина, Д. В. Перов, А. Б. Рашкевич, В. С. Пермикин // Дефектоскопия. – 2007. – № 10. – С. 26–40.
3. *Быченко В. А.* Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – **54**, № 7. – С. 45–50.
4. *Characterisation* of microstructure in 9% chromium ferritic steels using ultrasonic measurement / A. Kumar, V. K. Choudhary, K. Laha et al. // Trans. Indian Inst. Met. – 2003. – **56**, № 5. – P. 483–497.
5. *Бобренко В. М., Вангели М. С., Куценко А. Н.* Акустическая тензометрия (теория и практика). – Кишинев: Штиинца, 1991. – 202 с.
6. *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.
7. *Характер* локализации пластической деформации и разрушение высокохромистой стали мартенситного класса / В. И. Данилов, Д. В. Орлова, Л. Б. Зуев, Г. В. Шляхова // Изв. ВУЗов. Физика. – 2009. – **54**, № 5. – С. 78–84.
8. *Akhshik S., Ahmadi M.* Ultrasonic Non-destructive evaluation of stress around the tip of a crack // Asia-Pacific Conf. on NDT (Nov. 5–10, 2006). – Auckland: New Zealand, 2006. – P. 1–8.
9. *Никитина Н. Е.* Акустопругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с.
10. *Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И.* Введение в акустопругость. – К.: Наук. думка, 1977. – 162 с.
11. *Rapid* imaging of microstructure using spatially resolved acoustic spectroscopy / S. D. Sharples, M. Clarc, W. Li, M. G. Somekh // 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Laser Ultrasonics: Science, Tech-

- nology and Applications (July 16–18, 2008). – Canada: Montreal. – <http://www.ndt.net/article/laser-ut2008/papers/Sharples%20LU2008.pdf>
12. Лунев А. Г., Бочкарева А. В. О влиянии структурных превращений в деформируемых материалах на скорость и затухание волн Рэлея // Изв. ТПУ. – 2008. – 312, № 2. – С. 188–191.
  13. Gerhart G. R. Rayleigh wave velocity for a stress-induced slightly anisotropic solid // J. Acoust. Soc. Amer. – 1976. – 6, № 5. – P. 1085–1088.
  14. Wagner J. W. Optical detection of ultrasound // Physical Acoustics: Ultrasonic Measurement Methods. – 1990. – XIX. – P. 201–265.
  15. Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами / А. А. Карабутов, Л. И. Кобелева, Н. Б. Подымова, Т. А. Чернышева // Ел. ж-л “Техн. акустика”. – <http://www.ejta.org>. – 2009. – 19. – С. 1–15.
  16. Ruiz A. and Nagy P. B. Laser-ultrasonic surface wave dispersion measurements on surface-treated metals // Ultrasonics. – 2004. – 42. – P. 665–669.
  17. Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1981. – 184 с.
  18. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy / A. J. Constant Putman, Bat-t G. De Groot, Niek F. Van Hulst, J. Greve // J. Appl. Phys. – 1992. – 72 (I). – P. 6–12.
  19. Arattano M. and Marchi L. Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2005. – 5. – P. 137–142.
  20. Gerhart G. R. Rayleigh wave velocity for a stress-induced slightly anisotropic solid // J. Acoust. Soc. Amer. – 1976. – 6, № 5. – P. 1085–1088.
  21. Гончар А. В., Мишакин В. В. Оценка величины пластической деформации в структурно-неоднородных материалах с помощью ультразвуковых и металлографических исследований // Металлургия и материаловедение. – 2012. – С. 221–227.
  22. Курашкин К. В., Мишакин В. В. Некоторые пути реализации безнулевой акустической тензографии // Вест. науч.-техн. развития. – 2010. – № 1. – С. 11–16.

Одержано 15.05.2013