

## ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛУ, ПІДДАНИХ АБРАЗИВНО-СТРУМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ, З ДОПОМОГОЮ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, М. М. СТУДЕНТ, О. М. МОКРИЙ,  
В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, І. М. РОМАНИШИН, П. М. СЕМАК

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

Досліджено поверхневі шари металу низьковуглецевої сталі після абразивно-струменевої обробки. Визначено швидкість поверхневих хвиль Релея імпульсно-фазовим методом на частотах 3; 6 і 9 МГц зі застосуванням контактних п'єзоелектричних перетворювачів. Вивчено розподіл механічних напружень за глибиною з допомогою тензометричних вимірювань. Проаналізовано вплив різних чинників на зміну швидкості поверхневих акустичних хвиль. Запропоновано нову методику визначення товщини пластично деформованого шару металу після абразивно-струменевої обробки за частотною залежністю швидкості цих хвиль.

**Ключові слова:** *абразивно-струменева обробка, швидкість поверхневих хвиль, залишкові механічні напруження, шорсткість.*

The surface layers of low-carbon steel metal after shot peening was studied. The velocity of surface Rayleigh waves of different frequencies was measured by the pulse-phase method using contact piezoelectric transducers. Determination of the surface acoustic waves velocity was performed at frequencies of 3; 6 and 9 MHz. The distribution of mechanical stresses by depth was studied by means of tensometric researches by etching the surface layers of metal. A study of the roughness of the treated surface was carry out. The influence of various factors on the change in the speed of surface acoustic waves was considered. An approach that allows us to estimate the thickness of the plastically deformed layer of metal after abrasive blasting, based on determining the frequency dependence of the surface acoustic waves velocity is proposeed.

**Keywords:** *shot peening, velocity of surface waves, residual mechanical stresses, roughness.*

**Вступ.** Сьогодні широко використовують різноманітні методи модифікації фізико-механічних властивостей металів для поліпшення їх експлуатаційних характеристик, зокрема підхід, коли створюють поверхнево пластично деформований шар. Для цього застосовують різні технології, в т.ч. і абразивно-струменеву обробку, щоб очистити поверхню металу, поліпшити міцність, а також інші експлуатаційні характеристики. В результаті ударів абразивних частинок на поверхні виникають пластично деформовані мікроділянки, в приповерхневих зонах металу утворюється пластично деформований шар, а також змінюється шорсткість поверхні, яка важлива під час нанесення різноманітних покриттів [1–3], яку контролюють різноманітними контактними [4] та безконтактними методами [5, 6]. Стан приповерхневих шарів оцінюють акустичними методами, зокрема, методами акустичної емісії, які ґрунтуються на ефекті Баркгаузена [7–9], та з допомогою нелінійних акустичних ефектів [10]. Добре зарекомендували себе методики дослідження стану матеріалу, де визначають швидкість поверхневих акустичних хвиль

(ПАХ) [10–15], яка залежить від пружних характеристик матеріалу, його густини та чутлива до виникнення пластичної деформації [16], а також механічних напружень [17]. ПАХ поширюються в приповерхневому шарі товщиною приблизно  $1,5\Lambda$ , де  $\Lambda$  – довжина хвилі. За зміною їх швидкості можна ефективно контролювати приповерхневі шари металу після абразивно-струменевої обробки.

Відомі методики визначення швидкості ПАХ не вимагають складного обладнання і дають можливість оцінювати стан матеріалу в польових умовах. Водночас складно інтерпретувати отримані результати через різні чинники, які виникають під час пластичної деформації і призводять до зміни швидкості ПАХ [12, 15]. Тому нижче досліджено вплив абразивно-струменевої обробки на зміну властивостей приповерхневих шарів металу та швидкості ПАХ різної частоти.

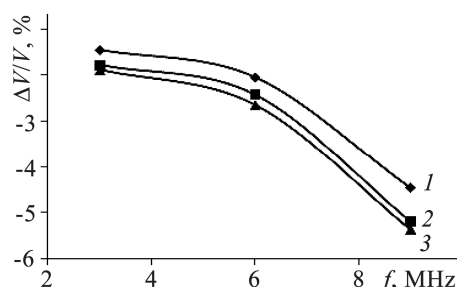
**Методики вимірювання та експериментальні результати.** Вивчали зразки із низьковуглецевої сталі розміром  $55 \times 55 \times 9,8 \text{ mm}^3$ , піддані абразивно-струменевої обробці за тиску стиснутого повітря 0,6 МПа, діаметра абразивного потоку 2 mm, відстані від сопла до поверхні оброблення 10 cm.

Швидкість ПАХ визначали фазо-імпульсним методом, за якого використовують акустичний сигнал у вигляді радіоімпульсу із високочастотним заповненням. Вимірювали час проходження ним відстані, що дорівнює базі вимірювань у досліджуваному зразку і зразку порівняння. Сталість бази вимірювань забезпечували перетворювачем, в якому збуджувальна та реєструвальна частини жорстко з'єднані між собою [18]. ПАХ збуджували та приймали з допомогою клинів, в яких поздовжня об'ємна акустична хвиля трансформується в поверхневу і, навпаки, на частотах 3; 6 і 9 МГц. База вимірювання 30 mm. Зразком порівняння слугував матеріал у стані постачання.

Результати досліджень подано на рис. 1. За нульову приймали швидкість у зразку порівняння. Виявили, що абразивно-струменева обробка зменшує швидкість ПАХ. Для всіх зразків з підвищенням частоти акустичної хвилі відчутніше змінюється швидкість ПАХ.

Рис. 1. Залежність відносної зміни швидкості ПАХ від її частоти для зразків із різною кількістю проходів сопла: 1 – один; 2 – два; 3 – три.

Fig. 1. Dependence of surface acoustic waves (SAW) velocity on its frequency for samples with different number of nozzle passes: 1 – one; 2 – two; 3 – three.



Оскільки за абразивно-струменевої обробки зростає шорсткість поверхні зразків, то її вплив на зміну швидкості ПАХ оцінювали під час зняття поверхневих шарів матеріалу шліфуванням, яке не змінювало її у контрольних зразках, а в досліджуваних вона змінювалась внаслідок зменшення шорсткості, а також товщини наклепаного шару. Товщину знятого шару визначали індикатором годинникового типу з ціною поділки 2  $\mu\text{m}$ . Результати вимірювань наведено на рис. 2. Виявили, що швидкість зі збільшенням товщини зішліфованого шару зменшується менше. Особливо це відчутно на етапі зняття верхніх шарів на глибину до 20  $\mu\text{m}$ . За подальшого їх зішліфування швидкість знижується значно повільніше.

Шорсткість і хвилястість поверхні вимірювали профілографом-профілометром “Калибр С-265”. Шорсткість оцінювали за профілограмами в межах базової довжини, яку вибирали так, щоб не проявлялись інші види нерівностей (хвилястість та макровідхилення). Встановили, що величина  $R_{\text{max}}$ , яка дорівнює відстані між лінією виступів і лінією заглибин у межах базової довжини, становить для

зразка в стані постачання 2,6  $\mu\text{m}$ , для зразка після одного проходження сопла – 33,7  $\mu\text{m}$ , після двох – 47,6  $\mu\text{m}$ , після трьох – 52,4  $\mu\text{m}$ . Визначили також параметр  $R_p$ , що характеризує шорсткість, рівний відстані від лінії виступів до середньої лінії в межах базової довжини. У не оброблених зразках він становив 0,8  $\mu\text{m}$ , а в оброблених після одного проходу сопла – 16,5  $\mu\text{m}$ , двох – 17,8  $\mu\text{m}$ , трьох – 29,8  $\mu\text{m}$ . Отже, внаслідок абразивно-струменевої обробки шорсткість поверхні зростає.

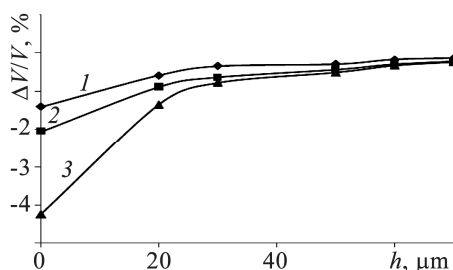


Рис. 2. Розподіл відносної зміни швидкості ПАХ різної частоти  $f$  залежно від товщини зішліфованого поверхнього шару металу  $h$  для зразка після одного проходження сопла: 1 –  $f = 3$  МГц; 2 – 6; 3 – 9.

Fig. 2. Distribution of the relative change in the SAW velocity of different frequencies  $f$  depending on the thickness of the ground surface layer of metal  $h$  for the sample with one pass of the nozzle: 1 –  $f = 3$  МГц; 2 – 6; 3 – 9.

Для оцінки впливу абразивно-струменевої обробки на приповерхневі шари металу досліджували розподіл залишкових механічних напружень за глибиною методом, описаним раніше [19]. Їх визначали, послідовно знімаючи тонкі поверхневі шари обробленого зразка. Для цього використовували тензометри опору, які наклеювали вздовж зразка. Результати досліджень подані на рис. 3. Виявили значне від'ємне напруження в поверхневому шарі, яке дещо зростає на глибині 50  $\mu\text{m}$ .

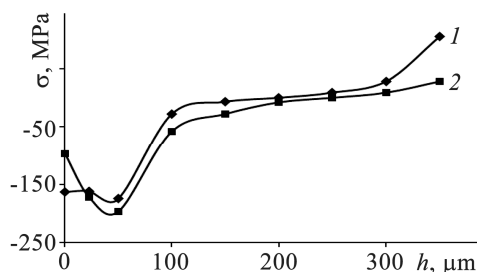


Рис. 3. Розподіл напружень за глибиною  $h$  у зразках із низьковуглецевої сталі після абразивно-струменевої обробки за одного (крива 1) і п'яти (крива 2) проходів сопла.

Fig. 3. Distribution of stresses along the depth  $h$  in low-carbon steel specimens after shot peening for different number of nozzle passes: 1 – one nozzle pass, 2 – five nozzle passes.

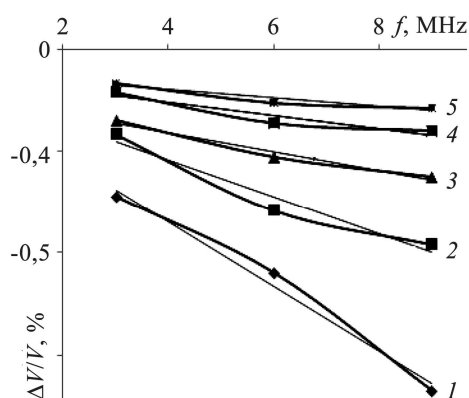
**Аналіз результатів.** Швидкість ПАХ суттєво змінюється після абразивно-струменевої обробки і залежить від її тривалості (див. рис. 1). Для оцінювання механізмів такої зміни важливо урахувати залежність швидкості ПАХ від товщини зішліфованого шару матеріалу зразка (рис. 2). Дві ділянки з різним нахилом на цих графіках свідчать про різну природу її зміни на глибині 0...20 і 20...70  $\mu\text{m}$ . Верхній шар суттєво неоднорідніший, що спричинено шорсткістю поверхні, а властивості шару, який знаходиться на більшій глибині, змінені пластичною деформацією. За результатами досліджень шорсткості поверхні можна оцінювати характерні розміри нерівностей, а отже, розмір шару металу, де проявляється значний її вплив. Товщина такого шару становить десятки мікрометрів і зменшення зміни швидкості в шарі завтовшки 0...20  $\mu\text{m}$  можна пов'язувати зі шорсткістю поверхні, сформованою абразивно-струменевою обробкою. Швидкість ПАХ

вищої частоти змінюється суттєвіше, оскільки відносні нерівності поверхні для них є більші.

Зі залежностей зміни швидкості ПАХ (див. рис. 2) та механічних напружень (див. рис. 3) можна зробити висновок, що товщина наклепаного шару становить близько 100  $\mu\text{m}$ . Зміна швидкості на ділянці 20...70  $\mu\text{m}$  пов'язана із впливом пластично деформованого шару. Відомо, що за пластичної деформації швидкість акустичних хвиль внаслідок текстури та пористості зменшується [16, 17], а також змінюється під дією механічних напружень. Вплив залишкових механічних напружень на швидкість ПАХ оцінюють за значенням акустопружного коефіцієнта, який для сталі становить  $-0,01\%/100 \text{ MPa}$  [17]. Таким чином, максимальне механічне напруження  $-180 \text{ MPa}$  призведе до зміни швидкості ПАХ на  $0,018\%$ , що суттєво менше за значення, отримані експериментально. Отже, механічні напруження незначно впливають на швидкість ПАХ внаслідок абразивно-струменевої обробки. Домінують тут механізми, пов'язані зі зміною текстури та пористості поверхневого шару металу.

Рис. 4. Залежність відносної зміни швидкості ПАХ від частоти  $f$  за різної товщини знятого поверхневого шару матеріалу зразка  $h$  після абразивно-струменевої обробки: 1 –  $h = 20 \mu\text{m}$ ; 2 – 30; 3 – 50; 4 – 60; 5 – 70  $\mu\text{m}$ .

Fig. 4. Dependence of the relative change of SAW velocity of different frequency  $f$  on the thickness of the removed surface layer of the sample material  $h$  after shot peening treatment: 1 –  $h = 20 \mu\text{m}$ ; 2 – 30; 3 – 50; 4 – 60; 5 – 70  $\mu\text{m}$ .



**Використання дисперсійних залежностей швидкості ПАХ для оцінювання товщини пластично деформованого шару металу.** За залежностями швидкості ПАХ від її частоти (рис. 2) можна визначити характеристики поверхневого пластично деформованого шару, а отже, отримати залежність швидкості ПАХ від товщини пластично деформованого шару (рис. 4). Швидкість ПАХ з певним наближенням подамо лінійною залежністю від її частоти, яка є апроксимацією експериментально отриманої кривої:

$$\Delta V / V = af + b,$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти. Кутовий коефіцієнт  $a$  задає нахил апроксимаційної прямої і придатний для оцінювання дисперсії швидкості. Для різних товщин пластично деформованого шару його відповідне значення подано на рис. 5. Зі зменшенням товщини пластично деформованого шару абсолютне значення його знижується, що свідчить про зменшення відповідної частотної залежності швидкості ПАХ. Отримана залежність монотонна і вказує на однозначний зв'язок товщини пластично деформованого шару і кутового коефіцієнта. Отже, товщину пластично деформованого шару можна оцінювати за частотною залежністю швидкості ПАХ і кутовим коефіцієнтом апроксимаційної прямої. Фізичною основою цього підходу є те, що зміна швидкості пропорційна товщині пластично деформованого шару. Оскільки глибина проникнення ПАХ у зразок залежить від її довжини, то для хвиль різної частоти відносна товщина шару буде різною.

Зазначимо, що шорсткість поверхні зразка суттєво змінює швидкість ПАХ, і цей вплив відчутніший, ніж пластично деформованого шару (див. рис. 2). Тому,

щоб отримати дисперсійну залежність для оцінювання товщини наклепаного шару, слід попередньо обробити поверхню для зменшення шорсткості.

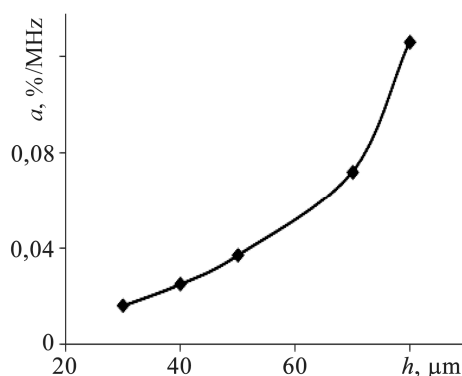


Рис. 5. Залежність модуля кутового коефіцієнта від товщини поверхневого пластично деформованого шару.

Fig. 5. Dependence of the modulus of the angular coefficient on the thickness of the surface plastically deformed layer.

значно впливають на швидкість ПАХ. Встановлено, що за частотною залежністю цієї швидкості можна визначати товщину приповерхневого пластично деформованого шару.

## ВИСНОВКИ

Абразивно-струменева обробка зменшує швидкість поверхневих акустичних хвиль внаслідок зростання шорсткості поверхні, а також створення приповерхневого наклепаного шару. Зміна швидкості монотонно зростає зі збільшенням частоти акустичної хвилі. Характерні розміри шорсткості поверхні, спричиненої таким обробленням, становлять кілька десятків мікрометрів. Через шорсткість поверхні швидкість поверхневої хвилі може зменшитися на кілька відсотків. Максимальні механічні напруження, створені абразивно-струменевою обробкою, знаходяться на глибині 50  $\mu\text{m}$  від поверхні. Згідно з виконаною оцінкою залишкові механічні напруження не-

1. *Effect of hydrogen on the wear resistance of steels upon contact with plasma electrolytic oxidation layers synthesized on aluminum alloys* / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Dovhnyuk, V. Posuvailo, O. Student, P. Maruschak, and I. Koval'chuck // *Metals*. – 2019. – **9**, № 3. – Article number 280, P. 2–14. doi:10.3390/met9030280 .
2. *The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys* / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Posuvailo, O. Student, Ya. Sirak, V. Hvozdet's'kyi, P. Maruschak, and H. Veselivska // *Vacuum*. – 2020. – **179**. – September 109514. doi.org/ 10.1016/j.vacuum.2020.109514.
3. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdet's'kyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.

(*Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покриттів* / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–28.)

4. *Gong Y., Xu J., and Buchanan R. C. Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale* // *Physical Sciences Reviews*. – 2018. – **3**, № 1 – P. 1–10.
5. *Nondestructive testing of the state of surfaces damaged by corrosion pitting* / В. Р. Русин, Н. Р. Ануфрієва, Н. Р. Грабовська, В. Г. Іванюк // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 516–524.

(*Неруйнівний контроль стану поверхонь, уражених корозійними пітингами* / Б. П. Русин, Н. П. Ануфрієва, Н. Р. Грабовська, В. Г. Іванюк // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 90–96.)

6. *Муравський Л. І., Вороняк Т. І., Кметь А. Б. Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики*. – Львів: СПОЛОМ, 2014. – 272 с.
7. *Назарчук З. Т., Андрейків О. Є., Скальський В. Р. Оцінювання водневої деградації ферромагнетиків у магнетному полі*. – К.: Наук. думка, 2013. – 270 с.

8. *Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O.* Acoustic emission. Metrology and application. – Springer, 2017. – 283 p.
9. *Grum J. and Zerovnik P.* Use of the Barkhausen effect in the measurement of residual stresses in steel // *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2000. – **42**, № 12. – P. 796–800.
10. *Mora P. and Spies M.* On the validity of several previously published perturbation formulas for the acoustoelastic effect on Rayleigh waves // *Ultrasonics*. – 2019. – **91**. – P. 114–120.
11. *Ditri J. D. and Hongerholt D.* Stress distribution determination in isotropic materials via inversion of ultrasonic Raileigh wave dispersion data // *Int. J. Solids Structures*. – 1996. – **33**, № 17. – P. 2437–2451.
12. *Ruiz A. and Nagy P. B.* Laser-ultrasonic surface wave dispersion measurements on surface-treated metals // *Ultrasonics*. – 2004. – **42**. – P. 1–9.
13. *Gartsev S. and Köhler B.* Direct measurements of Rayleigh wave acoustoelastic constants for shot-peened superalloys // *NDT & E International*. – 2020. – **113**. – P. 1–7.
14. *Tarassenko A. A., Jastrabik L., and Tarassenko N. A.* Effect of roughness on the elastic surface wave propagation // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* – 2003. – № 24. – P. 3–12.
15. *Investigation of the space distribution of the velocity of surface acoustic waves in plastically deformed steel by the laser method / V. V. Koshovyi, O. M. Mokryi, I. M. Hredil', and I. M. Romanyshyn // Material Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 478–484.  
(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. – **49**, № 4. – С. 56–61.)
16. *Скальський В. Р., Мокрий О. М.* Оцінка пошкодженості ферито-перлітної сталі за величиною зміни швидкості повздожньої акустичної хвилі // *Техн. діагностика і неруйн. контроль*. – 2018. – № 1. – С. 3–7.
17. *Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves / D. Lévesque, C. S. Lim, C. Padioleau, and A. Blouin // Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Laser-Ultrasonics – Science, Technology and Applications (Talence, France, 5–8 July 2010) // J. of Physics: Conference Series 278*. – P. 1–4.
18. *Johnson C. and Thompson R. B.* The spatial resolution of Raileigh wave, acoustoelastic measurement of stress // *Review of Progress in Quantutative Nondestruction Evaluation / Ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti*. – New York: Plenum Press, 1993. – P. 2121–2128.
19. *Bereznyts'ka M. P., Kyrylenko S. M., and Paustovskii A. V.* Evaluation of residual stresses in bars subjected to surface hardening // *Material Science*. – 1997. – **33**, № 6. – P. 851–861.  
(Бережницька М. П., Кириленко С. М., Паустовський О. В. Визначення залишкових напружень у стрижнях після поверхневого зміцнення // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1997. – **33**, № 6. – С. 105–108.)

Одержано 21.01.2021