

УДК 534:621.787:620.17

ВПЛИВ НАВОДНЮВАННЯ НА ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У КОНСТРУКЦІЙНІЙ СТАЛІ З НАНОКРИСТАЛІЧНИМ ШАРОМ

О. І. ЗВІРКО¹, О. М. МОКРИЙ¹, В. І. КИРИЛІВ¹,
І. М. РОМАНИШИН¹, О. В. МАКСИМІВ¹, Ю. О. КУЛИК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Львівський національний університет імені Івана Франка

Досліджено на сталі 40Х вплив поверхневого шару з нанокристалічною структурою (НКС), електролітичного наводнювання різної інтенсивності та їх комплексної дії на швидкість поверхневих акустичних хвиль (ПАХ). Виявлено зміни у параметрах НКС під дією водню. За допомогою ПАХ з частотою 1; 3 та 6 МГц оцінили розподіл властивостей за глибиною поверхневого шару. Показано зменшення швидкості ПАХ для шару з НКС проти матричного металу, а також для наводненого металу проти ненаводненого. Встановлено немонотонну зміну швидкості ПАХ залежно від інтенсивності наводнювання сталі. Виявлено частотну залежність швидкості ПАХ для наводненого металу, яка свідчить про неоднорідний розподіл змін властивостей за глибиною. Поверхневий НКС шар є бар'єром для проникнення водню углиб сталі за наводнювання за $i_c = 0,1 \text{ mA/cm}^2$.

Ключові слова: *сталь, швидкість поверхневої акустичної хвилі, нанокристалічний шар, наводнювання, неруйнівний метод контролю.*

The influence of the surface layer with nanocrystalline structure (NCS), electrolytical hydrogen charging with different intensities and their complex effect on the velocity of surface acoustic waves (SAW) was studied on the 40X steel. Changes in the NCS parameters under hydrogen action were revealed. Using SAW with frequencies of 1; 3 and 6 MHz, the distribution of properties through the surface layer thickness was estimated. A decrease in the SAW velocity is shown for the layer with NCS versus the matrix metal, as well as for the hydrogen charged metal versus the non-hydrogenated one. A non-monotonic dependence of the change in SAW velocity on the hydrogen charging intensity of the steel was established. The dependence of the SAW velocity on the frequency was observed for the hydrogen charged steel, thus indicating a non-homogeneous distribution of changes in properties through the depth. The surface NCS layer is a barrier for the hydrogen permeation into the steel depth under hydrogen charging at $i_c = 0.1 \text{ mA/cm}^2$.

Keywords: *steel, velocity of surface acoustic waves, nanocrystalline layer, hydrogen charging, non-destructive test method.*

Вступ. Наноструктурне поверхнєве зміцнення конструкційних сталей вважають ефективним способом поліпшення їх фізико-механічних властивостей [1–5]. Важливим чинником їх тривалої та надійної роботи у складних умовах сумісної дії механічних навантажень та агресивних середовищ є контроль та прогнозування їх експлуатаційних характеристик. Одним із ефективних підходів, які використовують для неруйнівного контролю матеріалів, є метод поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) [6–10]. Він базується на здатності ПАХ поширюватись у приповерхневому шарі металу товщиною, приблизно рівною довжині хвилі [6], що дає змогу оцінити розподіл властивостей за глибиною, використовуючи хвилі різної

Контактна особа: О. І. ЗВІРКО, e-mail: olha.zvirko@gmail.com

частоти [9, 10]. Швидкість поширення таких хвиль залежить від пружних сталей та густини матеріалу, в якому вони поширюються [6]. Відповідно за швидкістю ПАХ можна опосередковано контролювати властивості поверхневого модифікованого шару матеріалу, оскільки пружні сталі залежать від структури металу, густини дислокацій, залишкових механічних напружень, пористості та інших параметрів, які змінюються під час оброблення поверхневих шарів металу. Оскільки експлуатація конструкцій чи деталей машин може змінювати структурно-механічний стан поверхневого шару металу, то для оцінювання його деградації з урахуванням впливу різноманітних фізико-механічних чинників перспективним є застосування методу ПАХ [9, 10]. До особливо небезпечних експлуатаційних чинників належить водень [1, 11], який за тривалої сумісної дії з прикладеними до конструктивного елемента напруженнями може проявляти значну деструктивну дію. Відомі результати вивчення зміни швидкості акустичних хвиль у металах під дією наводнювання є неоднозначними, відзначають як її зменшення [12–14], так і збільшення [15, 16], що, очевидно, пов'язано з реалізацією різних механізмів взаємодії металів з воднем за різних умов та режимів наводнювання. Зокрема, за розвитку пошкодженості під дією водню швидкість різних типів акустичних хвиль однозначно зменшується [17].

Мета роботи – вивчити вплив наводнювання сталі 40X без та з поверхневою нанокристалічною структурою (НКС) на параметри її структури та швидкість поширення ПАХ.

Методики випроб. Об'єкт досліджень – сталь 40X (0,4C–1Cr) у нормалізованому стані без та з поверхневим НКС шаром. Для формування НКС зразки зі сталі 40X піддавали механоімпульсному обробленню (МІО), яке полягає у високошвидкісному терті між оброблюваною поверхнею та зміцнювальним інструментом з подаванням у зону контакту технологічного середовища [1, 3]. Обробляли призматичні зразки розмірами 20×18×100 mm, використовуючи модернізований плоскошліфувальний верстат SPS-20 та зміцнювальний інструмент зі сталі 40X з прямолінійною робочою поверхнею завширшки 5 mm. Як технологічне середовище використали мінеральну оливу I-20A з додатком низькомолекулярного поліетилену (джерело дифузанта вуглецю). Режим МІО: лінійна швидкість інструменту 60 m/s, швидкість переміщення зразка 1 m/min, поперечна подача стола зі зразком 1 mm/rev, глибина врізання інструменту 0,35 mm, що відповідає тиску в зоні фрикційного контакту 0,7 GPa. Мікротвердість H_c вимірювали на твердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g. Мікроструктурні параметри НКС визначали на рентгенівському мікроаналізаторі ДРОН-3 у CuK_{α} -випромінюванні ($U = 30$ kV, $I = 20$ mA) з кроком $0,05^{\circ}$ та експозицією у точці 4 s. Обробляли дифрактограми, використовуючи програмне забезпечення CSD [18]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [19].

Зразки після МІО наводнювали електрохімічним способом у розчині сульфатної кислоти H_2SO_4 (pH 3) з додаванням 2 g/l тіосечовини $(NH_2)_2CS$ як стимулятора. Застосували різну густину катодного струму $i_c = 0,1; 1$ та 10 mA/cm². Значною тривалістю процедури (100 h) намагалися досягти рівномірнішого наводнювання поверхневого шару зразка. Рентгенівські дослідження виконували приблизно через 200 h, вважаючи, що десорбція дифузійно-рухливого водню з металу за кімнатної температури здебільшого завершена [20].

Швидкість ПАХ визначали фазово-імпульсним методом. Використали акустичний сигнал у вигляді радіоімпульсу із високочастотним заповненням. ПАХ збуджували та приймали за допомогою клинів, у яких поздовжня об'ємна акустична хвиля трансформується в поверхневу, а за її приймання реалізується зворотний процес. Для вимірювань використали хвилі з частотами $f = 1; 3$ і 6 MHz, а для їх збудження та приймання – п'єзокераміку, яка працювала на резонансній

частоті. Швидкість поширення ПАХ визначали, вимірюючи час проходження сигналом послідовно відстані на поверхні зразка, що дорівнює базі вимірювань, та елементів перетворювача. Методика вимірювання полягала у знаходженні різниці часу проходження сигналу, коли перетворювач розміщений на досліджуваному зразку і на зразку порівняння. Тоді вона становить:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \left(t_0 + \frac{L}{V_e} \right) - \left(t_0 + \frac{L}{V} \right), \quad (1)$$

де t_1 і t_2 – затримка сигналу, коли перетворювач розміщений на зразку порівняння та досліджуваному зразку, відповідно; t_0 – затримка сигналу в елементах перетворювача; L – база вимірювань перетворювача; V_e і V – швидкість ПАХ у зразку порівняння та досліджуваному зразку, відповідно. Вимірявши Δt на основі відомих величин L та V_e , відповідно до виразу (1), знаходили швидкість ПАХ у досліджуваному зразку:

$$V = \frac{L \cdot V_e}{L - \Delta t \cdot V_e}. \quad (2)$$

Сталість бази вимірювань забезпечували перетворювачем, в якому збуджувальна та реєструвальна частини жорстко з'єднані між собою [21]. База вимірювання становила 60 mm. Основною характеристикою стану металу була залежність $\Delta V/V-f$, яка давала можливість реєструвати ефекти за товщиною поверхневого шару металу. За частоти 6 МГц досягали мінімальної товщини, до якої застосовували метод ПАХ.

Результати та їх обговорення. Вплив МІО та наводнювання на параметри НКС. На зразках після МІО отримали поверхневий шар з НКС завтовшки 150 μm та твердістю $H_\mu = 8$ GPa проти 2,5 GPa до обробки. За результатами рентгенівських досліджень виявили феритно-аустенітно-цементитну структуру, параметри якої наведені у табл. 1 (параметр елементарної комірки α -Fe a , відносна деформація кристалічної ґратки α -Fe ϵ , розмір зерна D , густина дислокацій ρ_d , масова частка вуглецю в аустенітній γ -фазі C та масова частка аустенітної γ -фази X). Зазначимо суттєву, близько половини складу (56%), частку аустенітної структури, що різко відрізняє її від стану досліджуваної феритно-перлітної сталі без оброблення та є позитивним чинником у забезпеченні високої пластичності НКС за високої міцності [22], а також зниженні абсорбції водню [23].

Таблиця 1. Структурні параметри поверхневої НКС після МІО сталі

Фаза	a , nm	ϵ	D , nm	ρ_d , cm^{-2}	C , %	X , %
α	0,28610	0,00839	20,4	$7,2 \cdot 10^{11}$	–	–
γ	0,36153	0,00762	23,2	$5,6 \cdot 10^{11}$	1,67	56

Електролітичне наводнювання зразків з поверхневою НКС спричинило низку істотних змін у структурі за всіх значень густини катодного струму i_c (табл. 2). Розмір зерна D зріс від ~ 20 до $\sim 90 \dots 100$ nm, водночас густина дислокацій ρ_d знизилась майже вдвічі. Зафіксували лише феритно-цементитну структуру без залишкового аустеніту. Очевидно, саме водень спричинив поліморфне $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, що узгоджується з відомими результатами [24] та буде предметом окремого дослідження.

Таблиця 2. Структурні параметри поверхневої НКС сталі після наводнювання за різної інтенсивності

i_c , mA/cm ²	a , nm	ϵ	D , nm	ρ_d , cm ⁻²
0,1	0,28589	0,00185	92,3	$3,5 \cdot 10^{10}$
1	0,28572	0,00165	103,3	$2,8 \cdot 10^{10}$
10	0,28598	0,00192	88,9	$3,8 \cdot 10^{10}$

Вплив наводнювання сталі на зміну швидкості ПАХ. Після наводнювання сталі за всіх досліджених режимів швидкість ПАХ зменшується (рис. 1). Оскільки ПАХ поширюється здебільшого в поверхневому шарі товщиною, рівною довжині хвилі, а довжина хвилі $\Lambda = V/f$, то частотна залежність швидкості дає змогу оцінити неоднорідний розподіл властивостей за глибиною в поверхневих шарах металу. Зменшення швидкості ПАХ $\Delta V/V$ зростає з підвищенням частоти f незалежно від інтенсивності наводнювання для всіх досліджених густин катодного струму. За максимального значення $f = 6$ МГц (відповідає найменшій застосованій довжині хвилі Λ) властиві мінімальні, з урахуванням знаку “-”, значення $\Delta V/V$: 0,47; 2,23 та 1,24% після наводнювання за $i_c = 0,1$; 1 і 10 mA/cm², відповідно. Це вказує на те, що максимальні зміни властивостей відбулись у приповерхневому шарі зразка. Зміни швидкості ПАХ у сталі залежно від інтенсивності наводнювання $\Delta V/V-i_c$ є немонотонними для всіх застосованих ПАХ з різними частотами (рис. 1). Найбільшу зміну $\Delta V/V$ зафіксували за наводнювання за $i_c = 1$ mA/cm². Зміна швидкості ПАХ за наводнювання може бути спричинена різними чинниками (виникненням дефектів, фазовими перетвореннями, змінами густини дислокацій та напруженого стану зразка тощо). Однак внаслідок впливу водню на сталь спостерігали лише зменшення швидкості ПАХ, а її чутливість до дії наводнювання різної інтенсивності дає можливість застосовувати поширення ПАХ як неруйнівний метод контролю концентрації водню в інженерній практиці [25]. Висока точність визначення є однією із особливостей таких досліджень, що дає змогу реєструвати незначні зміни швидкості [6, 7].

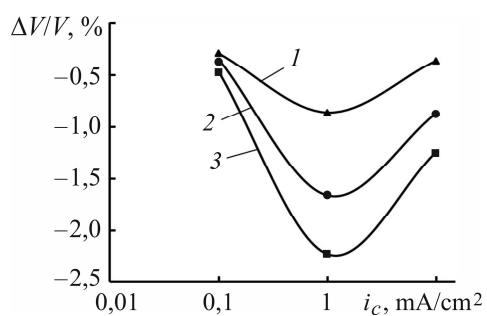


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Зміна швидкості ПАХ у сталі залежно від інтенсивності наводнювання ($i_c = 0,1$; 1 та 10 mA/cm²) та частоти: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 6 МГц.

Fig. 1. Change in the surface acoustic waves (SAW) velocity in the steel depending on the hydrogen charging intensity ($i_c = 0.1$, 1 and 10 mA/cm²) and frequency: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 6 МГц.

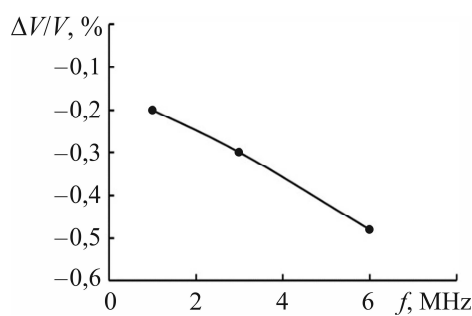


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Зміна швидкості ПАХ у сталі з НКС залежно від частоти.

Fig. 2. Change in the SAW velocity in the steel with nanocrystalline structure (NCS) depending on frequency.

Вплив поверхневого НКС шару сталі на зміну швидкості ПАХ. Швидкість поширення ПАХ $\Delta V/V$ для сталі з поверхневим НКС шаром зменшується порівняно з необробленою сталлю (рис. 2). Виявлено також зміну швидкості ПАХ від їх частоти f : що вища частота, то більша зміна $\Delta V/V$. Тобто поверхневому НКС шару властива менша швидкість поширення ПАХ порівняно з матричним матеріалом. Найбільшу зміну $\Delta V/V$ зафіксували для ПАХ $f = 6$ МГц, що дає підстави вважати, що найбільше зменшення швидкості ПАХ в приповерхневому НКС шарі зумовлено зміною його властивостей. Товщина шару НКС тут становить 0,15 мм, тому хвилі, які проникають на глибину 0,5...3 мм, що відповідає частоті 6...1 МГц, лише частково захоплюватимуть цей шар. Відповідно зменшення відносного внеску цього шару зі збільшенням довжини хвилі спричиняє дисперсію швидкості ПАХ, яку спостерігаємо на рис. 2.

Вплив наводнювання сталі з поверхневим НКС шаром на зміну швидкості ПАХ. Результати вимірювання швидкості ПАХ у електролітично наводненій за різними режимами сталі з поверхневою НКС, сформованою МІО, істотно відрізнялися від отриманих для сталі без обробки (рис. 3). Слід відзначити, що для зразків після наводнювання з найвищою інтенсивністю ($i_c = 10$ мА/см²) отримали обмежені дані через значне загасання ПАХ за частоти 6 МГц, що не дало змоги реалізувати вимірювання з ПАХ цієї частоти.

За густини струму 0,1 мА/см² зміна швидкості ПАХ для сталі без обробки є більшою порівняно з її значенням для сталі з НКС, а за $i_c = 10$ мА/см² спостерігали протилежну залежність.

Для сталі з поверхневим НКС шаром виявлено зменшення швидкості ПАХ після наводнювання з різною інтенсивністю: незначне за $i_c = 0,1$ мА/см² та суттєве за $i_c = 1$ та 10 мА/см², в останньому зміна $\Delta V/V$ найбільша (–2,5% для ПАХ з частотою 3 МГц, крива 1 на рис. 3а). Для хвиль з $f = 3$ МГц зафіксували монотонне зростання значення $\Delta V/V$ зі збільшенням інтенсивності наводнювання (рис. 3), чого не спостерігали для сталі без НКС (рис. 1, крива 2). Зміна швидкості ПАХ у сталі з поверхневою НКС зростає з підвищенням частоти (рис. 3а, с) за винятком наводнювання за $i_c = 1$ мА/см² (рис. 3б), що, можливо, пов'язано зі зміною розміру зерна D у НКС після наводнювання, максимальною для $i_c = 1$ мА/см² (див. табл. 2).

Найменші зміни швидкості ПАХ зафіксували для режиму наводнювання за $i_c = 0,1$ мА/см² за всіх досліджених частот ПАХ (рис. 3а), що вказує на незначний вплив наводнювання на зміну властивостей поверхневого НКС шару. Оскільки товщина шару, в якому поширюється ПАХ, становить 0,5 мм для $f = 6$ МГц, а товщина шару НКС – 0,15 мм, то на швидкість впливає НКС шар і нижній шар сталі завтовшки 0,35 мм. Тобто інтегральна зміна властивостей у цих двох шарах при наводнюванні за густини струму 0,1 мА/см² упродовж 100 h є меншою порівняно зі зміною властивостей у сталі без обробки (–0,18 та –0,47%, відповідно). Для ПАХ з частотою 3 та 1 МГц товщина шару, в якому вони поширюються, є ще більшою (1 та 3 мм, відповідно), тому для цих шарів спостерігаємо менший вплив наводнювання на сталь з НКС шаром порівняно з необробленою. Це може свідчити про менше проникнення водню у метал завдяки НКС шару. Крім того, спостерігали дисперсію зміни швидкості ПАХ за наводнювання сталі без обробки (рис. 1). Зміна швидкості $\Delta V/V$ при цьому для хвиль різних частот є в діапазоні від –0,47% для $f = 6$ МГц до –0,29% для $f = 1$ МГц, тобто різниця становить 0,18%. Для сталі з НКС ця величина становить 0,06%, тобто залежність від частоти зміни швидкості ПАХ є суттєво меншою. Таким чином, слабша зміна швидкості ПАХ, а також нижча дисперсія швидкості для сталі з поверхневим НКС шаром, свідчать про його бар'єрні властивості для проникнення водню у глибину матричного матеріалу, що узгоджуються з висновками праці [1].

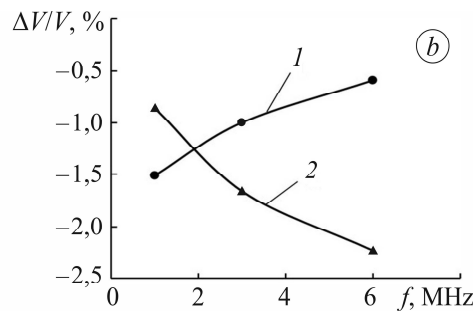
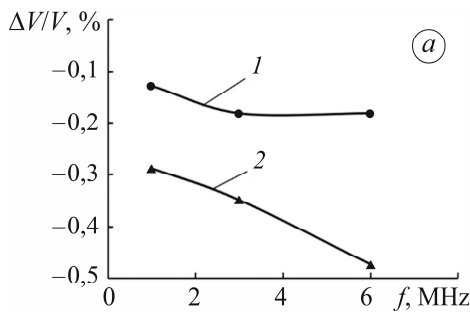
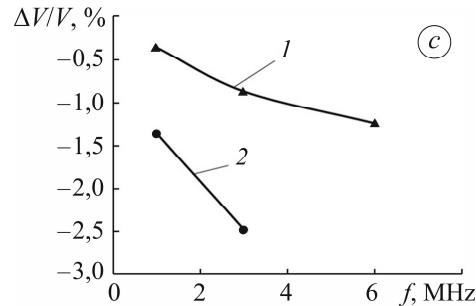


Рис. 3. Зміна швидкості ПАХ у сталі з НКС шаром (1) та без нього (2) залежно від частоти та інтенсивності наводнювання: $i_c = 0,1$ (a), 1 (b) та 10 mA/cm^2 (c).

Fig. 3. Change in the surface SAW velocity in the steel with NCS layer (1) and without it (2) depending on frequency and the hydrogen charging intensity: $i_c = 0.1$ (a), 1 (b) and 10 mA/cm^2 (c).



Характер зміни швидкості ПАХ після наводнювання сталі з поверхневим НКС шаром є складним, що, очевидно, пов'язано з реалізацією кількох механізмів, які до цього призводять. Можна допустити, що за найвищої інтенсивності наводнювання сталі з поверхневим НКС шаром необхідно також враховувати розвиток воднем пошкодженості, яка впливає на ПАХ. Швидкість ПАХ здебільшого визначає швидкість зсувної об'ємної хвилі, для якої використовують залежність $V_s = \sqrt{G/\rho}$ [6], де G – модуль зсуву, ρ – густина матеріалу. Таким чином, зміну швидкості ПАХ після наводнювання сталі можна пов'язати зі зміною характеристик G і ρ . Модуль зсуву сталі залежить від низки фізико-механічних чинників [6, 7]: розміру зерен, густини дислокацій, дефектності, механічного напруження, фазових перетворень, текстури тощо. З іншого боку, окрім показників структури та НКС, на модуль зсуву діє також наводнювання, внаслідок якого він може як зростати [26, 27], так і знижуватися [28]. Серед перелічених чинників спробуємо виділити роль розвитку пошкодженості у зміні модуля зсуву. Тут необхідно, насамперед, визначити, чи пошкодженість розглядати як чинник впливу на параметр G , чи податливість. Цілком імовірно, що пошкодженість є одним із чинників, який формально впливає на модуль зсуву. Звідси за інтегрального оцінювання дії різних чинників на швидкість ПАХ не важливо, чи зміна цього показника зумовлена фізичними змінами в структурі металу (для прикладу, в результаті поліморфних перетворень), чи розвитком пошкодженості. Тут основним обґрунтуванням є відома інтенсифікація воднем мікророзтріскування сталей [11]. Слід також зазначити, що НКС зазвичай є бар'єром для проникнення водню у матричний матеріал [1, 29–31], що зумовлено нижчим коефіцієнтом дифузії водню у НКС та її вищою здатністю до його пасткування.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що електролітичне наводнювання сталі з поверхневою НКС, сформованою МІО на сталі 40Х, спричинило зміни у її структурі: феритно-аустенітно-цементитна стала феритно-цементитною, збільшився розмір зерна (найбільше за $i_c = 1 \text{ mA/cm}^2$) та знизилася густина дислокацій. Використано залежність швидкості ПАХ $\Delta V/V$ від частоти хвиль f в діапазоні 1...6 МГц як основну

характеристику стану металу для оцінки розподілу властивостей по товщині поверхневого шару сталі. Виявлено зменшення швидкості ПАХ ($-0,35\ldots-2,25\%$) у приповерхневих шарах сталі після наводнювання, найбільше – для $f = 6$ МГц, що свідчить про максимальну локалізацію у них зміни стану металу. Характер зміни швидкості ПАХ від інтенсивності наводнювання сталі є немонотонним з максимальним її зменшенням за густини катодного струму 1 mA/cm^2 . Сталі з поверхневою НКС властива менша на $0,2\ldots0,48\%$ швидкість поширення ПАХ з частотами $1\ldots6$ МГц порівняно з матричним матеріалом. Її наводнювання також спричиняє зниження швидкості ПАХ, яка має складну залежність від інтенсивності наводнювання та частоти ПАХ. За найвищої інтенсивності (10 mA/cm^2) отримали обмежені дані через загасання ПАХ за частоти 6 МГц, а для хвиль з $f = 3$ МГц зафіксували монотонне зменшення їх швидкості зі збільшенням i_c , чого не спостерігали для сталі без НКС. Виявлено незначне зниження швидкості ПАХ та відносне зменшення її дисперсійної залежності за всіх досліджених частот ПАХ для сталі з поверхневим НКС шаром після наводнювання за $i_c = 0,1 \text{ mA/cm}^2$, що вказує на його бар'єрні властивості для проникнення водню у глибину матричного матеріалу.

1. *Influence of hydrogen on the mechanical properties of steels with the surface nanostructure* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, and O. Maksymiv // *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies*. – Cham: Springer Proceedings in Physics, 2015. – **167**. – P. 457–465. DOI: 10.1007/978-3-319-18543-9_32
2. *Microstructure evolution of the carbon steels during surface severe plastic deformation* / M. O. Vasylyev, B. N. Mordiyuk, S. M. Voloshko, and D. A. Lesyk // *Progress in Physics of Metals*. – 2021. – **22**, № 4. – P. 562–618. DOI: 10.15407/ufm.22.04.562
3. *Kyryliv V. I., Zakiev V. I., and Maksymiv O. V.* Change of the modulus of elasticity of the surface nonasructured layer on U8 steel // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 795–800. DOI: 10.1007/s11003-023-00732-z
4. *The wear resistance during oscillating friction of steel specimens with strengthened nanocrystalline layers* / I. Hurey, V. Gurey, T. Hurey, M. Bartoszuk, and W. Wojtowicz // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2024. – P. 265–275. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_24
5. *Influence of process liquids on the formation of strengthened nanocrystalline structures in surface layers of steel parts during thermo-deformation treatment* / I. Hurey, A. Augousti, P. Maruschak, A. Flowers, V. Gurey, V. Dzyura, and O. Prentkovskis // *Appl. Sci.* – 2024. – **14**. – Article number 8053. DOI: 10.3390/app14178053
6. *Acoustic surface waves* / Ed. by A. A. Oliner. – Berlin: Springer Verlag, 1978. – 342 p.
7. *Schneider D. A.* LAwave® – A nondestructive device for testing thin films, coatings and material surfaces by laser induced surface acoustic waves. – 2013. – P. 1–9. DOI: 10.13140/2.1.4564.7047
8. *Mokryy O. and Tsyurulnyk O.* Technique for measuring spatial distribution of the surface acoustic wave velocity in metals // *Arch. Acoust.* – 2016. – **41**, № 4. – P. 741–746. DOI: 10.1515/aoa-2016-0071
9. *The use of surface acoustic waves to evaluate of the near-surface layers of metal processed shot peening* / V. Skalskyi, M. Student, O. Mokryy, W. Dudda, Y. Kharchenko, H. Chumalo, and V. Hvozdettskyi // *Diagnostyka*. – 2021. – **22**, № 3. – P. 51–57. DOI: 10.29354/diag/141232
10. *Estimation of characteristics of nanocrystalline layer using the surface acoustic waves* / V. R. Skalskyi, O. M. Mokryi, O. I. Zvirko, V. I. Kyryliv, I. M. Romanyshyn, and O. V. Maksymiv // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 2. – P. 180–185. DOI: 10.1007/s11003-024-00760-3
11. *Martin M. L. and Sofronis P.* Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review // *J. Nat. Gas Eng.* – 2022. – **101**. – Article number 104547. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104547
12. *Experimental study of hydrogen embrittlement on AISI 304 stainless steels and Rayleigh wave characterization* / C. Ye, W. Kan, Y. Li, and H. Pan // *Eng. Fail. Anal.* – 2013. – **34**. – P. 228–234. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.021

13. *Lunarska E. and Fiore N. F.* Surface acoustic wave studies of hydrogen entry into a Ni-base alloy // *J. Appl. Phys.* – 1981. – **52**, № 4. – P. 2587–2592. DOI: 10.1063/1.329066
14. *Birring A. S., Bartlett M. L., and Kawano K.* Ultrasonic detection of hydrogen attack in steels // *Corrosion.* – 1989. – **45**, № 3. – P. 259–263. DOI: 10.5006/1.3577852
15. *Influence of occluded hydrogen on magnetoacoustic emission of low-carbon steels / V. Skalskyi, Z. Nazarchuk, O. Stankevych, and B. Klym // Int. J. Hydrogen Energy.* – 2023. – **48**, № 15. – P. 6146–6156. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.139
16. *Comparative study of linear and nonlinear ultrasound applied to the detection of hydrogen damage in 7N01 aluminum alloy / S. Qin, B. Chen, F. Qiu, and G. Gou // Phys. Scr.* – 2024. – **99**, № 6. – Article number 065943. DOI: 10.1088/1402-4896/ad418c
17. *Patent No 4890496.* Method and means for detection of hydrogen attack by ultrasonic wave velocity measurement / A. S. Birring, D. G. Alcazar, G. J. Hendrix, and J. J. Hanley. – Date June 2, 1990.
18. *Krous W. and Nolze G.* Powder Cell – A Program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns // *J. Appl. Cryst.* – 1996. – **29**. – P. 301–303. DOI: 10.1107/S0021889895014920
19. *Powder Diffraction File Search Manual: Alphabetical Listing and Search Section of Frequently Encountered Phases.* – Philadelphia: JCPDS, 1974. – 839 p.
20. *On the estimation of the diffusion coefficient and distribution of hydrogen in stainless steel / M. Duportal, A. Oudriss, X. Feaugas, and C. Savall // Scr. Mater.* – 2020. – **186**. – P. 282–286. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.05.040
21. *Johnson C. and Thompson R. B.* The spatial resolution of Raileigh wave, acoustoelastic measurement of stress // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation / Ed. by D. O. Thompson, and D. E. Chimenti.* – Boston: Springer, 1993. – P. 2121–2128. DOI: 10.1007/978-1-4615-2848-7_272
22. *Kumar A. and Singh A.* Mechanical properties of nanostructured bainitic steels // *Materialia.* – 2021. – **15**. – Article number 101034. DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101034
23. *Szost B. A., Vegter R. H., and Rivera-Díaz-del-Castillo P. E. J.* Hydrogen-trapping mechanisms in nanostructured steels // *Metall. Mater. Trans.* – 2013. – **A 44**. – P. 4542–4550. DOI: 10.1007/s11661-013-1795-7
24. *Shyvaniuk V. M., Mine Y., and Teus S. M.* Phase transformation and grain refinement in hydrogenated metastable austenitic steel // *Scr. Mater.* – 2012. – **67**, № 12. – P. 979–982. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.09.001
25. *Порівняння застосовності різних методів неруйнівного контролю для оцінювання концентрації водню у вуглецевій сталі / I. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, О. М. Мокрий, В. М. Учанин, О. Т. Цирульник, О. І. Звірко, Р. Л. Лешак // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2024. – **60**, № 3. – С. 77–82.
26. *Sofronis P. and Birnbaum H. K.* Mechanics of the hydrogen-dislocation-impurity interactions – I. Increasing shear modulus // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1995. – **43**, № 1. – P. 49–90. DOI: 10.1016/0022-5096(94)00056-B
27. *Katz Y., Tymiak N., and Gerberich W. W.* Nanomechanical probes as new approaches to hydrogen/deformation interaction studies // *Eng. Fract. Mech.* – 2001. – **68**, № 6. – P. 619–646. DOI: 10.1016/S0013-7944(00)00119-3
28. *Effect of hydrogen on electronic structure of fcc iron in relation to hydrogen embrittlement of austenitic steels / S. M. Teus, V. N. Shivanyuk, B. D. Shanina, and V. G. Gavriljuk // Phys. Status Solidi (A).* – 2007. – **204**, № 12. – P. 4249–4258. DOI: 10.1002/pssa.200723249
29. *Hydrogen depth profiles and microhardness of electrochemically hydrogen-charged nanostructured bainitic steels / O. Kazum, M. Ionescu, H. Beladi, and M. B. Kannan // Int. J. Hydrogen Energy.* – 2019. – **44**, № 26. – P. 14064–14069. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.172
30. *Peet M. J. and Hojo T.* Hydrogen susceptibility of nanostructured bainitic steels // *Metall. Mater. Trans. A.* – 2016. – **47**. – P. 718–725. DOI: 10.1007/s11661-015-3221-9
31. *Mitigating hydrogen embrittlement via film-like retained austenite in 2 GPa direct-quenched and partitioned martensitic steels / S. Pallaspuuro, E. Fangnon, S. A. Aravindh, L. Claeys, R. Latypova, Y. Yagodinsky, N. Aho, P. Kantanen, S. Uusikallio, T. Depover, M. Huttula, P. Dey, and J. Kömi // Mater. Sci. Eng. A.* – 2024. – **908**. – Article number 146872. DOI: 10.1016/j.msea.2024.146872

Одержано 16.07.2024