

PACS numbers: 61.72.Hh, 81.20.Wk, 81.40.Np, 81.65.Kn, 81.65.Ps, 82.45.Bb, 88.30.Nn

Вплив попереднього наводнювання на термодифузійне хромовання та кавітаційну стійкість вуглецевих криць і сірого чавуну

М. С. Стечишин, М. Є. Скиба, Н. С. Машовець, В. С. Курскої,
М. І. Цепенюк*

*Хмельницький національний університет,
вул. Інститутська, 11,
29016 Хмельницький, Україна*

**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56,
46001 Тернопіль, Україна*

Запропоновано спосіб термодифузійного хромовання в порошках, який включає попереднє електролітичне наводнювання за катодної поляризації у 26%-розчині сірчаної кислоти. Наведені в роботі дані результатів переконливо свідчать про ефективність наводнювання для збільшення товщини карбідної зони вуглецевих криць і чавунів. Попереднє наводнювання дало змогу значно збільшити товщину карбідної зони дифузійного шару. Аналіза одержаних залежностей показала, що найбільш інтенсивне зростання карбідного шару спостерігається за густини струму анодної поляризації для вуглецевих криць $i = 1\text{--}3 \text{ мА/мм}^2$, а для чавуну $i = 0,5\text{--}2,0 \text{ мА/мм}^2$. Так, товщина карбідної зони на вуглецевих крицях 20 і 45 збільшилася приблизно в 3 рази, а на чавуні — в 1,4 рази. Було проведено оптимізацію з метою знаходження оптимальних умов наводнювання для одержання максимальної товщини карбідної зони хромованого шару, що

Corresponding author: Myroslav Stepanovych Stechyshyn
E-mail: miro011951@gmail.com

*Khmelnyskyi National University,
11 Instytuts'ka Str., UA-29016, Khmelnytskyi, Ukraine*
**Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56 Ruska Str., UA-46001, Ternopil, Ukraine*

Citation: M. S. Stechyshyn, M. Ye. Skyba, N. S. Mashovets', V. S. Kurskoy, and M. I. Tsepenyuk, The Effect of Pre-Hydrogenation on Thermomdiffusion Chromizing and Cavitation Resistance of Carbon Steels and Gray Cast Iron, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 12: 1173–1183 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.12.1173](https://doi.org/10.15407/mfint.46.12.1173)

визначає кавітаційно-ерозійну стійкість криць у технологічних розчинах харчових виробництв, зокрема у розчинах кухонної солі. Воднораз, кавітаційно-ерозійна стійкість (за втратами маси за 3 год випробувань на магнетострикційному вібраторі) в 3%-розчині NaCl підвищується для криці 45 в 10 разів, для криці 20 в 12 разів порівняно з нормалізованими, а для чавуну СЧ20 в 3,6 рази порівняно із звичайним хромуванням і в 25 разів порівняно із його стійкістю в стані поставки.

Ключові слова: карбідний шар наводнювання, катодна поляризація, термодифузійне хромування, кавітація.

A method for thermal-diffusion chromizing in powders is proposed, which includes preliminary electrolytic hydrogenation under cathodic polarization in a 26%-sulfuric-acid solution. The results presented in the work convincingly demonstrate the effectiveness of hydrogenation for increasing the thickness of the carbide zone of critical steels and cast irons. Preliminary hydrogenation increases significantly the thickness of the carbide zone of the diffusion layer. Analysis of the obtained dependences shows that the most intense growth of the carbide layer occurs at the current density of anodic polarization: for carbonaceous cores, $i = 1-3 \text{ mA/mm}^2$, and for cast iron, $i = 0.5-2.0 \text{ mA/mm}^2$. Thus, the thickness of the carbide zone on carbonaceous steel 20 and 45 are increased by approximately 3 times, and on cast iron, by 1.4 times. Furthermore, optimization is conducted to find the optimal conditions for hydrogenation to achieve the maximum thickness of the carbide zone of the chromized layer, which determines the cavitation-erosion resistance of steels in technological solutions of food productions, particularly, in solutions of table salt. In this case, the cavitation-erosion resistance (based on weight loss over 3 hours of testing on a magnetostriction vibrator) in a 3%-NaCl solution is increased for steel 45 by 10 times, for steel 20, by 12 times compared to normalized ones, for cast iron SCh20, by 3.6 times compared to standard chromizing, and by 25 times compared to its resistance in the delivered state.

Key words: carbide-poor layer, hydrogenation, cathodic polarization, thermal-diffusion chromizing, cavitation.

(Отримано 8 березня 2024 р.; остаточн. варіант — 6 травня 2024 р.)

1. ВСТУП

На сьогодні під час вивчення процесів дифузії велику увагу приділяють ролі дислокацій [1–4]. Виявлено, що дифузія в напрямку крайових дислокацій має найнижчу енергію активації. Вплив дислокацій на пришвидшення процесу дифузії А. Н. Мінкевич [5] пояснює тим, що з підвищенням їхньої концентрації або переміщенням, підвищується густина вакансій і, крім того, в безпосередній близькості від дислокацій можливе також неперервне генерування нових дислокацій [6, 7].

Водночас, відомо, що в процесі наводнювання в поверхневих ша-

рах металів і стопів зростає густина вакансій, дислокацій та інших дефектів кристалічної будови, що зумовлює підвищення мікротвердості та появу залишкових напружень стиску в поверхневих шарах, які сягають 80–100 МПа [8]. Гідроген сприяє (в результаті високого тиску молекулярного Гідроґену у внутрішніх колекторах) утворенню пористості, появи локальних спотворень ґратниці, виникненню та розвитку тріщин, приводить до відновлення кристалів цементиту в зерні перліту (декарбонізація) [9–13], що також підвищує коефіцієнт дифузії Хрому. Крім того, під час наводнювання межі зерен металів потовщуються внаслідок дифузії S, Ar, Sb, які виділяються по межі зерен послаблюючи зчеплення їх, і таким чином, понижується енергія активації дифузії [14]. Потовщення меж зерен також має сприяти збільшенню коефіцієнта дифузії Хрому на межах γ -твердого розчину [13, 14].

З викладеного очевидно, що з проведенням перед хеміко-термічним обробленням (ХТО) наводнювання металів і стопів слід очікувати на інтенсифікацію процесу ХТО.

Для здійснення процесу наводнювання перед ХТО можна застосовувати різні способи. Найбільш часто використовують: 1) електролітичний спосіб за катодної поляризації в електролітах; 2) хемічний спосіб за дії кислих середовищ, а також розчинів, що містять сірководень; 3) наводнювання в жеврійному розряді. Перші два способи не вимагають спеціального обладнання, проводяться за кімнатної температури та без будь-яких істотних енерговитрат.

2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наводнювання вуглецевих криць 20, 45 і сірого чавуну СЧ20 проводили електролітичним способом за катодної поляризації в електроліті. В якості електроліту для зменшення часу наводнювання й енерговитрат використовували 26%-розчин сірчаної кислоти [15].

Катодне наводнювання проводили за допомогою спеціально сконструйованого джерела постійного струму з анодою з неіржавійної пластини (за наводнювання невеликих зразків застосовували допоміжну платинову аноду стандартної електрохімічної комірки).

Згідно з [16], найвища наводнюваність вуглецевих криць спостерігається після нормалізації за густини струму до 5 мА/мм². Враховуючи, що за менших густин струму поляризації розподіл Гідроґену по глибині стає більш рівномірним, наводнювання нормалізованих зразків проводили за густини струму $i = 0,5\text{--}3,5$ мА/мм² в 26%-розчині сірчаної кислоти, що забезпечує мінімальний, у порівнянні з іншими реактивами, час наводнювання [16].

За даними [10, 17] під час електролітичного наводнювання протягом 1 години мікротвердість криць різко зростає, потім стабілізується та надалі зменшується. Ймовірно, на початковому етапі дося-

гається максимальна густина дислокацій і вакансій (за 1 годину наводнювання), а зменшення мікротвердості зумовлено досягненням тиском моленізованого в колекторах водню величин, які перевищують межу міцності поверхневого шару, що приводить до утворення мікротріщин, пор і, як наслідок, викликає його знеміцнення. Будучи стоками дислокацій, мікротріщини й пори викликають зменшення густини дислокацій і вакансій, що приводить до зменшення коефіцієнта дифузії. Тому максимальний час наводнювання не має перевищувати часу досягнення максимальної мікротвердості, тобто 1 годину.

Для підвищення зносостійкості деталей обладнання різних галузей машинобудування, зокрема підвищення корозійно-механічної зносостійкості (КМЗ) деталей машин і апаратів харчової промисловості, широко застосовують хеміко-термічне оброблення: термодифузійне хромування в порошках у негерметичних контейнерах, азотування в жеврійному розряді, вакуумно-плазмову технологію, електролітичне хромування та цементацію тощо [13, 14].

Спосіб хромування в порошках є найпростішим, не вимагає спеціального обладнання, може бути здійсненим в умовах ремонтних майстерень підприємств харчової промисловості й тому був досліджений у цій роботі.

Хромувальна суміш складалася з 50% ферохрому зернистістю в 1–1,5 мкм, 43% оксиду Алюмінію та 7% хлориду амонію. Перед застосуванням хлорид амонію просушували за температури у 403–423 К протягом 2 годин і розтирали в порошок.

Порошок оксиду Алюмінію та ферохрому прожарювали за температури у 1373 К протягом 4 годин в контейнері для хромування. Термодифузійне хромування проводили за температур у 1373 К для криць і 1323 К для чавуну тривалістю 6 годин [18, 19].

Кавітаційно-ерозійна зносостійкість металів досліджувалася на установці з магнетострикційним вібратором (МСВ). Установка складається з ультразвукового генератора УЗДН-А потужністю у 150 Вт, частотою коливачь у 22 кГц і амплітудою коливачь концентратора у 5–85 мкм [18]. Розроблена методика проведення кавітаційно-ерозійних випробувань з двоконтурною системою охолодження робочих середовищ уможливає одержувати в лабораторних умовах результати більш наближені до характеристик зносостійкості в умовах експлуатації. Встановлення двоконтурної системи охолодження дало змогу, як показали проведені випробування [20–22], уникнути впливу температурного чинника руйнування на інтенсивність зношування поверхонь зразків.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 1 показано вплив попереднього наводнювання криць

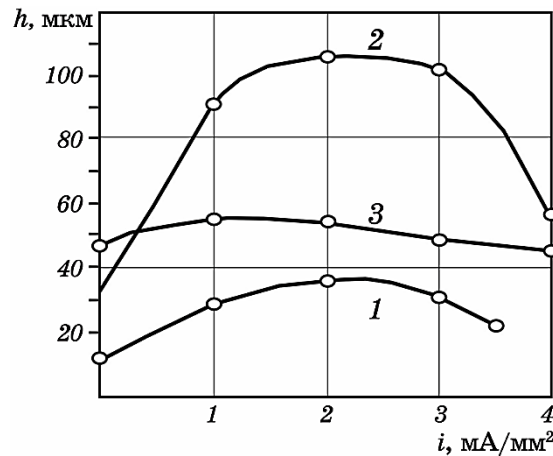


Рис. 1. Вплив густини струму катодної поляризації i на товщину h карбідної зони хромованих криць 20 (1), 45 (2) та сірого чавуну СЧ20 (3).

Fig. 1. The influence of the current density of the cathodic polarization i on the thickness h of the carbide zone of chrome-plated steels 20 (1), 45 (2) and grey cast iron СЧ20 (3).

20, 45 та чавуну СЧ20 на товщину карбідної зони хромованого шару в залежності від густини струму поляризації. Наводнювання проводили катодною поляризацією з платиною анодом протягом 20 хв для вуглецевих криць і 30 хв для чавуну. Хромування здійснювали за режимами, наведеними вище.

Попереднє наводнювання дало змогу значно (в 2 рази для криці 20, в 3 рази для криці 45 і в 1,4 рази для чавуну) збільшити товщину карбідної зони дифузійного шару. Аналіза одержаних залежностей показує (рис. 1), що найбільш інтенсивне зростання дифузійного шару спостерігається за густини струму анодної поляризації для вуглецевих криць $i = 1-3$ мА/мм², а для чавуну $i = 0,5-2,0$ мА/мм².

Оптимізація режимів інтенсивного хромування криць. Мета оптимізації — знаходження оптимальних умов наводнювання для одержання максимальної товщини карбідної зони хромованого шару, що визначає кавітаційно-ерозійну стійкість криць у технологічних розчинах харчових виробництв, зокрема у розчинах кухонної солі.

Оптимізація проводилася з використанням методу Бокса-Вілсон [23, 24]. Як параметер оптимізації y обрано товщину карбідної зони хромованого шару. Варіювали фактори: x_1 — густину струму катодної поляризації (мА/мм²); x_2 — час наводнювання (хв).

У припущенні, що у вибраній області серії дослідів лінійний модель виявиться адекватним прийнято дворівневий ортогональний і ротатабельний план, який задовольняє факторний експеримент типу 2^2 .

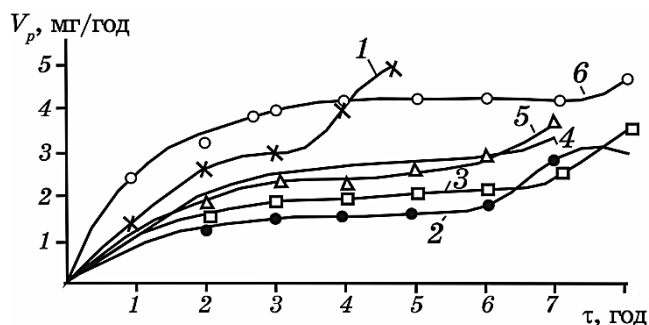


Рис. 2. Залежність швидкості руйнування від часу випробування покриттів з різною товщиною карбідної зони хромованого шару криці 45 [мкм]: 35 (1); 91 (2); 114 (3); 123,5 (4); 203,5 (6).

Fig. 2. Dependence of the rate of destruction on the test time for coatings with different thicknesses of the carbide zone of the chromium layer of the steel 45 [μm]: 35 (1); 91 (2); 114 (3); 123.5 (4); 203.5 (6).

Після реалізації повного факторного експерименту одержано такі рівняння регресії:

$$y = 32,75 + 2,00x_1 + 2,75x_2 \text{ (криця 20);} \quad (1)$$

$$y = 176,5 + 5,0x_1 + 8,5x_2 \text{ (криця 45).} \quad (2)$$

Аналіза одержаних рівнянь (1), (2) показує, що глибина карбідної зони хромованого шару більшою мірою визначається часом наводнювання, ніж густиною струму катодної поляризації.

На рисунку 2 показано залежності швидкості кавітаційно-ерозійного руйнування від часу проведення випробувань покриттів у 3%-розчині хлориду Натрію із різною товщиною карбідної зони хромованого шару криці 45.

Як впливає з рис. 2, зразок 6 має найліпші показники довговічності, але зразок 3 майже не поступається йому і, разом з тим, він має значно меншу швидкість руйнування карбідного шару. Тут і далі під довговічністю зміцненого хромування шару розуміємо час від початку випробувань до моменту різкого зростання швидкості його руйнування.

Оптимізація режимів інтенсивного хромування сірого чавуну. Рівні факторів та інтервали варіювання їх визначено на підставі літературних даних [9, 14] та апіорних даних, одержаних у результаті попередніх досліджень.

Після реалізації повного факторного експерименту одержано наступне рівняння регресії:

$$y = 51,15 + 1,2x_1 + 2,7x_2 \text{ (СЧ20).} \quad (3)$$

Після застосування методу крутого сходження по градієнту знайдено режими наводнювання, що забезпечують максимальні значення товщини карбідної зони хромованого шару на чавуні СЧ20.

Аналіза одержаних даних показує, що з наводнюванням упродовж 60 хв шар виходить дещо більшим; проте він є й більш нерівномірним по довжині шліфу. Виходячи з цих міркувань, як оптимальний обрано наступний режим: $i = 1,5 \text{ мА/мм}^2$, $\tau = 45 \text{ хв}$, що забезпечує збільшення карбідної зони СЧ18 в 1,4 рази порівняно з відомим способом.

Наведені в табл. 1 дані переконливо свідчать про ефективність попереднього наводнювання для збільшення товщини карбідної зони вуглецевих криць і чавунів. Так, товщина карбідної зони на вуглецевих крицях 20 і 45 збільшилася приблизно в 2,5–3 рази, а на чавуні — в 1,4 рази.

Водночас, кавітаційно-ерозійна стійкість (за втратами маси за 3 години випробувань на МСВ) у розчинах NaCl підвищується для криці 45 в 10 разів, а для криці 20 — в 12 разів у порівнянні з нормалізованими зразками [25].

Хромування сірого чавуну СЧ20 за розробленим способом у 1,4 рази збільшує його довговічність (рис. 3), а кавітаційна стійкість, визначена за втратами маси за 3 години випробувань на МСВ у 3%-розчині NaCl, підвищується у 3,6 рази порівняно зі звичайним хромуванням і в 25 разів порівняно зі зносостійкістю чавуну в стані

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив електролітичного наводнювання на товщину карбідної зони під час хромування (температура хромування криць — 1373 К, чавунів — 1323 К, час хромування — 6 год).

TABLE 1. The effect of electrolytic hydrogenation on the thickness of the carbide zone during chrome plating (chroming temperature of steels—1373 K, cast irons—1323 K, chrome plating time—6 h).

Матеріал	Режим наводнювання		Товщина карбідної зони, мкм
	густина струму i , мА/мм ²	час, хв	
Криця 45	1	20	91
	3	20	114
	—	—	35
Криця 20	1	20	28,5
	3	20	31,5
	—	—	12
СЧ20	1	30	55
	2,5	30	52
	—	—	38

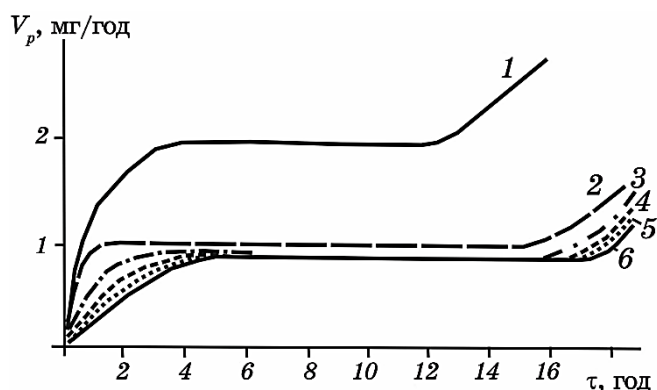


Рис. 3. Кінетика швидкості руйнування від часу випробувань покриттів на СЧ20 з різною товщиною карбідної зони [мкм]: 38 (1); 47,7 (2); 49,2 (3); 52,2 (4); 55,5 (5); 56,6 (6).

Fig. 3. Kinetics of the rate of destruction from the time of coating tests on SЧ20 with different thickness of the carbide zone [μm]: 38 (1); 47.7 (2); 49.2 (3); 52.2 (4); 55.5 (5); 56.6 (6).

поставки [18].

4. ВИСНОВКИ

1. Розроблено спосіб інтенсифікації дифузійних процесів під час ХТО металів і стопів, що включає попереднє наводнювання їх перед ХТО електролітичним способом.

2. Показано, що застосування попереднього наводнювання електролітичним способом дає змогу збільшити товщину карбідної зони хромованого шару на вуглецевих крицях приблизно в 3 рази, а на сірих чавунах — в 1,4 рази, що уможлиблює підвищити кавітаційну стійкість металів у розчинах кухонної солі в 2–5 разів.

3. Застосування методів математичної статистики й активного планування експерименту уможливило знайти оптимальні режими наводнювання, що забезпечують збільшення товщини карбідної зони хромованого шару на вуглецевих крицях і сірих чавунах в 1,4–6 разів і, відповідно, підвищити їхню кавітаційно-ерозійну стійкість у розчинах хлориду Натрію від 10 до 25 разів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. Z. Bokstein, *Diffusion Processes, Structure, and Properties of Metals*: (Springer US: 2013).
2. М. А. Криштал, *Механизм диффузии в железных сплавах* (Москва: Маши-

- ностроение: 1972).
3. P. Anderson, J. Hirth, and J. Lothe, *Theory of Dislocations* (Cambridge University Press: 2017).
 4. I. K. Pokhodnya, V. I. Shvachko, and S. V. Utkin, *Mater. Sci.*, **38**: 1 (2002).
 5. А. Н. Минкевич, *Химико-термическая обработка металлов и сплавов* (Москва: Машиностроение: 1965).
 6. О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко, *Металознавство* (Київ: Політехніка: 2002).
 7. Haessner Riederer, *Recrystallization of Metallic Materials* (Frank-Verlag: 1978).
 8. M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, M. M. Student, V. P. Oleksandrenko, and M. V. Luk'yanyuk, *Mater. Sci.*, **54**: 395 (2018).
 9. M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, Y. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, and N. M. Stechyshyna, *Mater. Sci.*, **53**: 343 (2017).
 10. Г. В. Карпенко, Р. И. Крипякевич, *Влияние водорода на свойства стали* (Москва: Металлургиздат: 1962).
 11. V. I. Pokhmurs'kyi and K. B. Vasyliy, *Mater. Sci.*, **48**: 125 (2012).
 12. В. І. Похмурський, В. В. Федоров, *Вплив водню на дифузійні процеси в металах* (Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України: 1998).
 13. В. Ф. Лоскутов, В. Г. Хижняк, Ю. А. Куницкий, М. В. Киндрачук, *Диффузионные карбидные покрытия* (Київ: Техніка: 1991).
 14. S. Rudenki, M. Kartsev, A. Korneev, A. Kunchenko, Y. Kunchenko, V. Marinin, V. Kovalenko, M. Bortnytska, T. Ryzhova, I. Lyashenko, and L. Martynenko, *Science and Innovation*, **18**, No. 2: 66 (2022).
 15. И. М. Пастух, Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде (Харьков: Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»: 2006).
 16. U. Hadam and T. Zakroczymski, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, Iss. 5: 2449 (2009).
 17. Г. В. Карпенко, *Вплив водню на механічні властивості сталі* (Київ: Вид-во АН УРСР: 1960).
 18. А. И. Некоз, М. С. Стечишин, Н. А. Сологуб, *Способ хромирования изделий из сталей и чугуна* [положит. решение ВНИИГПЭ от 13.07.1984 по заявке № 3529615/22-02(196217). А.С. СССР № 1277633].
 19. M. S. Stechishin, A. V. Martynyuk, and Y. M. Bilik, *Journal of Friction and Wear*, **39**, Iss. 6: 439 (2018).
 20. M. S. Stechishin, A. V. Martynyuk, V. P. Oleksandrenko, and Y. M. Bilyk, *Journal of Friction and Wear*, **40**, Iss. 5: 468 (2019).
 21. М. С. Стечишин, Н. М. Стечишина, А. В. Мартинюк, *Кавітаційно-ерозійна зносостійкість деталей обладнання молокозаводів* (Хмельницький: ХНУ: 2018).
 22. Н. М. Стечишина, М. С. Стечишин, Н. С. Машовець, *Корозійно-механічна зносостійкість деталей обладнання харчових виробництв* (Хмельницький: ХНУ: 2022).
 23. О. А. Гуменна, *Основи наукових досліджень* (Суми: СумДПУ ім. А. С. Макаренка: 2007).
 24. С. Е. Важинський, Т. І. Щербак, *Методика та організація наукових досліджень* (Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка: 2016).
 25. M. Stechyshyn, M. Macko, O. Dykha, S. Matiukh, and J. Musial, *Tribotechnology*

gies of Strengthening and Wear Modeling of Structural Materials (Bydgoszcz: Foundation of Mechatronics Development: 2023).

REFERENCES

1. S. Z. Bokshstein, *Diffusion Processes, Structure, and Properties of Metals*: (Springer US: 2013).
2. M. A. Krishtal, *Mekhanizm Diffuzii v Zheleznykh Splavakh* [Mechanism of Diffusion in Iron Alloys] (Moskva: Mashinostroenie: 1972) (in Russian).
3. P. Anderson, J. Hirth, and J. Lothe, *Theory of Dislocations* (Cambridge University Press: 2017).
4. I. K. Pokhodnya, V. I. Shvachko, and S. V. Utkin, *Mater. Sci.*, **38**: 1 (2002).
5. A. N. Minkevich, *Khimiko-Termicheskaya Obrabotka Metallov i Splavov* [Chemical-Thermal Treatment of Metals and Alloys] (Moskva: Mashinostroenie: 1965) (in Russian).
6. O. M. Byalik, V. S. Chernenko, V. M. Pysarenko, and Yu. N. Moskalenko, *Metalloznaustvo* [Metals Science] (Kyiv: Politekhnik: 2002) (in Ukrainian).
7. Haessner Riederer, *Recrystallization of Metallic Materials* (Frank-Verlag: 1978).
8. M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, M. M. Student, V. P. Oleksandrenko, and M. V. Luk'yanyuk, *Mater. Sci.*, **54**: 395 (2018).
9. M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, Y. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, and N. M. Stechyshyna, *Mater. Sci.*, **53**: 343 (2017).
10. H. V. Karpenko and R. Y. Kripyakevich, *Vliyanie Vodoroda na Svoystva Stali* [The Influence of Hydrogen on the Properties of Steel] (Moskva: Metallurgizdat: 1962) (in Russian).
11. V. I. Pokhmurs'kyi and K. B. Vasylyv, *Mater. Sci.*, **48**: 125 (2012).
12. V. I. Pokhmurskyi and V. V. Fedorov, *Vplyv Vodnyu na Dyfuziyni Protsesy v Metalakh* [Influence of Hydrogen on Diffusion Processes in Metals] (Lviv: Fiz.-Mekh. In-t im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy: 1998) (in Ukrainian).
13. V. F. Loskutov, V. G. Khizhnyak, Yu. A. Kunitskiy, and M. V. Kindrachuk, *Diffuzionnyye Karbidnyye Pokrytiya* [Diffusion Carbide Coatings] (Kyiv: Tekhnika: 1991) (in Russian).
14. S. Rudenki, M. Kartsev, A. Korneev, A. Kunchenko, Y. Kunchenko, V. Marinin, V. Kovalenko, M. Bortnytska, T. Ryzhova, I. Lyashenko, and L. Martynenko, *Science and Innovation*, **18**, No. 2: 66 (2022).
15. I. M. Pastukh, *Teoriya i Praktika Bezzodorodnogo Azotirovaniya v Tleyushchem Razryade* [Theory and Practice of Hydrogen-Free Nitriding in a Glow Discharge] (Kharkiv: Natsional'nyy Nauchnyy Tsentr «Khar'kovskiy Fiziko-Tekhnicheskiiy Institut: 2006) (in Russian).
16. U. Hadam and T. Zakroczymski, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, Iss. 5: 2449 (2009).
17. H. V. Karpenko, *Vplyv Vodnyu na Mekhanichni Vlastyvosti Stali* [The Influence of Hydrogen on the Mechanical Properties of Steel] (Kyiv: Vyd-vo AN URSR: 1960) (in Ukrainian).
18. A. Y. Nekoz, M. S. Stechyshyn, and N. A. Solohub, *Sposob Khromirovaniya Izdeliya iz Staley i Chuguna* [Method of Chromium Plating of Steel and Cast Iron Products] [Polozhitelnoe Reshenie VNIIGPE ot 13.07.1984 po Zayavke

- No. 3529615/22-02(196217). A.S. SSSR No. 1277633] (in Russian).
19. M. S. Stechishin, A. V. Martynyuk, and Y. M. Bilik, *Journal of Friction and Wear*, **39**, Iss. 6: 439 (2018).
 20. M. S. Stechishin, A. V. Martynyuk, V. P. Oleksandrenko, and Y. M. Bilyk, *Journal of Friction and Wear*, **40**, Iss. 5: 468 (2019).
 21. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, and A. V. Martyniuk, *Kavitatsiyno-Ehroziyna Znosostiykist' Detaley Obladnannya Molokozavodiv* [Cavitation–Erosion Wear Resistance of Equipment Parts of Dairies] (Khmelnyskyi: KhNU: 2018) (in Ukrainian).
 22. N. M. Stechyshyna, M. S. Stechyshyn, and N. S. Mashovets, *Koroziyno-Mekhanichna Znosostiykist' Detalei Obladnannya Kharchovykh Vyrobytstv* [Corrosion–Mechanical Wear Resistance of Food Production Equipment Parts] (Khmelnyskyi: KhNU: 2022) (in Ukrainian).
 23. O. A. Humenna, *Osnovy Naukovykh Doslidzhen'* [Basics of the Scientific Research] (Sumy: SumDPU im. A. S. Makarenka: 2007) (in Ukrainian).
 24. S. E. Vazhyns'kyi and T. I. Shcherbak, *Metodyka ta Organizatsiya Naukovykh Doslidzhen'* [Methodology and Organization of Scientific Research] (Sumy: SumDPU imeni A. S. Makarenka: 2016) (in Ukrainian).
 25. M. Stechyshyn, M. Macko, O. Dykha, S. Matiukh, and J. Musial, *Tribotechnologies of Strengthening and Wear Modeling of Structural Materials* (Bydgoszcz: Foundation of Mechatronics Development: 2023).