

УДК 622.245.002.4.

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО НАНОСТРУКТУРУВАННЯ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЧАВУННИХ ВАЛКІВ СШХН

О. В. МАКСИМІВ¹, В. І. КИРИЛІВ¹, Б. П. ЧАЙКОВСЬКИЙ²,
Я. Б. КИРИЛІВ³, Л. М. ГОРДІЙЧУК², І. Г. ЯРОШОВИЧ²

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

² Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
ім. С. З. Гжицького;

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Досліджено зносостійкість, втомну та корозійно-втомну міцність чавуну валків СШХН-42 з поверхневою наноструктурою, отриманою механоімпульсною обробкою, в умовах роботи валків вальцювальних станів. Показано, що поверхнева наноструктура підвищує зносостійкість чавуну в 3 рази порівняно із вихідним станом, а втомну міцність майже вдвічі. Наведено обґрунтування такої поведінки чавуну з поверхневою наноструктурою.

Ключові слова: валки вальцювальних станів, чавун СШХН-42, нанокристалічна структура, зносостійкість, втома, корозійна втома.

Вступ. Валки вальцювальних станів експлуатують в умовах одночасної дії охолоджувального водного середовища, абразиву (окалина), високих температур, ударних навантажень, а також змінних контактних і термомеханічних напружень [1, 2]. Такі умови роботи обумовлюють часто передчасну втрату роботоздатності валків, що пов'язано здебільшого з їх низьким опором зношуванню та появою поверхневих тріщин термовтоми та контактної втоми [2]. З іншого боку, для підвищення втомної міцності та зносостійкості важконавантажених деталей машин використовують поверхнєве легування з одночасною лазерною обробкою [3], формують дрібнодисперсні [4] та нанокристалічні структури (НКС) [5], зокрема, механоімпульсною обробкою (МІО) [6], яка використовує імпульсну енергію високошвидкісного тертя. Особливість цього методу полягає в одночасному поєднанні диспергування структури, поверхневого легування зі спеціальних технологічних середовищ (ТС) та структурно-фазових перетворень під час МІО. Раніше показано покращення втомних та корозійно-втомних характеристик поверхневих шарів сталей після МІО [7], в т. ч. валкової сталі [2].

У технологічних лініях вальцювання поряд зі сталями використовують чавуни, зокрема, для валків типу СШХН, але досліджень впливу поверхневих НКС на фізико-механічні властивості чавунів небагато [3, 8]. Мета роботи – дослідити вплив поверхневої наноструктури, отриманої МІО, на втомну міцність та зносостійкість чавуну вальцювальних валків СШХН-42 у робочих середовищах.

Методики досліджень. Як матеріал для дослідження вибрали чавун литих вальцювальних валків СШХН-42. Для валків типу СШХН використовують чавуни хімічного складу (mass%): 3...3,4% С, 1,45...1,8% Si, 0,45...0,65% Mn, 0,04...0,2% P, 0,004...0,01% S, 0,6...0,9% Cr, 0,7...1,3% Ni, 0,035...0,056% Mg [9]. Вони містять 9...25% карбідів, 0,5...2,5% кулястого графіту, діаметр графіту становить 45...180 одиниць за шкалою ШГД [9].

Контактна особа: О. В. МАКСИМІВ, e-mail: okyryliv@yahoo.com

Здійснювали МІО [10] на циліндричних зразках $\varnothing 20$ mm і довжиною 100 mm. Обробляли за таких параметрів: лінійна швидкість змцнювального інструменту зі сталі 40Х – 60 m/s, частота обертання зразків $0,33\text{ s}^{-1}$, повздовжнє подавання інструменту до зразка 1,2 mm/rev. Під час МІО використовували мінеральну оливу І-12А як охолоджувальне ТС із додаванням низькомолекулярного поліетилену [11]. Фазовий склад поверхні чавуну після змцнювальної обробки вивчали на дифрактометрі-дифрактографі ДРОН-3 у CuK_α -випромінюванні ($U = 30\text{ kV}$, $I = 20\text{ mA}$) з кроком $0,05^\circ$ та експозицією у точці 4 s. Обробляли дифрактограми, використовуючи програмне забезпечення CSD [12]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [13]. Залишкові напруження розраховували за методикою [14].

Визначали мікротвердість, зносостійкість та втомну міцність. Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g. Експерименти на втому виконували чистим згином циліндричних зразків $\varnothing 20$ mm та довжиною робочої частини 70 mm на машині ИМА-30 за частоти 50 Hz на повітрі та у 3% водному розчині NaCl. Зносостійкість досліджували за схемою кільце-вкладка на машині тертя МІ-1М за питомого навантаження 4,5 МПа та лінійної швидкості кільця 0,9 m/s в оливо-абразивному середовищі (олива ТАП-30 + 0,1 mass% абразиву). Діаметр змцненого кільця 40 mm і товщина 10 mm. Пари тертя перед випробуваннями припрацьовували за такої ж швидкості кільця та тиску $P_0 = 0,75\text{ МПа}$ упродовж 2 h. Як контртіло використовували вкладки зі сталі 45, які моделюють вальцювальний матеріал в умовах абразивного зношування. Розподіл легувальних елементів у поверхневому шарі визначали спектральним аналізом на спектрометрі SMI 300.

Обговорення результатів. Мікроструктура валків СШХН складається із перлітної матриці, евтектичного цементиту і графітних включень кулястої форми. Карбідна фаза у них знаходиться переважно у перліті. Форма графіту кулеподібна, неправильної форми ШГф3 (згідно з ГОСТ 3443-2005) з пониженою сфероїдизацією. Це обумовлено зменшеним вмістом магнію та низькою швидкістю охолодження масивного чавунного валка. Додавання хрому підвищує твердість, а наявність нікелю – в'язкість та подрібнення структури. Твердість вихідної структури за Шором – 42 (HSD).

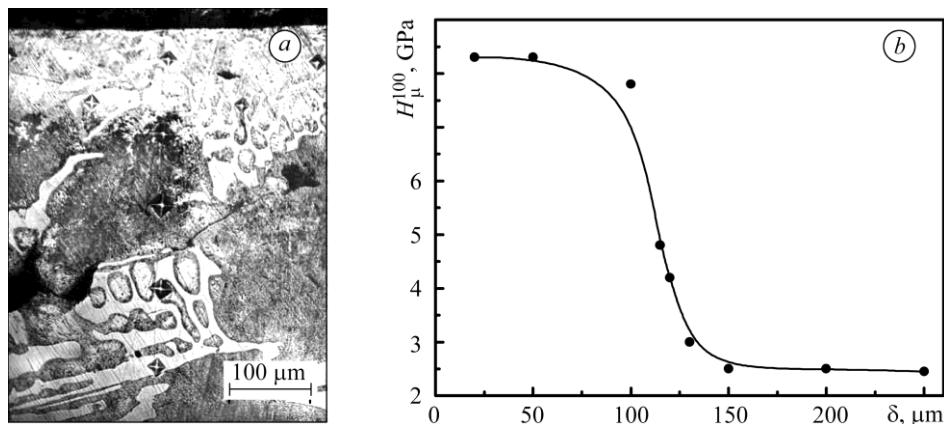


Рис. 1. Структура (a) та мікротвердість H_μ^{100} за глибиною δ від поверхні зразка (b) змцненого поверхневого шару на чавуні валків СШХН-42.

Fig. 1. Structure (a) and microhardness H_μ^{100} at depth δ from the specimen surface (b) of the strengthened surface layer of the cast-iron of rollers СШХН-42.

В результаті МІО у поверхневому шарі отримали мартенситно-аустенітно-цементитну структуру з включеннями кулястого графіту (рис. 1а). Дрібнодисперсний мартенсит є основною складовою поверхневої наноструктури із середнім розміром зерна 28 nm. Мікротвердість на поверхні сягає 8,4 GPa, а глибина зміцнення – 125 μm (рис. 1b).

Поряд з нанокристалічними фазами спостерігаємо полікристалічні зерна відбіленого чавуну (цементиту) (рис. 1а). Твердість мартенситно-аустенітної фази та цементиту майже однакова. Відбілюванню чавуну сприяють [15]: понижений вміст кремнію біля поверхні внаслідок перерозподілу легувальних елементів (рис. 2) і велика швидкість охолодження під час МІО; нагромадження водню в об'ємі відливки та проникнення його у поверхневий шар із ТС; високі тиски в зоні фрикційного контакту.

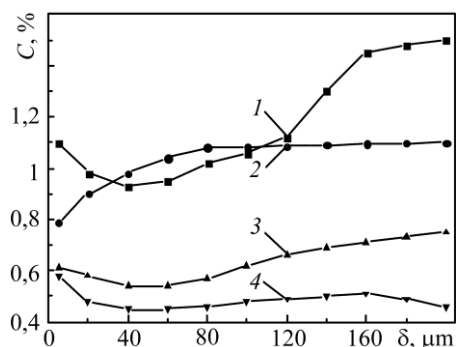


Рис. 2. Перерозподіл легувальних елементів у поверхневому шарі після МІО: 1 – Si; 2 – Ni; 3 – Mn; 4 – Cr.

Fig. 2. Redistribution of alloying elements in the surface layer after mechanical-pulse treatment (MPT): 1 – Si; 2 – Ni; 3 – Mn; 4 – Cr.

Перерозподіл легувальних елементів у поверхневому шарі після МІО (рис. 2) найінтенсивніше відбувається до глибини 100 μm . Зазначимо, що із загальної тенденції зменшення концентрації легувальних елементів у поверхневому шарі винятком є Si, вміст якого знижується найстрімкіше, та Cr, концентрація якого дещо зростає. Результати із подібними тенденціями отримано на сталі 50ХН у попередніх дослідженнях [7]. Такий перерозподіл легувальних елементів пов'язаний зі зміною їх хімічних потенціалів у зоні фрикційного контакту під впливом високих тисків та градієнта температур під час МІО.

МІО формує залишкові напруження стиску (рис. 3) з глибиною залягання $\sim 120 \mu\text{m}$, яка близька до глибини зміцнення (див. рис. 1b). Зазначимо, що за циклічного навантаження тріщини зароджуються під зміцненою поверхнею в зоні максимальних розтягувальних напружень. Тому бажаним є такий розподіл залишкових напружень стиску, за якого зона їх переходу у розтягувальні є максимально віддалена від поверхні.

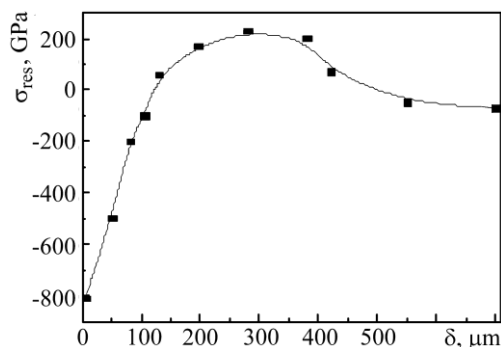


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень σ_{res} у зразках із чавуну валків СШХН-42 після МІО.

Fig. 3. Distribution of residual stresses σ_{res} in the cast-iron specimens of rollers СШХН-42 after MPT.

Дослідження показали, що пари тертя зі зразками-кільцями після МІО мають у 2,5–3 рази вищу зносостійкість порівняно з парами тертя у вихідному стані (рис. 4а, крива 2). Також збільшується зносостійкість і незміцненої вкладки

(рис. 4b, крива 1'). Цей результат отриманий завдяки зростанню мікротвердості поверхневого шару внаслідок наноструктуризації, а також зниженню коефіцієнта тертя [16], оскільки позитивний ефект стосується і незміщеної вкладки.

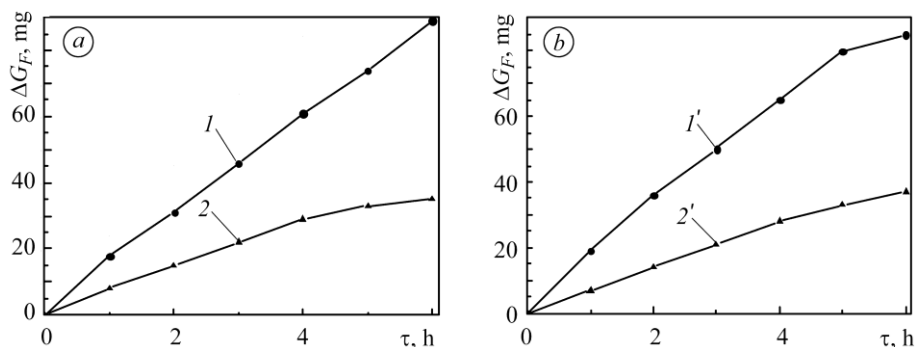


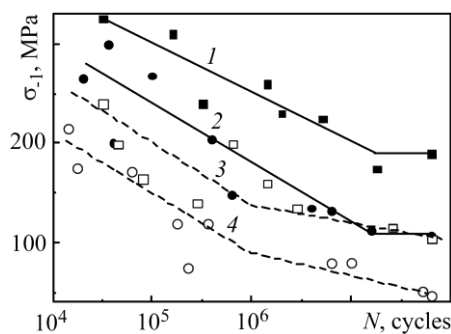
Рис. 4. Кінетика зношування чавуну валків СШХН-42 (а)—сталь 45 (b) в оливно-абразивному середовищі: 1, 1' та 2, 2' – кільце та вкладка у вихідному стані та після МІО, відповідно.

Fig. 4. Kinetics of wear of cast-iron of rollers СШХН-42 (a)—45 steel (b) in oil-abrasive media: 1, 1' and 2, 2' – rings and inserts in as-received state and after MPT, respectively.

Поверхнева наноструктуризація чавуну МІО збільшує його опір втомі (рис. 5, криві 1, 2) та корозійній втомі (криві 3, 4). Цьому сприяє підвищена мікротвердість поверхневого шару та сприятливий розподіл залишкових напружень стиску за глибиною. Крім цього, поверхнева НКС слугує бар'єром для проникнення водню із корозивного середовища [17]. Отже, МІО нівелює негативний вплив корозивного середовища, забезпечуючи практично однакову границю корозійної втоми зразків з поверхневою НКС (крива 3) і зразків у вихідному стані за випробувань на повітрі (крива 2).

Рис. 5. Криві втоми та корозійної втоми чавуну СШХН-42 після МІО (1, 3) та у вихідному стані (2, 4) на повітрі (1, 2) та в корозивному середовищі (3, 4).

Fig. 5. Fatigue curves and corrosion fatigue curves of cast-iron СШХН-42 after MPT (1, 3) and in as-received state (2, 4) in air (1, 2) and in corrosive environment (3, 4).



ВИСНОВКИ

Отже, механоімпульсна обробка формує на поверхні чавуну валків СШХН-42 мартенситно-аустенітно-цементитну нанокристалічну структуру з високою зносостійкістю, опором втомі та корозійній втомі. Цьому сприяють висока мікротвердість зміщеного поверхневого шару та сприятливий розподіл залишкових напружень стиску за значеннями і глибиною залягання.

РЕЗЮМЕ. Исследовано износостойкость, усталость и коррозионную усталость чугуна СШХН с поверхностной наноструктурой, полученной механоимпульсной обработкой в условиях работы валков прокатных станов. Показано, что поверхностная наноструктура повышает износостойкость чугуна в 3 раза сравнительно с исходным состоянием, а усталость и коррозионную усталость почти вдвое. Приведено обоснование такого поведения чугуна с поверхностной наноструктурой.

Ключевые слова: валки прокатных станков, чугун валков СШХН-42, нанокристаллическая структура, износостойкость, усталость, коррозионная усталость.

SUMMARY. Wear resistance, fatigue and corrosion fatigue of the cast-iron of rollers СШХН-42 with surface nanocrystalline structure received by mechanical-pulse treatment were studied in the working conditions of mill rollers. It was shown that surface nanocrystalline structure of the cast-iron of СШХН type increased its wear resistance in 3 times, fatigue and corrosion fatigue almost in 2 times compared with the as-received state. The behavior of cast-iron with surface nanostructure was substantiated.

Keywords: mill rollers, cast iron of rollers СШХН-42, nanocrystalline structure, wear resistance, fatigue, corrosion fatigue.

Роботу частково виконано за підтримки проекту 0119U002280 МОН України.

1. Коноваленко І. В., Марущак П. О., Кузь О. Н. Метод оброблення та аналізу зображень сітки тріщин термовтоми поверхні ролика машини безперервного лиття заготовок // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 2. – С. 41–48.
(Konovalenko I. V., Marushchak P. O., and Kuz' O. N. A method for processing and analysis of the images of a network of thermal fatigue cracks on the surfaces of rollers of continuous casting machines // Materials Science. – 2018. – **54**, № 2. – P. 175–183.)
2. Працездатність валкової сталі 60X2M з поверхневою наноструктурою / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, О. В. Максимів, А. В. Шалько, П. Я. Сидор // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 6. – С. 100–104.
(Serviceability of 60Kh2M roll steel with surface nanostructure / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko, P. Ya. Sydor // Materials Science. – 2017. – **52**, № 6. – P. 848–853.)
3. Zhiguts Yu. and Lazar V. Special grey and white termite cast irons // British J. of Science, Education and Culture. – 2014. – **1**, № 2 (6). – P. 201–207.
4. Kyryliv V., Kyryliv Y., and Sas N. Formation of surface ultrafine grain structure and their physical and mechanical characteristics using vibration-centrifugal hardening // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3152170>.
5. Контактна втома сталей 20ХН3А та 55СМФА з поверхневим наноструктурним шаром у корозивно-абразивних середовищах / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, О. В. Максимів, А. В. Шалько // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 78–83.
(Contact fatigue of 20KhN3A and 55SMFA steels with surface nanostructured layers in corrosive-abrasive media / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko // Materials Science. – 2018. – **53**, № 4. – P. 508–513.)
6. Nykyforchyn H., Kyryliv V., and Maksymiv O. Effect of nanostructurisation for structural steels on their wear hydrogen embrittlement resistance // Solid State Phenomena. – 2015. – **225**. – P. 65–70.
7. Fatigue and corrosion fatigue of the roll steels with surface nanostructure / V. Kyryliv, B. Chaikovs'kyi, O. Maksymiv, B. Mykutchak // J. of Nano Research. – 2018. – **51**. – P. 92–97.
8. Гурей В. М., Бабей Ю. И. Влияние фрикционно-упрочняющей обработки на сопротивление изнашиванию при трении качения в масляно-абразивной среде некоторых сталей и серого чугуна // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – **14**, № 3. – С. 58–62.
(Gurei V. M. and Babei Yu. I. Effect of friction-hardening treatment on the resistance of several steels and cast iron to wear in rolling friction in oil-abrasive medium // Soviet Materials Science. – 1978. – **14**, № 3. – P. 275–279.)
9. Волчук В. М. До визначення області компромісу характеристик якості матеріалу // Металознавство та термічна обробка. – 2015. – № 3. – С. 21–25.
10. Каличак Т. Н., Кырьлив В. И., Фенчин С. В. Механоимпульсное упрочнение длинномерных деталей типа штоков гидроцилиндров // Физ.-хим. механика материалов. – 1989. – **25**, № 1. – С. 106–108.
(Kalichak T. M., Kyryliv V. I., and Fenchyn S. V. Mechanopulsed hardening of long components of the hydraulic cylinder rod type // Soviet Materials Science. – 1989. – **25**, № 1. – P. 96–99.)

11. *Курілів В. І.* Поверхнєве насичення сталей вуглецем під час механоімпульсної обробки // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 6. – С. 88–91.
(*Kyryliv V. I.* Surface saturation of carbon steels during mechanical pulse treatment // *Materials Science*. – 1999. – **35**, № 6. – P. 88–91.)
12. *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.
13. *Powder Diffraction File Search Manual: Alphabetical Listing and Search Section of Frequently Encountered Phases.* Inorganic 1974. – Philadelphia: JCPDS, 1974. – 839 p.
14. *Бережницькая М. Ф., Бабей Ю. И.* К методике определения остаточных макронапряжений в сплошных и полых цилиндрических стержнях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1974. – **10**, № 2. – С. 93–98.
(*Berezhnitskaya M. F. and Babei Yu. I.* Method for determining the residual macrostresses in solid and hollow cylindrical rods // *Soviet Materials Science*. – 1974. – **10**, № 2. – P. 198–202.)
15. *Иванов В. Н.* Словарь-справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
16. *Study on microstructure and properties of 304/316L coating prepared by ultra-high frequency induction cladding with wire feeding* / Z. Bing, Y. Shi, R. Sun, Y. Guo // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – **387**. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125478>.
17. *Influence of hydrogen on the mechanical properties of steels with the surface nanostructure* / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, O. Maksymiv // *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies* // *Springer Proceedings in Physics*. – 2015. – **167**. – P. 457–465.

Одержано 20.03.2020