

УДК 622.245.002.4.

## РОБОТОЗДАТНІСТЬ ВАЛКОВОЇ СТАЛІ 60X2М З ПОВЕРХНЕВОЮ НАНОСТРУКТУРОЮ

В. І. КИРИЛІВ<sup>1</sup>, Б. П. ЧАЙКОВСЬКИЙ<sup>2</sup>, О. В. МАКСИМІВ<sup>1</sup>,  
А. В. ШАЛЬКО<sup>2</sup>, П. Я. СИДОР<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій  
ім. С. З. Гжицького

Вивчено контактну втому та зносотривкість валкової сталі 60X2М з поверхневою нанокристалічною структурою (НКС), сформованою механоімпульсною обробкою. Показано підвищення контактної довговічності та зносотривкості сталі з поверхневою НКС та встановлено залежність цієї довговічності від вихідного структурного стану, а також ефективність протекторного захисту.

**Ключові слова:** *поверхнева нанокристалічна структура, механоімпульсна обробка, прокатні валки, сталь 60X2М, контактна втома, зносотривкість.*

В останні десятиліття зростає увага дослідників до нанокристалічних структур (НКС). Основними завданнями цього напрямку є вивчення та розробка технологій отримання НКС з високими фізико-механічними властивостями. Одним із методів отримання поверхневих НКС є механоімпульсна обробка (МІО) [1]. Вона базується на використанні енергії високошвидкісного тертя, яке є генератором інтенсивної пластичної деформації (ПД). МІО підвищує зносотривкість, опір знакозмінним навантаженням, термічну і корозійну стійкість металу [2–4]. Важливою групою деталей, які потребують збільшення ресурсу роботи, є металургійна оснастка. Встановлено, що продуктивність станів гарячого прокатування залежить від безперебійної і надійної роботи їх основного інструменту – робочих валків. Вони працюють в умовах одночасної дії абразивного середовища (окаліни), високих температур, ударних навантажень на вході заготовки в контакт з валками, а також змінних контактних і термічних напружень. Такі умови роботи валків призводять до їх передчасного виходу із ладу, причому біля 80% таких випадків виникають через їх низький опір втомі і зношуванню [5].

Мета роботи – вивчити вплив поверхневої наноструктури, сформованої МІО, на опір контактній втомі та зношуванню валкової сталі 60X2М.

**Матеріали і методики.** Досліджували валкову сталь 60X2М у вихідному стані та після гартування і середнього відпуску (HRC 45...48). У вихідному стані вивчали зміну контактної витривалості після таких видів поверхневого зміцнення: обкатування роликками методом поверхневої пластичної деформації (ППД), МІО, гартування струмами високої частоти (СВЧ), МІО з подальшим ППД та гартування СВЧ з ППД. МІО виконували на токарному верстаті 1К62 інструментом зі сталі 40Х з використання установки [6] за таких режимів: швидкість зміцнювального інструменту 65 м/с; частота обертання зразка  $2,5 \text{ s}^{-1}$ ; поперечна подача 0,4 мм; час врізання інструменту 35 с. МІО зразків здійснювали за високої частоти обертання ( $2,5 \text{ s}^{-1}$ ) для отримання невеликої глибини зміцнення, оскільки це зменшує час випробувань на контактну втому. Зі зменшенням частоти обертан-

ня глибина зміцнення збільшиться [7]. Як технологічне середовище використовували індустріальну оливу I-20A (ГОСТ 20799-88). Досліджували контактну втому на установці МКВ-К. Використовували зразки діаметром 10 mm за довжини робочої частини 50 mm, які навантажували дисками з шириною робочого контакту 10 mm. Прийнято рівень контактних напружень 600 МПа, частоту навантажень 250 Hz. Як корозивне середовище використовували водопровідну воду, яка імітує охолодження валків під час прокатування. Для протекторного захисту на зразки наносили електролітично цинковий покрив товщиною 10  $\mu\text{m}$ . Початок руйнування фіксували автоматичним вимикачем [8]. Фазовий склад поверхневих шарів сталі після зміцнювальної обробки вивчали на дифрактометри-дифрактографі ДРОН-3 в  $\text{CuK}\alpha$ -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 [9]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [10]. Аналіз мікроскопічних особливостей поверхневої контактної пошкодженості вивчали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200. Мікротвердість вимірювали на твердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g.

**Обговорення результатів.** Після МІО поверхневий шар сталі має мартенситно-аустенітно-цементитну структуру. Розмір зерен мартенситу на поверхні зміцненого зразка (18 nm) визначили рентгенівським методом. Мікротвердість зміцненого поверхневого шару випробовуваних зразків 9,8 GPa, глибина – 120  $\mu\text{m}$  (рис. 1a, крива 2).

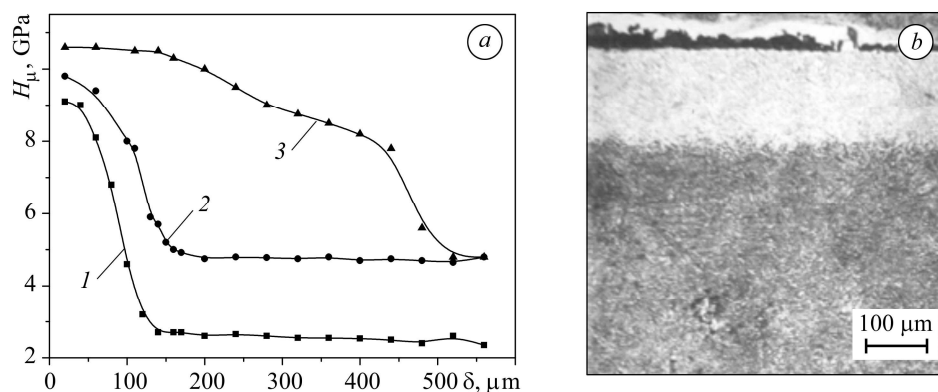


Рис. 1. Мікротвердість (a) (1 – вихідний стан + МІО; 2, 3 – гартування + середній відпуск + МІО з різною частотою обертання зразка  $n = 2,5 \text{ s}^{-1}$  (2) та  $n = 0,33 \text{ s}^{-1}$  (3)) та мікроструктура поверхневого шару сталі 60X2M після МІО (b) ( $\times 300$ ).

Fig. 1. Microhardness (a) (1 – initial state + mechanical-pulse treatment (MPT); 2, 3 – quenching + medium-temperature tempering + MPT with different specimen rotational frequency  $n = 2.5 \text{ s}^{-1}$  (2) and  $n = 0.33 \text{ s}^{-1}$  (3)) and microstructure of the 60X2M steel surface layer after MPT (b) ( $\times 300$ ).

Показано, що МІО підвищує опір сталі у вихідному стані контактному руйнуванню у корозивному середовищі в 1,9 рази порівняно зі шліфованими зразками, ППД – в 1,3 рази, гартування СВЧ – у 3,2 рази (див. таблицю). Результати підтверджують висновок [11] про залежність опору контактному руйнуванню сталей з поверхневим зміцненням від глибини зміцненого шару. Обкатування зразків після МІО або гартуванням СВЧ додатково підвищує їх довговічність у середньому на 30% внаслідок зростання залишкових напружень стиску та збільшення глибини їх залягання (рис. 2).

Максимальний ефект підвищення опору корозійно-контактній втомі спостерігаємо після МІО загартованих і відпущених зразків (див. таблицю). Нагрівання

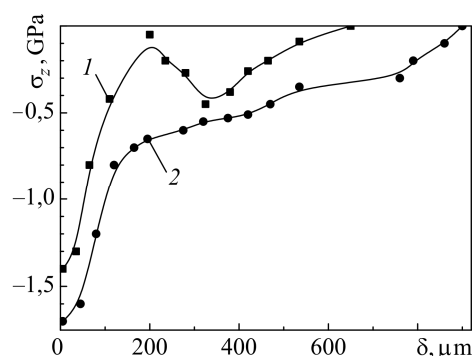
корозивного середовища до 90°C (максимальна температура нагрівання валка) слабо впливає на довговічність сталі порівняно з випробуванням за кімнатної температури (за температури 20°C – 24·10<sup>4</sup> cycles, за 90°C – 30·10<sup>4</sup> cycles).

**Контактна довговічність сталі 60X2М у вихідному стані (I)  
та після попереднього гартування (II) і середнього відпуску до HRC 45...48  
(×10<sup>4</sup> cycles до появи пошкоджень у зоні контакту)**

Вихідна структура	Шліфування (Ш)	Ш+обкатування (ШПД)	Ш+МІО	МІО+ППД	Гартування СВЧ	Гартування СВЧ+ППД	Ш+цинковий покрив
I	24	31	45,8	60	76	98	–
II	114	–	408	–	–	–	150

Рис. 2. Залишкові напруження у приповерхневих шарах сталі після МІО (1) та після МІО з ППД (2).

Fig. 2. Residual stresses in the near-surface layers of the steel after MPT (1) and after MPT with surface plastic deformation (SPD) (2).



Прісна вода знижує контактну довговічність сталей порівняно з неактивним середовищем (вазелиноюю оливою) на два порядки [12]. Для оцінки зменшення впливу корозивного чинника на контактне руйнування виконували спеціальні дослідження, використовуючи як протектор цинковий покрив. Дослідження показали, що цей покрив підвищує опір сталі контактному корозійно-втомному руйнуванню в 1,3 рази порівняно з вихідними контрольними зразками (див. таблицю).

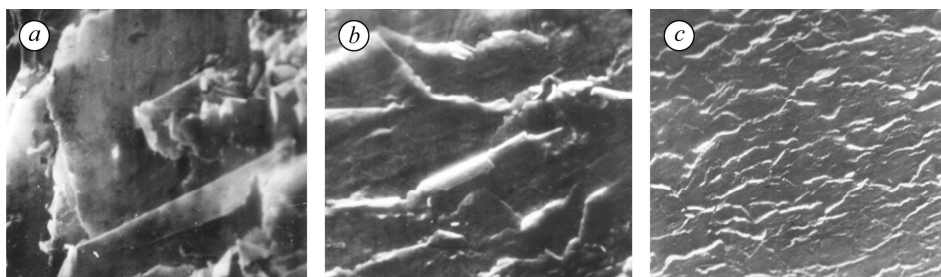


Рис. 3. Мікроскопічні особливості поверхневої контактної пошкодженості сталі після різних видів поверхневих обробок: *a* – стан постачання + МІО (×600); *b* – гартування СВЧ; *c* – гартування + МІО (×200).

Fig. 3. Microscopic peculiarities of surface fatigue defectiveness of the steel after different types of surface treatment: *a* – as-received state + MPT (×600); *b* – induction hardening (×600); *c* – quenching + MPT (×200).

Аналізували мікроскопічні особливості контактної пошкодженості, використовуючи растровий електронний мікроскоп РЕМ-200. Мікрорельєф циліндричної поверхні в зоні контакту (у вихідному стані після МІО) характеризується періодичними заглибленнями, мікроділянками втискування і виступами, відша-

руваннями металу. Мікроділянки втискування мають неоднорідну глибину і направленість (рис. 3а). Після гартування СВЧ мікросліди контактної пошкодженості орієнтовані вздовж напрямку кочення (рис. 3б), а мікроділянки втискування однорідніші за глибиною порівняно з вихідним станом (рис. 3а). Густина відшарувань тут також зменшилась, очевидно через це підвищилась контактна довговічність. МІО загартованої сталі зі середнім відпуском якісно змінює контактнотомну мікропошкодженість поверхні в корозивному середовищі. Тоді спостерігаємо згладжування мікрорельєфу порівняно із вихідним станом. Це зміцнення призводить фактично до ліквідації відшарувань на поверхні контакту (рис. 3с). Загальна деформованість поверхні тут суттєво нижча. Сплюсцування і відшарування металу спостерігаємо значно рідше порівняно з іншими видами зміцнення, що підтверджує максимальний ефект підвищення опору корозійно-контактній втомі за МІО загартованої і середньовідпущеної сталі.

Зносотривкість сталі 60X2M вивчали за оливо-абразивного зношування. МІО тільки кільцець підвищує зносотривкість як кільцець (рис. 4, криві 3, 4), так і вкладок (криві 3', 4') порівняно з термообробленими кільцями (криві 1, 2) та вкладками (3, 4) через зменшення коефіцієнта тертя пари [3].

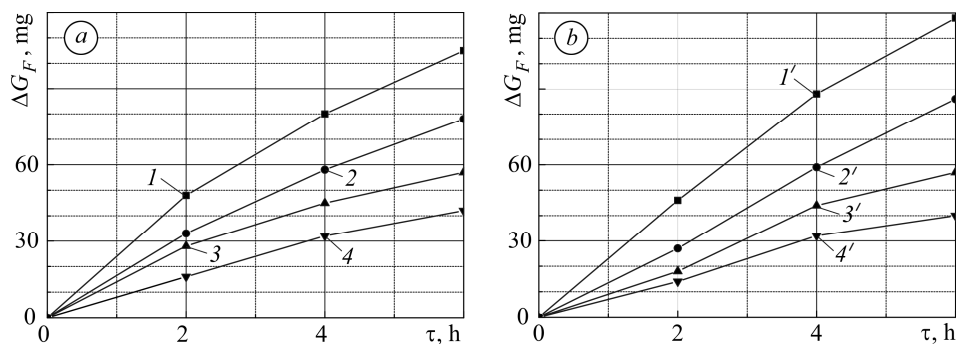


Рис. 4. Кінетика зношування сталі 60X2M (а) та сталі 35 (б) в оливо-абразивному середовищі: 1–4 – кільце; 1'–4' – вкладка; 1, 2 – гартування і низький відпуск; 3, 4 – МІО у вихідному стані; 1, 3, 1', 3' – 2 МПа; 2, 4, 2', 4' – 1 МПа ( $v = 0,9$  m/s, олива ТАП-30 + 0,1 mass% абразиву).

Fig. 4. Wear kinetic of 60X2M steel (a) and 35 steel (b) in oil-abrasive medium: 1–4 – ring; 1'–4' – insert; 1, 2 – quenching and low tempering; 3, 4 – MPT in initial state; 1, 3, 1', 3' – 2 MPa; 2, 4, 2', 4' – 1 MPa ( $v = 0.9$  m/s, oil TAP-30 + 0.1 mass% abrasive).

Поверхневі НКС, отримані МІО, мають підвищену термічну стабільність [13]. Одним із чинників цього є їх нижча теплопровідність порівняно з вихідним матеріалом [14]. Це важливо для оцінки роботоздатності валків в умовах підвищених температур за їх охолодження під час прокатування. Валки прокатних станів працюють у важких умовах, тому для них необхідний товстий зміцнений шар, а цього можна досягти зміною режимів МІО (див. рис. 1).

Отже, використання МІО для формування поверхневої НКС на сталі 60X2M підвищує контактну довговічність та зносотривкість в 3,6 та 1,8–2 рази, відповідно. Найліпші експлуатаційні характеристики отримано на зразках після МІО з попередньою термічною обробкою. Протекторний захист додатково збільшує контактну довговічність сталі у робочому середовищі.

**РЕЗЮМЕ.** Изучено контактную усталость и износостойкость валковой стали 60X2M с поверхностной нанокристаллической структурой (НКС), сформированной механоимпульсной обработкой. Показано повышение контактной долговечности и износостойкости стали с поверхностной НКС и установлена зависимость этой долговечности от исходного структурного состояния, а также эффективность протекторной защиты.

*SUMMARY.* Contact fatigue and wear resistance of the roller steel 60X2M with surface nanocrystalline structure (NKS) formed by mechanical-pulse treatment (MPT) were studied. The increase of fatigue durability and wear resistance of steel with the surface NKS was shown. The dependence of fatigue durability of steel with surface NKS on its initial structural state was established. The efficiency of protector proofing on improvement of the fatigue durability of steel in the working medium was given.

1. *Structural steels surface modification by mechanical pulse treatment for corrosion protection and wear resistance* / H. M. Nykyforchyn, V. I. Kyryliv, Dz. V. Slobodjan, Ju. M. Koval // *Surf. & Coat. Technol.* – 1998. – **100–101**. – P. 125–127.
2. *Nykyforchyn H., Kyryliv V., and Maksymiv O.* Physical and mechanical properties of surface nanocrystalline structures, generated by severe thermal-plastic deformation / Eds.: O. Fesenko, L. Yatsenko // *Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology and Applications. Chapter 2.* – Inbunden: Springer, 2014. – P. 31–41.
3. *Кирилів В. І.* Підвищення зносотривкості середньовуглецевої сталі нанокристалізацією поверхневого шару // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – **48**, № 1. – С. 102–105.  
(*Kyryliv V. I.* Improvement of the wear resistance of medium-carbon steel by nanodispersion of surface layers // *Materials Science.* – 2012. – **48**, № 1. – P. 119–123.)
4. *Formation of surface corrosion-resistant nanocrystalline structures on steel* / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, Z. Slobodyan, O. Tsyrunyk // *Nanoscale Research Letters.* – 01 February 2016. – P. 1–6.
5. *Тылкин М. А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1975. – 347 с.
6. *А. с. 1199601 СССР, МКИ4 И24И 39/04.* Устройство для упрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей / В. И. Кырылиев, Т. Н. Каличак, Ю. И. Бабей. – Опубл. 23.12.85; Бюл. № 47.
7. *Кырылиев В. И.* Повышение работоспособности деталей машин с помощью нанотехнологии // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2013. – № 1. – С. 87–89.  
(*Kyryliv V. I.* Improvement of efficiency of equipment parts using nanotechnology // *Metalurgical and mining industry.* – 2013. – **5**, № 2. – P. 65–70.)
8. *Стришевский А. И.* Электронный автоматический выключатель в машинах для испытания на контактную выносливость // *Заводская лаборатория.* – 1959. – № 9. – С. 1136–1137.
9. *Use of the CSD program package for structure determination from data* / L. G. Akselrud, Yu. M. Gryn', P. Yu. Zavaliy et al. // *Abstr. of the European Powder Diffraction Conf., Enshede, Netherlands, 1992.* – *Material Science.* – 1993. – **41**. – P. 133–140.
10. *Kraus 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.
11. *Контактна втома сталі 20ХН3А з поверхневою наноструктурою* / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, О. В. Максимів, А. В. Шалько // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 6. – С. 75–79.  
(*Contact fatigue of 20KH3A steel with surface nanostructure* / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 6. – P. 833–838.)
12. *Чайковский Б. П.* Повышение сопротивления долотных сталей контактному разрушению в активных средах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львов, 1982. – 16 с.
13. *Вплив поверхневої механоімпульсної обробки на окиснення сталі Fe–0,2C–13Cr–0,3Si у розплаві свинцю* / В. П. Цісар, В. І. Кирилів, О. І. Єлісеєва, В. А. Волошин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2009. – **45**, № 5. – С. 100–106.  
(*Influence of the surface mechanical pulsed treatment on the oxidation of Fe–0.2C–13Cr–0.3Si steel in lead melts* / V. P. Tsisar, V. I. Kyryliv, O. I. Eliseeva, V. A. Voloshyn // *Materials Science.* – 2009. – **45**, № 5. – P. 726–733.)
14. *Теплопроводность металлических наноструктур* / В. М. Юров, В. И. Лауринас, С. А. Гученко, О. Н. Завацкая // *Наноматериалы и нанотехнологии.* – 2012. – № 3. – С. 29–33.

Одержано 10.03.2016