

УДК 621.789:669.14

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО НАНОСТРУКТУРУВАННЯ СТАЛІ 65Г НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДИСКІВ СОШНИКІВ СІВАЛОК

О. В. МАКСИМІВ¹, В. І. КИРИЛІВ¹, Б. П. ЧАЙКОВСЬКИЙ², Б. Р. ЦІЖ^{2,3},
А. М. КОСТРУБА², В. І. ГУРЕЙ⁴

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

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

³ Університет Казимира Великого в Бидгощі, Польща;

⁴ Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено зносостійкість дисків сошників сівалок зі сталі 65Г з поверхневою нанокристалічною структурою, сформованою механоімпульсною обробкою, в умовах сухого абразивного тертя. Показано, що поверхнева наноструктуризація підвищує зносостійкість сталі порівняно із вихідним станом за випробувань незакріпленим та закріпленим абразивом відповідно у 5,4 та 8,8 разів. Термічне оброблення сталі перед поверхневою наноструктуризацією збільшує її зносостійкість ефективніше за випробувань закріпленим абразивом.

Ключові слова: *сталь 65Г, диски сошників сівалок, нанокристалічна структура, зносостійкість, незакріплений абразив, жорстко закріплений абразив.*

Вступ. Одним із головних секторів сучасної економіки України є агропромисловий комплекс [1]. Його ефективність суттєво залежить від надійної роботи технологічного обладнання та його вузлів. Серед важливих і поширених вузлів сільськогосподарської техніки є сошники сівалок. Від їх надійної роботи залежить продуктивність і урожайність зернових культур. Найвідповідальнішим елементом сошників є диски, які працюють у важких умовах сухого тертя та абразивного зношування. Диски сошників сівалок використовують без термічної обробки (ТО) та зміцнення, тому термін їх експлуатації невеликий. З огляду на це актуальними є зміцнювальні обробки робочих поверхонь дисків для підвищення їх зносостійкості та ресурсу. Раніше [2] вивчали вплив ТО на абразивну зносостійкість сталі 65Г дисків сошників сівалок. Подальшого підвищення роботоздатності цих деталей можна досягти сучасними методами поверхневого зміцнення [3–5], зокрема, наноструктуризацією поверхневого шару механоімпульсною обробкою (МІО) [6], яку застосовують для підвищення границі втоми [7], контактної втоми [8] та зносостійкості [9, 10] конструкційних сталей.

Мета роботи – дослідити зносостійкість дисків сошників сівалок зі сталі 65Г з поверхневою нанокристалічною структурою (НКС) в умовах абразивного зношування.

Методики досліджень. Досліджували плоскі зразки з листової сталі 65Г розмірами 2×30×40 mm у вихідному стані та після МІО. Для порівняльних досліджень частину зразків перед МІО термічно обробляли за двома режимами: гартуванням із відпуском за температур 150 і 450°C. Зразки вирубували на ножицях, здійснювали ТО, шліфували, після чого з одного боку обробляли МІО на модернізованому плоскошліфувальному верстаті SPC-20, використовуючи зміцнюваль-

ний інструмент зі сталі 40X із прямим профілем і шириною робочої частини 4 mm. Для отримання максимальної поверхневої мікротвердості та глибини зміцненого шару застосували такі режими МІО: лінійна швидкість зміцнювального інструменту – 50 m/s, лінійна швидкість обертання зразка – 1 m/min, поперечна подача інструменту 1,0 mm на подвійний хід стола, врізання інструменту – 0,4 mm. Використовували спеціальне технологічне середовище для науглецювання [11].

Фазовий склад поверхневих шарів сталей після зміцнювальної обробки вивчали на дифрактометри-дифрактографі ДРОН-3 в 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 пакет програмного забезпечення CSD [12]. Рентгенограми ідентифікували за картками картотеки JCPDS-ASTM [13]. Розмір кристалітів на поверхні визначали рентгенівським методом за півшириною піків. Мікротвердість зразків після МІО вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g.

Експерименти на абразивне зношування виконували за двома методиками, а саме, закріпленим та незакріпленим (наближеним до експлуатаційних умов зношування дисків сошників) абразивом [14, 15], а його значення визначали за втратою маси зразків. Перед випробуванням незакріпленим абразивом його просушували до вологості $< 0,16\%$, а також припрацьовували гумовий диск шліфувальною шкуркою типу 2 зернистістю № 8П [15], закріпленою в зразку-тримачі на плоскій сталевій пластині. Умови випробування наведені в табл. 1. Розмір зерен абразиву змінювали в діапазоні 200...1000 μm .

Таблиця 1. Умови випробувань незакріпленим абразивом

Розміри гумового диска, mm		Властивості гумового диска		Навантаження в ділянці контакту, N
діаметр	ширина	Твердість за Шором А за ГОСТ 263-75	Відносне залишкове видовження (за ГОСТ 27-75), %	
48...50	$15 \pm 0,1$	78...85	15...20	2,4

Для випробувань закріпленим абразивом використовували абразивний диск із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7K15 $\varnothing 150 \text{ mm}$ та шириною 8 mm. Навантаження під час експериментів – 0,75 N впродовж 5 min, частота обертання диска – 160 rev/min. Поверхні тертя зразків досліджували на сканівному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP зі системою рентгенівського мікроаналізу INGA Energy 350.

Обговорення результатів. МІО на поверхні зразків формує мартенситно-аустенітно-цементитну структуру, що пояснюється підвищенням вмістом вуглецю в сталі [16]. Отримана структура не залежала від стану сталі до МІО, однак її вихідний стан вплинув на розмір кристалітів і тонку структуру зміцненого НКС шару (табл. 2). Так, спостерігали деяку різницю розмірів зерна мартенситу і залишкового аустеніту, густини дислокацій та, відповідно, відносної деформації ґратки. Зазначимо, що попередня ТО сприяє формуванню під час МІО значних напружень у ґратці мартенситу. Відповідно збільшується мікротвердість і глибина зміцненого шару (рис. 1).

Результати дослідження абразивної зносостійкості наведено на рис. 2. МІО підвищує зносостійкість досліджуваних зразків за випробувань як закріпленим, так і незакріпленим абразивом. Попередня ТО посилює ефект зміцнення неза-

лежно від методики випробувань, оскільки вона збільшує як мікротвердість, так і глибину зміцненого поверхневого шару (табл. 1 і рис. 1).

Таблиця 2. Структурно-фазовий склад і тонка структура сталі 65Г після МІО залежно від вихідного стану матеріалу

Вид обробки до МІО	Розмір кристалітів L , nm		Густина дислокацій ρ , $\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$		Відносна деформація ґратки ϵ , %	
	α -Fe	γ -Fe	α -Fe	γ -Fe	α -Fe	γ -Fe
Вихідний стан	9,1	17,4	6,5	2,3	0,085	0,146
Гартування + відпуск 150°C	9,8	38,9	5,8	1,6	0,139	0,067
Гартування + відпуск 450°C	6,8	30,3	13,0	0,68	0,213	0,044

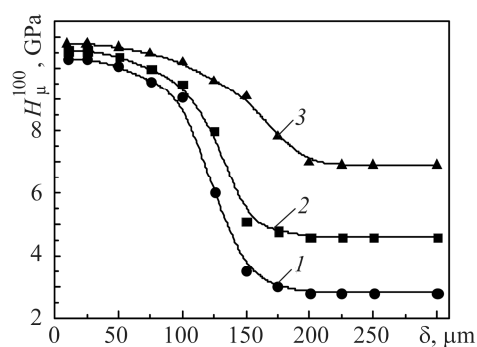


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Розподіл мікротвердості H_{μ}^{100} за глибиною δ від поверхні після МІО зразків із різним структурним станом: 1 – вихідний; 2 – гартування + відпуск 450°C; 3 – гартування + відпуск 150°C.

Fig. 1. Distribution of microhardness H_{μ}^{100} in depth δ from the surface after mechanical pulse treatment (MPT) of specimens with different structural state: 1 – as-received; 2 – quenching + tempering 450°C; 3 – quenching + tempering 150°C.

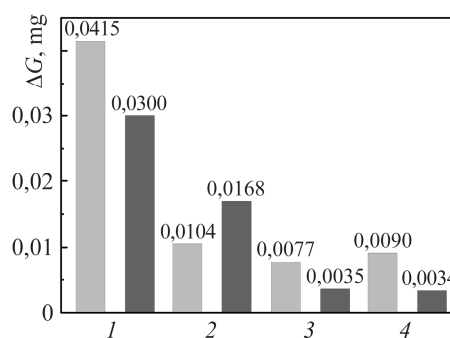


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Абразивна зносостійкість ΔG зразків, випробуваних незакріпленим (■) та закріпленим (■) абразивом: 1 – вихідний стан + шліфування; 2 – МІО; 3 – гартування + відпуск 150°C + МІО; 4 – гартування + відпуск 450°C + МІО.

Fig. 2. Abrasive wear resistance ΔG of specimens tested by unfixed (■) and fixed (■) abrasive: 1 – as-received state + grinding; 2 – mechanical pulse treatment (MPT); 3 – quenching + tempering 150°C + MPT; 4 – quenching + tempering 450°C + MPT.

За випробувань закріпленим абразивом попередньо зміцнених ТО зразків зносостійкість після МІО вища, ніж незакріпленим, однак для МІО зразків у вихідному стані спостерігали протилежну закономірність. Очевидно, це пов'язано з особливостями різання абразивним диском та тим, що для зразків у вихідному стані глибина зношування більша за глибину зміцнення. За випробувань закріпленим абразивом різниці у зносостійкості після обох попередніх ТО практично немає. Водночас для незакріпленого абразиву зносостійкість після МІО різко зростає (рис. 2, стовпці 3, 4) порівняно з режимом 1 на рис. 2, оскільки ці випробування є менш жорсткими.

Результати випробувань на зносостійкість узгоджуються з фрактографічним аналізом поверхонь тертя. Для вихідного стану поверхні сильно пошкоджені (рис. 3), відчутніше за випробувань незакріпленим абразивом (рис. 3a), що зумовлено перекошуванням твердих частинок між сталевим зразком гумовим диском та появою подряпин і борозенок, а також слідів мікрорізання для частинок максимального розміру. За випробувань закріпленим абразивом (рис. 3b) поверхня однорідніша, помітні окремі ямки, викликані потраплянням у зону контакту продуктів зношування, а ледь помітні канавки є значно менші, ніж за випробувань незакріпленим абразивом.

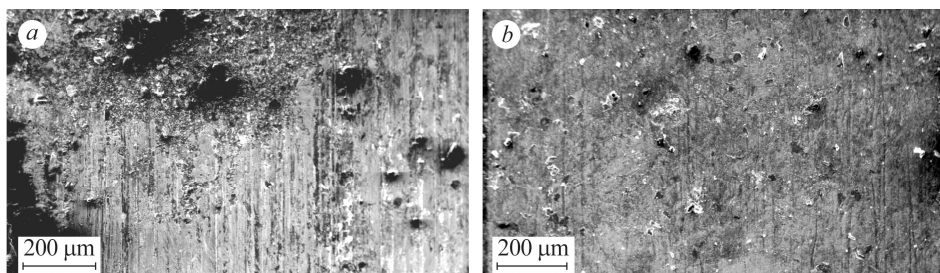


Рис. 3. Поверхні зношування зразків у вихідному стані після випробувань незакріпленим (a) та закріпленим (b) абразивом.

Fig. 3. Surfaces of specimens in as-received state after tests by unfixed (a) and fixed (b) abrasive.

Після МІО сталі у вихідному стані пошкодженість поверхонь суттєво нижча, однак незакріплений абразив пошкоджує її більше (рис. 4a, b). За використання попередньої ТО характер зношування здебільшого зберігається. Відмінність полягає в тому, що незакріплений абразив, а також продукти зношування формують на поверхні великі борозенки, причому більші на поверхні з вищою поверхневою твердістю (рис. 4c). Спостерігали також місця відшарування поверхневого шару від матриці (рис. 4a, c, e). Це, очевидно, спричинено значними зсувними напруженнями в зоні фрикційного контакту та великими деформаціями мартенситної структури (див. табл. 2), що викликає випучування поверхневого шару аналогічно процесам за контактної втоми [8].

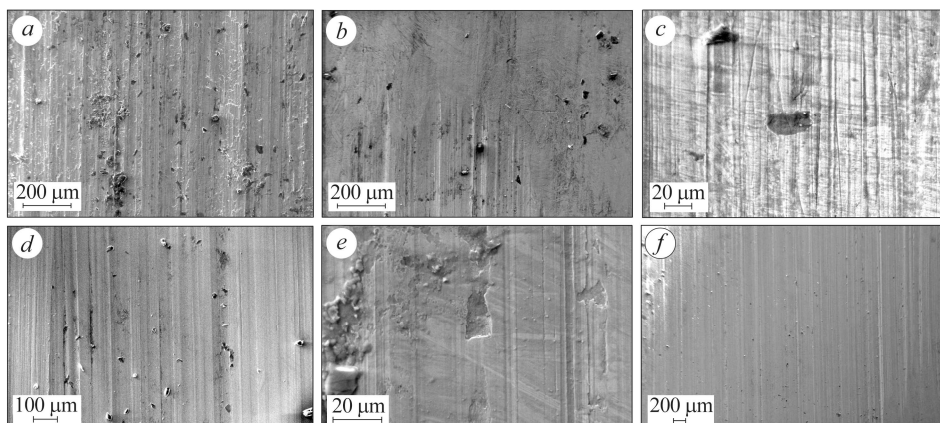


Рис. 4. Поверхні зношування зразків після випробувань незакріпленим (a, c, e) та закріпленим (b, d, f) абразивом після МІО у різному стані: вихідний стан (a, b), гартування + відпуск 150°C (c, d), гартування + відпуск 450°C (e, f).

Fig. 4. Wear surfaces of specimens after testing by unfixed (a, c, e) and fixed (b, d, f) abrasive after MPT in different state: as-received (a, b), quenching + tempering 150°C (c, d); quenching + tempering 450°C (e, f).

ВИСНОВКИ

Досліджено абразивну зносостійкість дисків сошників сівалок зі сталі 65Г у вихідному стані та з попередньою термічною обробкою і поверхневою НКС, сформованою механоімпульсною обробкою. Показано, що НКС підвищує зносостійкість досліджуваної сталі за випробувань як закріпленим, так і незакріпленим абразивом. Термічна обробка до МІО практично не впливає на результати випробувань незакріпленим абразивом на відміну від експериментів із закріпленим абразивом.

SUMMARY. Wear resistance of seeding machines furrow-openers disks made from 65G steel with surface nanocrystalline structure formed by mechanical-pulse treatment was studied in conditions of dry abrasive friction. It was shown that surface nanostructurization increased wear resistance of steel under tasting by unfixed and fixed abrasive in 5.4 and 8.8 times correspondingly, compared with as-received state. Thermal treatment of the steel before surface nanostructurization considerably increased its wear resistance under tasting by fixed abrasive.

Keywords: 65G steel, seeding machines furrow-openers disk, nanocrystalline structure, abrasive wear, unfixed abrasive, rigidly fixed abrasive.

Роботу частково виконано за підтримки проекту 0119U002280 МОН України.

1. Згуровський М. З. Технологічне передбачення економіки України на середньостроковому (до 2020 р.) і довгостроковому (до 2030 р.) часових горизонтах // Вісник НАН України. – 2016. – № 1. – С. 53–67.
2. Вплив термічної обробки на абразивну зносотривкість дисків сошників сівалок зі сталі 65Г / В. І. Кирилів, Б. П. Чайковський, В. М. Гвоздецький, Р. Д. Кузьмінський, О. В. Максимів, А. В. Шалько // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – 55, № 4. – С. 119–124.
(Influence of heat treatment on the abrasive wear resistance of the disks of furrow-openers of seeding machines made of 65G steel / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovskiy, V. M. Hvozdet'skiy, R. D. Kuzmin'skiy, O. V. Maksymiv, A. V. Shalko // Materials Science. – 2020. – 55, № 4. – P. 590–596).
3. Мікромеханічні характеристики поверхневого шару сталі 45 після електроіскрової обробки / В. М. Голубець, М. І. Пашечко, Я. Борц, М. Барц // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – 55, № 3. – С. 102–108.
(Micromechanical characteristics of the surface layer of 45 steel after electric-spark treatment / V. M. Holubets, M. I. Pashechko, J. Borc, M. Barszcz // Materials Science. – 2019. – 55, № 3. – P. 409–416).
4. Підвищення зносотривкості низьколегованої конструкційної сталі плазмово-порошковим наплавленням сплавами на основі заліза, хрому і нікелю / Є. Ф. Перепльотчиков, Х. Б. Василів, В. А. Винар, І. О. Рябцев, В. І. Закієв // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – 54, № 3. – С. 81–88.
(Elevation of the wear resistance of low-alloy structural steel by plasma-powder surfacing with alloys based on iron, chromium and nickel / E. F. Perepl'otchikov, K. B. Vasylyv, V. A. Vynar, I. O. Ryabtsev, V. I. Zakiev // Materials Science. – 2018. – 54, № 3. – P. 378–386).
5. Фрикційна поведінка залізвуглецевих сплавів у парі із ПЕО шарами, синтезованими на сплаві Д16Т / М. М. Студент, В. М. Довгуник, В. М. Посувайло, І. В. Ковальчук, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 3. – С. 63–70.
(Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy / M. M. Student, V. M. Dovhunya, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, V. M. Hvozdet'skiy // Materials Science. – 2017. – 53, № 3. – P. 359–367).
6. Nykyforchyn H., Kyryliv V., and Maksymiv O. Physical and mechanical properties of surface nanocrystalline structures, generated by severe thermal-plastic deformation // Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology, and Applications. Proc. in Phys. – Cham: Springer, 2015. – 156. – P. 31–41.

7. *Fatigue and corrosion fatigue of the roll steels with surface nanostructure* / V. Kyryliv, B. Chaikovs'kyi, O. Maksymiv, B. Mykychak // *J. of Nano Research*. – 2018. – **51**. – P. 92–97.
8. *Роботоздатність 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. 93–97.
(*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.)
9. *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.)
10. *Nykyforchyn H., Kyryliv V., and Maksymiv O. Effect of nanostructurisation for structural steels on their wear resistance and hydrogen embrittlement resistance* // *Solid State Phenomena*. – 2015. – **225**. – P. 65–70.
11. *Кирилів В. І. Поверхнєве насичення сталі 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. *Абразивная износостойкость материалов: справ. пос.* / Под. ред. А. Г. Добровольского, П. И. Кошеленко. – К.: Техника, 1989. – 128 с.
15. *ГОСТ 23.208-79. Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробування матеріалів на зносостійкість при терті про нежорстко закріплені абразивні частинки*. – Введ. в експл. 01.03.1981.
16. *Behavior of tempered surface nanocrystalline structures obtained by mechanical-pulse treatment* / O. Maksymiv, V. Kyryliv, O. Zvirko, H. Nykyforchyn / Eds.: O. Fesenko, L. Yatsenko // *Nanocomposites, Nanostructures and Their Applications, Proc. in Phys.* – Cham: Springer, 2019. – **221**. – P. 125–134.

Одержано 05.03.2020