

УДК 621.787

## ВПЛИВ МОДИ ДЕФОРМАЦІЇ НА СИЛОВІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НАНОСТРУКТУРИ СТАЛІ 40Х

В. І. КИРИЛИВ<sup>1</sup>, В. І. ГУРЕЙ<sup>2</sup>, О. В. МАКСИМІВ<sup>1</sup>,  
І. В. ГУРЕЙ<sup>2</sup>, Ю. О. КУЛИК<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка

Вивчено вплив моди деформації, спричиненої різними зміцнювальними інструментами під час формування поверхневої наноструктури сталі 40Х механоімпульсною обробкою, на складники сили тертя в зоні фрикційного контакту, структуру та фізико-механічні властивості. Виявлено, що внаслідок реалізації моди простого зсуву спеціальним зміцнювальним інструментом зменшуються розміри зерен, підвищуються глибина та мікротвердість зміцненого поверхневого шару через поліпшення умов зародження та генерування дислокацій.

**Ключові слова:** наноструктура, джерело Франка–Ріда, складники сили тертя, зміцнювальний інструмент, розмір зерен.

The influence of the mode of deformation, caused by different strengthened tools during the formation of surface nanostructure on 40X steel by mechanopulse treatment, on the components of the frictional force in the friction contact zone, structure, physical and mechanical properties is studied. It is shown that implementation of the simple shear mode by a special strengthened tool decreases the grains size, increases the depth and microhardness of the strengthened layer due to the facilitation of initiation and generation of dislocations.

**Keywords:** nanostructure, Frank–Read source, components of the friction force, strengthening tool, grains size.

**Вступ.** Відомі різні методи нанесення захисних покриттів на металеві сплави [1–3], зокрема електроіскрові [1], дифузійні [2], оксидокерамічні [3] та ін. Впродовж останнього десятиліття розвиваються методи для створення об'ємних [4] та поверхневих [5] нанокристалічних структур (НКС) інтенсивною пластичною деформацією (ПД). Формують поверхневі НКС і механоімпульсною обробкою (МІО) [5], де джерело ПД – високошвидкісне тертя. МІО підвищує зносостійкість [6, 7], контактну втому [8] та знижує водневу проникність [9, 10], що позитивно впливає також на корозійну втому сталей [11]. Під час ПД фрагментується структура до нанорівня. Ступінь ПД залежить від зародження та руху дислокацій, а їх утворення – від роботи джерела Франка–Ріда [12].

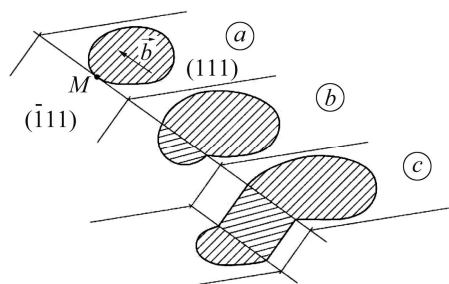
На рис. 1а зображена дислокаційна петля, яка поширюється в площині (111) г.ц.к. гратки. Розташована близько до точки *M* частина петлі має гвинтову орієнтацію, яка, стикаючись із перешкодою, зісковзує у площину ( $\bar{1}11$ ) (рис. 1b) поперечного ковзання. Далі вона із площини ( $\bar{1}11$ ) переходить в атомну площину, паралельну до початкової площини ковзання (рис. 1c). Часте повторення цього процесу називають багатократним поперечним ковзанням, яке призводить до утворення дислокаційної лінії великої протяжності, що переходить із однієї паралель-

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

ної площини в іншу (рис. 1с) [12]. Тут реалізується механізм зародження дислокацій від джерела Франка–Ріда та полегшується фрагментація структури. Для формування поверхневих НКС різнонаправленою (з різними модами) деформацією розробили спеціальний зміцнювальний інструмент [13]. У результаті одержали структуру із вищою густиною дислокацій, а отже, з меншим розміром зерен на поверхні та більшою глибиною зміцненого поверхневого шару. Крім цього, знизилась шорсткість поверхні. Через полегшені умови генерування дислокацій та фрагментації структури повинні знизитися зусилля під час оброблення та, відповідно, енергетичні затрати на утворення наноструктури.

Рис. 1. Поперечне (a, b) і подвійне поперечне (c) ковзання петлі змішаної дислокації в г.ц.к. ґратці.

Fig. 1. Transverse (a, b) and double transverse (c) sliding of the mixed dislocation loop in f.c.c. lattice.



Тому нижче досліджували структуру та визначали зусилля під час МІО прямим інструментом та з різнонаправленими пазми.

**Методика досліджень.** Випробовували плоскі зразки розміром 20×20×80 mm зі сталі 40X після нормалізації. Для МІО їх поверхонь використовували плоскошліфувальний верстат моделі SPC-20 інструментами зі сталі 40X діаметром 250 mm та шириною робочої частини 10 mm. Обробляли згідно з рекомендаціями праці [14] за такого режиму: колова швидкість інструменту  $V_1 = 60$  m/s, швидкість переміщення стола верстата  $V_2 = 1$  m/min, глибина врізання інструменту 0,35 mm, поперечна його подача  $S = 1,5$  mm/double pass. Як технологічне середовище застосовували мінеральну оливу з додатком низькомолекулярного поліетилену [15], яку в зону фрикційного контакту подавали спеціальною системою верстату. Кінематично МІО плоских поверхонь аналогічна до шліфування.

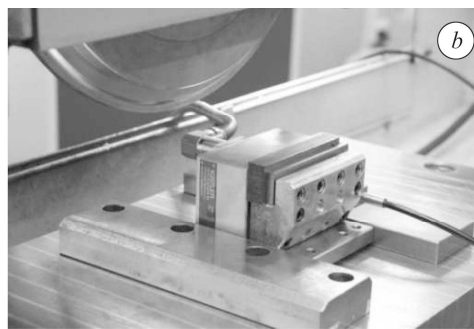
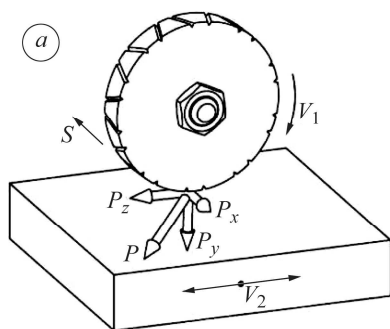


Рис. 2. Складники сили тертя під час МІО плоских поверхонь (a) та трикомпонентний динамометр (b) для їх вимірювання.

Fig. 2. Components of the friction force during mechanopulse treatment (MPT) of the plane surfaces (a) and three-component dynamometer (b) for their measurement.

Силу тертя, яка виникає в зоні фрикційного контакту інструмент–деталь, можна розкласти на поперечну  $P_x$ , яка діє паралельно до осі обертання та у напрямку, протилежному до руху подачі; нормальну  $P_y$ , що діє за радіусом інструменту і перпендикулярна до осі його обертання; тангенціальну  $P_z$ , яка діє за дотичною до оброблюваної поверхні та паралельна до осі обертання інструменту

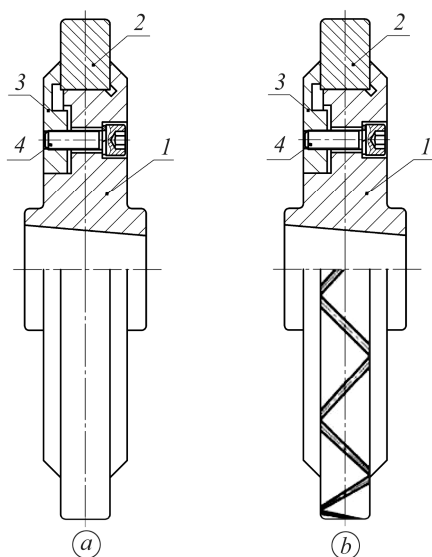


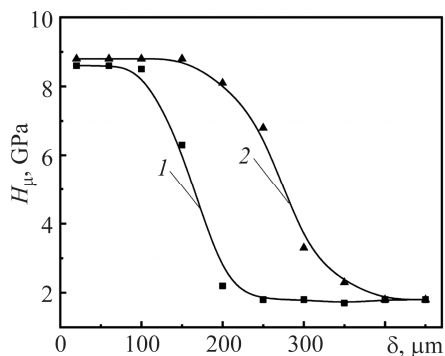
Рис. 3. Загальний вид використовуваних інструментів: *a* – з гладкою поверхнею; *b* – з нахиленими різнонаправленими пазами; 1 – корпус; 2 – робочий диск; 3 – фланець; 4 – гвинт.

Fig. 3. General view of the used tools: *a* – with plane surface; *b* – with multi-directional inclined grooves; 1 – case; 2 – working disk; 3 – flange; 4 – screw.

поверхнею та з різнонаправленими пазами (рис. 3).

Фазовий склад поверхневих шарів сталі після МІО вивчали з допомогою дифрактометра-дифрактографа ДРОН-3 у  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінюванні ( $U = 30 \text{ kV}$ ,  $I = 20 \text{ mA}$ ) з кроком  $0,05^\circ$  та експозицією у точці 4 с. Обробляли дифрактограми, використовуючи пакет програмного забезпечення CSD [16]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [17]. Розмір зерен на поверхні визначали рентгеновським методом за півшириною піків. Мікротвердість зразків після МІО вимірювали приладом ПМТ-3 за навантаження 100 г.

**Результати досліджень.** Після МІО прямим диском та з нахиленими пазами отримали мартенситну та мартенситно-аустенітну структури, відповідно. Розмір зерна  $\alpha$ -фази у першому випадку становив 10,7 (рис. 4, крива 1) та 8,6 нм (крива 2). Отже, мікротвердість відрізняється незначно, однак, глибина зміцнення за оброблення інструментом з нахиленими пазами зростає до  $\sim 300 \mu\text{m}$  (крива 2).



(рис. 2a). Їх вимірювали трикомпонентним динамометром типу 9121 фірми Kistler (Швейцарія) (рис. 2b), який складається з давачів, встановлених зі сильним натягом між базовою пластиною і кришкою, та використовує п'єзоелектричну систему. Сили, що діють на кристали кварцу, пропорційні електричному заряду, який при цьому виникає. Давачі сили закріплені в одному корпусі та містять три пари кварцових кристалічних пластин, одна з яких визначає стиск у напрямку осі  $z$ , а дві інші – зсув у напрямку осей  $x$  і  $y$ . Вони дуже жорсткі, володіють високими власними частотами, тому можуть вимірювати швидкоплинні процеси. П'єзоелектричний динамометр за допомогою кабелів, ізольованих за “масою”, з'єднаний з багатоканальним підсилювачем-перетворювачем фірми Kistler, в якому вмонтовані паралельний і послідовний інтерфейси для підключення до комп'ютера. Для автоматизації запису, оброблення та реєстрації даних використовували програму LabVIEW/SignalExpress 3.0. Для МІО застосували інструменти з гладкою по-

Рис. 4. Мікротвердість поверхнього шару сталі 40X після МІО інструментами з гладкою поверхнею (крива 1) та з нахиленими різнонаправленими пазами (крива 2).

Fig. 4. Microhardness of the surface layer of 40X steel after MPT by tools with plane surface (curve 1) and with multidirectional inclined grooves (curve 2).

Рентгенограми сталі після МІО різними кругами дещо різняться (рис. 5): після оброблення прямим інструментом зафіксували лише сліди  $\gamma$ -фази, тоді як після оброблення інструментом з нахиленими різнонаправленими пазами її вміст збільшується до 1,23 mass% ( $B(111) = 0,719$ ;  $B(311) = 1,234$ ;  $L = 16,4 \pm 1,2$  nm;  $\epsilon = 0,1\%$ ;  $\rho \cdot 10^{13} = 0,31$  cm<sup>-2</sup>;  $a = 3,6073$  nm;  $X_\gamma = 3,2\%$ ). Мартенситна фаза утворюється в обох зразках, однак, в останньому випадку збільшується відносна деформація ґратки  $\epsilon$  та зменшуються розміри зерен  $L$  (див. таблицю).

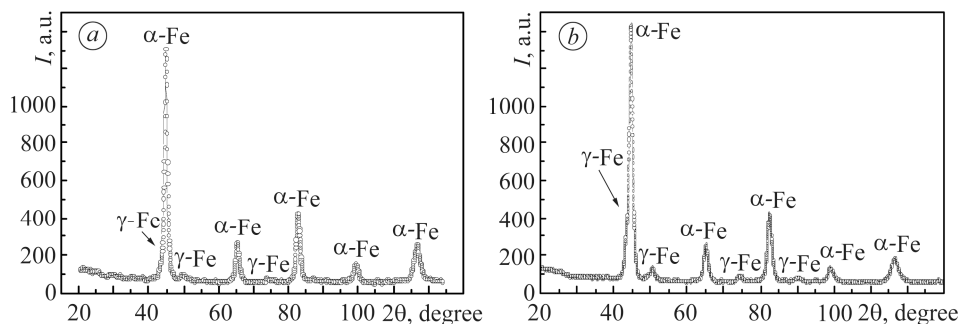


Рис. 5. Фрагменти дифрактограм сталі 40X після МІО інструментами з гладкою поверхнею (а) та з нахиленими різнонаправленими пазами (b).

Fig. 5. Fragments of diffractograms of surface layers of 40X steel after MPT by tools with plane surface (a) and with multidirectional inclined grooves (b).

**Рентгеноструктурні параметри  $\alpha$ -фази поверхневого шару сталі 40X після МІО інструментами з гладкою поверхнею (1) і з нахиленими різнонаправленими пазами (2)**

№ за/п	B(110)	B(310)	$L$ , nm	$\epsilon$ , %	$\rho \cdot 10^{13}$ , cm <sup>-2</sup>	$a$ , nm
1	0,682	1,552	10,7 $\pm$ 0,8	0,077	0,48	0,28654
2	0,873	1,807	8,6 $\pm$ 0,6	0,086	0,65	0,28642

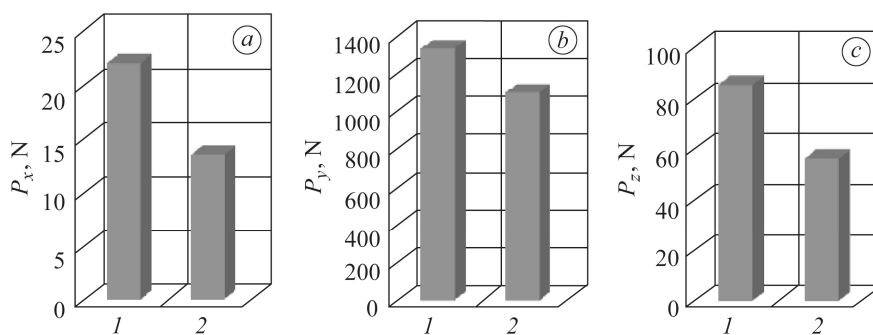


Рис. 6. Складники сили тертя  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  у зоні фрикційного контакту під час МІО інструментами з гладкою поверхнею (1) та з нахиленими різнонаправленими пазами (2).

Fig. 6. Components of the friction force  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  in the friction contact zone during MPT by tools with plane surface (1) and with multidirectional inclined grooves (2).

Складники сили тертя під час різнонаправленої деформації зменшуються (рис. 6). Найбільше – за абсолютним значенням сила  $P_y$ , що найсуттєвіше впливає на формування НКС, зокрема, на глибину зміцненого шару (рис. 6a). Знижен-

ня складників  $P_x$  і  $P_z$  (рис. 6b, c) пов'язано з поліпшенням умов змінання мікронерівностей вихідної поверхні та з переміщенням дислокаційної лінії між паралельними площинами ковзання в зоні фрикційного контакту під час МІО.

### ВИСНОВКИ

Деформування під час поверхневої наноструктуризації сталі 40Х спеціальним інструментом з різнонаправленими пазами поліпшує диспергування структури та сприяє появі залишкового аустеніту, а також зменшує складники сили тертя в зоні фрикційного контакту під час МІО через полегшення умов зародження та генерування дислокацій.

1. *Фрикційна поведінка електроіскрових покриттів за умов граничного мащення* / В. М. Голубець, В. М. Довгуник, М. І. Пашечко, С. А. Корній, Ю. С. Шпуляр // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 1. – С. 47–52.  
(*Friction behavior of electric-spark coatings under the conditions of boundary lubrication* / V. M. Holubets, V. M. Dovhunyuk, M. I. Pashechko, S. A. Kornii, and Y. S. Shpulyar // Materials Science. – 2020. – **56**, № 1. – P. 43–49.)
2. *Манько О. В., Стецько А. Є. Кінетика дифузійного хромування сталей з нікелькобальт-фосфорним покритвом* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 6. – С. 84–90.  
(*Man'ko O. V. and Stets'ko A. E. Kinetics of the diffusion chromium plating of steels with nickel-cobalt-phosphorous coating* // Materials Science. – 2020 – **55**, № 6. – P. 870–877.)
3. *Фрикційна поведінка залізовуглецевих 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* / М. М. Student, V. M. Dovhunyuk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi // Materials Science. – 2017. – **53**, № 3. – P. 359–367.)
4. *Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией.* – М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. *Mechanical fabrication methods of nanostructured surfaces* / Н. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, O. Zvirko // Handbook of modern coating technologies. Fabrication methods and functional properties. – Elsevier, Amsterdam, 2021. – P. 25–67.  
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-06047-4>
6. *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 wear resistance of medium-carbon steel by nanodispersion of surface of surface layers* // Materials Science. – 2012. – **48**, № 1. – P. 119–123.)
7. *Gurey V. and Hurey I. The Effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways* // Adv. Manufacturing Proc. Inter Partner 2019. Lecture Notes in Mechanical Eng. – Springer, Cham, 2020. – P. 63–72.
8. *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, and A. V. Shal'ko // Materials Science. – 2016. – **51**, № 6. – P. 833–838.)
9. *Influence of hydrogen on the mechanical properties of steels with the surface nanostructure* / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, and O. Maksymiv // Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface Studies. – Springer Proceedings in Physics. – 2015. – **167**. – P. 457–465.

10. *Воднева* проникність поверхневих нанокристалічних структур вуглецевої сталі / Г. М. Никифорчин, Е. Лунарска, В. І. Кирилів, О. В. Максимів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 5. – С. 67–73.  
(*Hydrogen permeability of the surface nanocrystalline structures of carbon steel* / H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. I. Kyryliv, and O. V. Maksymiv // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 5. – P. 67–73.)
11. *Fatigue and corrosion fatigue of the roll steels with surface nanostructure* / V. Kyryliv, B. Chaikovs'kyi, O. Maksymiv, and B. Mykutchak // *J. of Nano Res.* – 2018. – **51**. – P. 92–97.
12. *Новиков И. И.* Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.
13. *Патент* України на корисну модель № 134389, МПК В24В – u 2018 14042. Інструмент для формування наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин // І. В. Гурей, В. І. Гурей, Т. А. Гурей, В. І. Кирилів. – Опубл. 10.05.2019; Бюл. № 9.
14. *Каличак Т. Н., Кырылив 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 // *Materials Science*. – 1989. – **25**, № 1. – P. 96–99.)
15. *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.)
16. *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.
17. *Powder Diffraction File Search Manual: Alphabetical Listing and Search Section of Frequently Encountered Phases.* Inorganic 1974. – Philadelphia: JCPDS, 1974. – 839 p.

Одержано 17.02.2021