

УДК 620.197.16

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОТРИВКОСТІ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НАНОДИСПЕРГУВАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ

В. І. КИРИЛІВ

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

Досліджено співвідношення зносотривкості нормалізованої сталі 45 з поверхневою наноструктурою та сталі ШХ15 після гартування та низького відпуску в оливно-абразивному середовищі. Показано, що сталь 45 має вищу зносотривкість порівняно зі сталлю ШХ15. Це дає змогу замінити у вузлах тертя леговану сталь вуглецевою з поверхневою нанокристалічною структурою і одночасно підвищити її зносотривкість.

**Ключові слова:** *зносотривкість, нанокристалічна структура, середньовуглецева сталь, легована сталь.*

Проблема зносотривкості і сьогодні залишається актуальною. Часто робото-здатність деталей машин залежить саме від неї. Втрати від зношування у промислово розвинутих країнах досягають до 10% валового внутрішнього продукту. Одним із методів вирішення цієї проблеми є нанотехнології – створення на поверхні металу нанокристалічних структур (НКС), розміри зерен яких знаходяться в діапазоні 1...100 нм.

Інформація про унікальні властивості ультрадисперсних середовищ і їх якісно нове практичне використання дає змогу вважати, що переведення матеріалу в ультрадисперсний стан є такий же ефективний напрямок у матеріалознавстві, як різного виду термообробки і легування [1].

Найпоширенішим методом отримання наноматеріалів (НМ) є інтенсивна пластична деформація. Цим методом одержують об'ємні і поверхневі НКС. Методи отримання об'ємних НМ викладено в праці [2], а поверхневих – в праці [3] і одним з них є механоімпульсна обробка (МІО) [4, 5].

Відомо, що НКС мають високу зносотривкість [4, 6]. У промисловості переважно для підвищення зносотривкості використовують леговані сталі після гартування і низького відпуску. Мета цієї роботи – провести порівняльні дослідження зносотривкості середньовуглецевої сталі 45 з поверхневою наноструктурою та високовуглецевої гартованої сталі ШХ15.

**Методики досліджень.** Для досліджень вибрали середньовуглецеву конструкційну сталь 45 та високовуглецеву підшипникову сталь ШХ15. Сталь ШХ15 використовують у термообробленому стані для важконавантажених деталей високої твердості, зносотривкості і контактної міцності [7], а середньовуглецеву сталь 45 – у загартованому і покращеному стані для деталей високої в'язкості. Для досліджень сталь ШХ15 гартували і відпускали за температури 200°C до твердості *HV* 746...804. Сталь 45 вивчали у нормалізованому стані. Її поверхневу нанокристалізацію здійснювали МІО [5]. Фізична суть МІО полягає у нагріванні поверхневих шарів металу під час швидкісного тертя до температур вище точки фазових перетворень (1100...1600 К), одночасній термопластичній деформації і подальшому інтенсивному охолодженні зі швидкостями  $10^3...10^4$  К/с за рахунок відведення тепла із приповерхневих шарів у інструмент, деталь і технологічне се-

редовище (ТС). МІО заснована на принципах шліфувальних операцій. Її реалізують на токарних, кругло- або плоскошліфувальних верстатах шляхом їх незначної модернізації. В результаті МІО у приповерхневих шарах утворюються дрібнокристалічні структури зі зернами 20...100 нм, а мікротвердість сягає 6...12 ГПа. МІО проводили зміцнювальним інструментом із титанового сплаву ВТ6, використовуючи як ТС мінеральну оливу І-12А ГОСТ 20799-75 та спеціальне ТС для науглецювання [8] на оливній основі з додаванням низькомолекулярного поліетилену як вуглецевмісного джерела, та спеціальним інструментом для нанесення міді [9].

Фазовий склад поверхневих шарів сталей 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 с. Обробляли дифрактограми, використовуючи програмне забезпечення CSD [10]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [11].

Досліджували зносотривкість та визначали коефіцієнт тертя на машині тертя МІ-1М за схемою кільце-вкладка. Зносотривкість вивчали у оливно-абразивному середовищі, а коефіцієнт тертя – в оливі на зразках-кільцях діаметром 40 мм. Вкладки виготовляли зі сталі ШХ15. Як оливу використовували ТАП-30 з додаванням 0,1 mass.% кварцового піску дисперсністю до 40  $\mu\text{m}$  за навантаження 1,0 та 2,0 МПа і швидкості ковзання 0,9 м/с. За критерій зношування приймали втрату маси за певний проміжок часу (через 1 h). Зважували зразки на аналітичній вазі ВЛА-20г-М з точністю  $\pm 4 \text{ mg}$ .

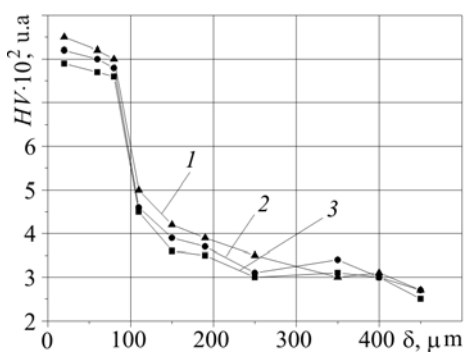


Рис. 1. Мікротвердість сталі 45 після МІО спеціальним зміцнювальним інструментом для нанесення міді (1), у спеціальному ТС для науглецювання (2) та мінеральній оливі (3).

Fig. 1. Microhardness of 45 steel after mechanical-pulse treatment (MPT) by special strengthening tools for rubbing with copper (1), in special technologic environment (TE) for carbonization (2) and in mineral oil (3).

науглецювання (рис. 2а, с, криві 3), порівняно зі зразками, обробленими в оливі (криві 2), пояснюється додатковим насиченням приповерхневих шарів вуглецем, який розміщується в основному на межах зерен [13] і згідно з працею [14] зміцнює їх, підсилюючи міжатомну взаємодію. Додаткове нанесення на поверхню та в приповерхневі шари міді спеціальним інструментом [9] знижує коефіцієнт тертя і призводить до подальшого підвищення зносотривкості (криві 4). Ці закономірності зберігаються за питомих навантажень 1 і 2 МПа (рис. 2а, с). Необхідно зазначити, що після МІО підвищується зносотривкість як оброблених кілець, так

**Обговорення результатів досліджень.** Оброблені МІО зразки зі сталі 45 мають дрібнокристалічну структуру мартенситно-аустенітного класу [5]. Розміри зерен у приповерхневих шарах знаходяться у межах 14...30 нм. Сталь 45 має підвищену мікротвердість (рис. 1) та понижений коефіцієнт тертя (див. таблицю). На поверхні зразків, оброблених у мінеральній оливі та середовищі для науглецювання, утворюються оксиди  $\text{FeO}$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Зростання зносотривкості зразків після МІО (рис. 2) пояснюється їх підвищеною мікротвердістю (рис. 1) та пониженим коефіцієнтом тертя. Зі зменшенням коефіцієнта тертя знижується адгезія і, відповідно, руйнівні процеси в трибосистемі. Вторинні структури додатково полегшують припрацювання пар тертя [12] і зменшують зношування. Вища зносотривкість зразків, оброблених у ТС для науглецювання (рис. 2а, с, криві 3), порівняно зі зразками, обробленими в оливі (криві 2), пояснюється додатковим насиченням приповерхневих шарів вуглецем, який розміщується в основному на межах зерен [13] і згідно з працею [14] зміцнює їх, підсилюючи міжатомну взаємодію. Додаткове нанесення на поверхню та в приповерхневі шари міді спеціальним інструментом [9] знижує коефіцієнт тертя і призводить до подальшого підвищення зносотривкості (криві 4). Ці закономірності зберігаються за питомих навантажень 1 і 2 МПа (рис. 2а, с). Необхідно зазначити, що після МІО підвищується зносотривкість як оброблених кілець, так

і необроблених вкладок (рис. 2b, d) однакової твердості за рахунок зниження коефіцієнта тертя пари кільце–вкладка.

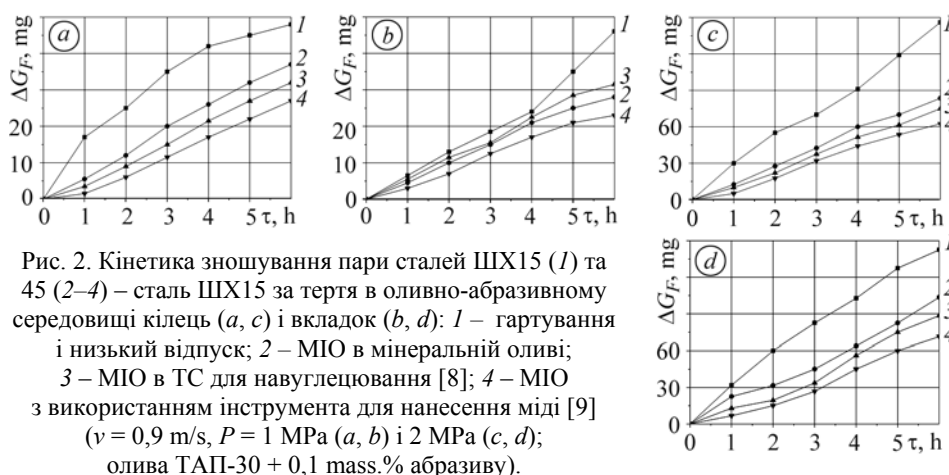


Fig. 2. Wear kinetics for the pair ШХ15 (1) and 45 (2–4) ШХ15 steels under friction in oil-abrasive environment of rings (a, c) and inserts (b, d): 1 – quenching and low tempering; 2 – MPT in mineral oil; 3 – MPT in TE for carbonization [8]; 4 – MPT using tools for rubbing with copper [9] ( $v = 0.9$  m/s;  $P = 1$  MPa (a, b) and 2 MPa (c, d); TAP-30 oil + 0.1 mass.% abrasive).

Зміна коефіцієнта тертя оброблених МІО зразків добре корелює із результатами [3] і пояснюється [15] зміною вкладання електронів  $d$ -орбіталей у металевий зв'язок. Підвищення міжатомної взаємодії всередині металу призводить до зниження міжатомної взаємодії поверхні. Це підтверджено в праці [16],

де показано, що через розрив тримірної періодичності об'ємного кристала електронні властивості поблизу поверхні сильно відрізняються від електронних властивостей в об'ємі. Реконструкція поверхні МІО вносить додаткові модифікації, які впливають на перерозподіл густини заряду у приповерхневій області і появу специфічних поверхневих так званих електронних станів. Електронна структура проявляється в таких властивостях поверхні, як поверхнева провідність і робота виходу. Додаткове зниження коефіцієнта тертя зразків після нанесення міді пояснюється її мастильними властивостями на поверхні металу [17], що призводить до утворення “сервовитної” плівки, яка впливає на зниження зношування.

Підвищення зносотривкості нормалізованих і оброблених МІО зразків зі сталі 45 порівняно з гартованими і низьковідпущеними зразками зі сталі ШХ15 сягає: для кілець у 1,3–1,8 рази і 1,5–2,0 рази для вкладок за питомого навантаження 1 МПа та в 1,8–2,2 рази для кілець і 1,4–2,0 рази для вкладок за питомого навантаження 2 МПа. Отже, нанокристалізація приповерхневого шару сталі 45 дає змогу замінити за показниками зносотривкості леговану сталь ШХ15 вуглецевою і додатково підвищити її роботоздатність у 1,3–2,2 рази.

## ВИСНОВКИ

Встановлено, що створення поверхневої нанокристалічної структури на сталі 45 забезпечує вищу зносотривкість порівняно зі сталлю ШХ15 після гартуван-

### Коефіцієнт тертя пар залежно від виду обробки поверхонь кілець та питомого тиску

Вид обробки	1 МПа	2 МПа
Шліфувана сталь ШХ15	0,16	0,14
МІО в мінеральній оливі	0,06	0,05
МІО в ТС для науглецювання	0,06	0,05
МІО з мідненням	0,05	0,04

ня і низького відпуску в оливно-абразивному середовищі. Отже, нанокристалізація поверхневого шару уможливило заміну легованих сталей вуглецевими з одночасним підвищенням зносотривкості, що є важливим чинником в умовах дефіциту ресурсної бази металургії.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано соотношение износостойкости нормализованной стали 45 с поверхностной нанокристаллической структурой и стали ШХ15 после закалки и низкого отпуска в масляно-абразивной среде. Показано, что сталь 45 имеет высшую износостойкость сравнительно со сталью ШХ15. Это дает возможность заменить в узлах трения легированную сталь углеродистой с поверхностной нанокристаллической структурой и одновременно повысить ее износостойкость.

*SUMMARY.* Wear resistance of normalized 45 steel with surface nanocrystal structure is investigated as well as of ШХ15 steel after quenching and low tempering in oil abrasive environment. It is also shown that 45 steel has a higher wear resistance in comparison with ШХ15 steel. It allows the alloyed steel replacing in the friction unit the carbon steel with the surface nanocrystal structure and to increase its wear resistance.

1. *Морохов И. Д., Трусов Л. И., Лановок В. Н.* Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
2. *Валиев Р. З., Александров И. В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
3. *Васильев М. А., Прокопенко Г. И., Филатова В. С.* Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) // Успехи физ. мет. – 2004. – 5. – С. 345–399.
4. *Бабей Ю. И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 240 с.
5. *Поверхнева* нанокристалізація сталей високошвидкісним тертям / Г. М. Никифорчин, В. І. Кирилів, Н. В. Крет, В. А. Волошин // Наукові нотатки. – Луцьк, 2007. – С. 325–329.
6. *Никифорчин Г. М., Кирилів В. І., Волошин В. А.* Фізико-механічні властивості приповерхневих нанокристалічних структур, отриманих високошвидкісним тертям // Сб. докл. IX Междун. научно-технического конгресса термистов и металлосведов / Под ред. И. М. Неклюдова и В. М. Шулаева, (21–25 апреля 2008). – Харьков, 2008. – Т. 2. – С. 170–177.
7. *Тылкин М. А.* Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Металлургия, 1981. – 648 с.
8. *А. с. 1678858 СССР, МКИ<sup>5</sup> С21Д 5/00, С23С 8/00.* Способ упрочнения поверхности изделий / Т. Н. Каличак, В. И. Кырылив, А. И. Сошко и др. – Опубл. 23.09.91, Бюл. № 23.
9. *А. с. СССР, МКИ<sup>5</sup> В24В 39/04.* Инструмент для фрикционного поверхностного упрочнения / В. И. Кырылив, Т. Н. Каличак. – Опубл. 15.02.92, Бюл. № 6.
10. *Use of the CSD program package for structure determination from powder data / L. G. Akselrud, Yu. M. Gryn<sup>o</sup>, P. Yu. Zavalii et al.* // Abstr. of the 2nd European Powder Diffraction Conf., Enschede, The Netherlands, 1992. – Material Science. – 1993. – Vol. 41. – P. 133–140.
11. *Powder Diffraction File 1973: Search manual alphabetical listing and search section of frequently encountered phases.* – Inorganic-Philadelphia, 1974.
12. *Тушинский Л. И.* Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
13. *Кирилів В. І.* Поверхнєве легування сталей при механоімпульсній обробці: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 1997. – 16 с.
14. *Гликман К. Э., Брувер Р. Э.* Равновесная сегрегация на границах зерен и интеркристаллитная хладноломкость твердых растворов // Металлофизика. – 1972. – 43, Вып. 42. – С. 42–63.
15. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А. В. Белого, Н. К. Мышкина. Под ред. А. И. Свириденка. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
16. *Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лившиц, А. А. Саранин и др.* – М.: Наука, 2006. – 490 с.
17. *Долговечность* трущихся деталей машин / Под ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1990. – Вып. 5. – 368 с.

Одержано 06.07.2011