

УДК 622.245.002.4

КОНТАКТНА ВТОМА СТАЛІ 20ХНЗА З ПОВЕРХНЕВОЮ НАНОСТРУКТУРОЮ

В. І. КИРИЛІВ¹, Б. П. ЧАЙКОВСЬКИЙ², О. В. МАКСИМІВ¹, А. В. ШАЛЬКО²

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

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

Вивчено контактну втому долотної сталі 20ХНЗА після цементації та шліфування з поверхневою нанокристалічною структурою, сформованою механоімпульсною обробкою за різних режимів оброблення. Досліджували в оливі та воді з кварцовим піском за максимальних робочих навантажень на долото. Показано, що поверхнева нанокристалічна структура підвищує контактну довговічність сталі у різних робочих середовищах порівняно зі шліфуванням і залежить від режимів механоімпульсної обробки.

Ключові слова: нанокристалічна структура, механоімпульсна обробка, контактна втома, долотна сталь 20ХНЗА.

Сьогодні значний інтерес викликають нанокристалічні структури (НКС) з високими експлуатаційними властивостями та технології їх отримання. У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України розроблено технологію механоімпульсної обробки (МІО) для отримання поверхневих НКС з використанням енергії високошвидкісного тертя. Показано [1, 2] залежність фізико-механічних властивостей таких структур від технологічних режимів оброблення. Важливою характеристикою несучої здатності деталей машин є їх опір руйнуванню за контактних навантажень. Це важливо для підшипників кочення, зубчатих передач, бурильних доліт, деталей металургійної оснастки тощо. Опір руйнуванню матеріалів за таких умов вивчений мало.

Здебільшого контактна втома характеризується тими ж ознаками, що й інші види втомного руйнування, але її відмінністю є ще більша локалізація напружень, ніж за звичайної втоми. Стан матеріалу за контактних навантажень характеризується перш за все великими градієнтами напружень, їх локалізацією у відносно невеликих об'ємах поблизу поверхні і значними діючими напруженнями за дво- і тривимірної системи [3]. Оскільки такі напруження нерідко в невеликих об'ємах біля поверхні деталей перевищують границю пружності та призводять до виникнення тріщин, то якість поверхневих шарів суттєво впливає на їх робоздатність [4, 5].

Встановлено [3] складну взаємодію поверхонь з проковзуванням у межах контактної ділянки навіть за нормального стиску тіл і значну дію сил тертя на напружений стан матеріалу поблизу поверхні контакту. Переміщення зони контакту викликає циклічну зміну напружень. Щоб визначити вплив циклічності контактних напружень, розглядають механізм контактних деформацій за пульсуючого контакту кочення і кочення з проковзуванням [6], оскільки саме з цим пов'язане обмеження несучої здатності опор кочення.

У реальних умовах статичного стиску деталей, крім нормального тиску, діють значні тангенціальні зусилля, які намагаються зсунути одну із поверхонь відносно іншої. Додаткові зовнішні тангенціальні сили впливають на розподіл напружень у зоні контакту, призводячи до зменшення глибини залягання ділянок

з максимальними дотичними напруженнями, збільшуючи контактну площу проковзування навколо центральної зони зчеплення, а також суттєво змінюючи напруження у крайньому поверхневому шарі поблизу ділянки контакту. Розроблено [3] гіпотезу про можливу втрату стійкості поверхневих шарів під дією напружень стиску. Згідно з нею, тонкий шар матеріалу, пластично деформований попередніми навантаженнями, не маючи підтримки із зовнішньої сторони, втрачає повздовжню стійкість і випучується (рис. 1). Повздовжня стійкість залежить від товщини зміцненого поверхнього шару. При цьому між розглядуваним і нижче розміщеними шарами виникають розтягувальні напруження і деформації, які досягають такого значення, що порушується суцільність матеріалу і утворюється первинна підповерхнева тріщина, яка розвивається у прогресуючий пітинг.

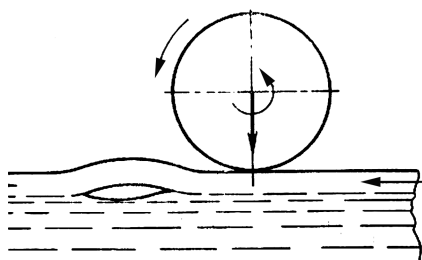


Рис. 1. Схема випучування тонкого поверхнього шару і утворення підповерхневої тріщини під впливом залишкових напружень стиску [3].

Fig. 1. The scheme of the thin surface layer buckling and formation of undersurface crack affected by residual compressions [3].

Здебільшого тріщини утворюються на поверхні навіть за відсутності значних залишкових напружень стиску, а інколи і там, де є залишкові напруження розтягу. Однак втрата повздовжньої стійкості поверхнього шару під дією дотичної складової на контактні кочення можлива за значних напружень стиску, які діють вздовж поверхні попереду контакту. Такі напруження і відповідні деформації можливі за тертя ковзання, коли його коефіцієнт високий, а нормальні тиски на контактні невисокі і не можуть викликати значних напружень розтягу поблизу зони контакту.

Мета роботи – вивчити опір контактному-втомному руйнуванню долотної сталі 20ХН3А з поверхневою наноструктурою в різних робочих середовищах залежно від товщини зміцненого поверхнього шару.

Матеріал і методики досліджень. Досліджували сталь 20ХН3А, яку використовують для виготовлення лап бурильних доліт. Циліндричні кільцеві зразки діаметром 35 mm досліджували після цементації на глибину 1,5...1,7 mm, гартування і низькотемпературного відпуску. Твердість поверхнього шару HRC 58...59. Після цього зразки шліфували та частину з них зміцнювали МІО з використанням різних режимів інструментом зі сталі 40Х та титанового сплаву ВТ6 (див. таблицю). Контактну втому вивчали на трироликівій машині [7] за суцільного змащування індустріальною оливою І-50А (ГОСТ 20799-88) або водою з додаванням кварцового піску. Вода з кварцовим піском моделює умови, що виникають за промивання свердловини під час буріння. Контактне навантаження для досліджень вибирали 5000 МПа, що відповідає робочим навантаженням на кулькові доріжки бурильного долота за максимальних навантажень у зоні буріння [8]. Початок руйнування фіксували автоматичним вимикачем [9]. Фазовий склад поверхневих шарів сталі після зміцнювальної обробки вивчали на дифрактометрі-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 програмне забезпечення CSD [10]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [11]. Мікротвердість вимірювали на твердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g.

Обговорення результатів. Виходячи із наведеного у праці [3] положення про залежність повздовжньої стійкості від товщини зміцненого шару, вибирали різні режими зміцнення зразків. Вони повинні забезпечувати якомога більшу

глибину зміцнення та плавний перехід від зміцненого поверхневого шару до основи без провалів мікротвердості в перехідній зоні, оскільки саме там можуть зароджуватись підповерхневі тріщини. Для порівняння вибирали такі режими оброблення (див. таблицю). Вони забезпечують різну товщину і мікротвердість зміцненого поверхневого шару (рис. 2).

Режими зміцнення зразків МІО

№ за/п	Зразки	Матеріал зміцнювального інструменту	Частота обертання зразка, s^{-1}	Час обробки, s	Поперечна подача, mm
1	Шліфовані	–	–	–	–
2	Зміцнені МІО	Сталь 40Х	3,83	8	0,40
3			5,75	15	0,25
4			3,83	15	0,40
5		Титановий сплав ВТ6	3,83	15	0,40

Рентгенівські дослідження структури зміцненого шару зразків показали, що у всіх випадках утворюється мартенситно-аустенітна структура. Зерно мартенситу здрибнене до 21,9 та 17 nm для режимів № 4 і 5, відповідно.

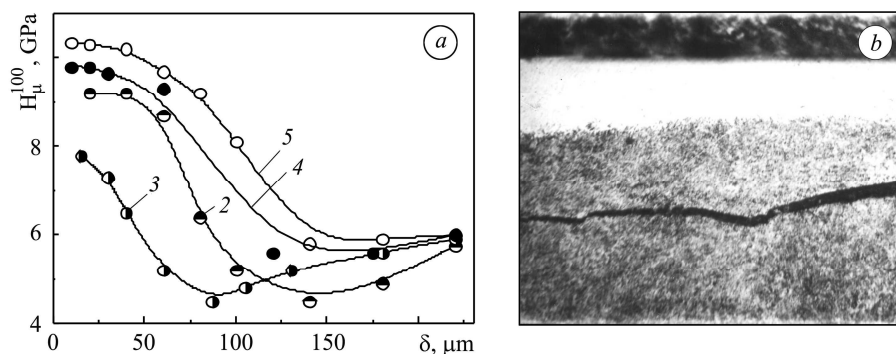


Рис. 2. Мікротвердість (а) сталі 20ХН3А після МІО за різних режимів (криві відповідають номерам режимів у таблиці) та місце зародження тріщини в цементованих зразках після МІО (b).

Fig. 2. Microhardness (a) of 20ХН3А steel after mechanical-pulse treatment (MPT) with different parameters (curves correspond to the regime numbers in the Table) and the place of crack initiation in cemented specimens after MPT (b).

Згідно із побудованими кривими мікротвердості (рис. 2), найсприятливішими є режими № 4 і 5, що відповідають вищенаведеним критеріям. Саме вони забезпечують найвищу опірність контактній втомі в оливі та у воді з кварцовим піском (рис. 3). Однак у водному середовищі опірність контактним навантаженням суттєво знижується. Причиною цього є, очевидно, дія середовища, яке під впливом термо- і механодеструкції розпадається з утворенням радикалів водню і кисню. Під впливом контактних напружень стиску і зсуву вони проникають у приповерхневі шари. Показано [12], що в наноструктурних металах, отриманих інтенсивною пластичною деформацією, з'являються низькотемпературні аномалії зерномежевої дифузії: значне (на декілька порядків) збільшення коефіцієнтів і зменшення (майже у два рази) енергії активації дифузії порівняно із крупнокристалічним станом. Причому, як показано раніше [1], у водному середовищі концентрації "шкідливих елементів" (водень, кисень) [13] вищі, ніж в оливі, що пришвидшує руйнування зміцненого поверхневого шару. Це підтверджено і в працях [14, 15], де виявлено, що під час тертя у воді деформація поверхневих шарів металу супроводжується насиченням приміжових областей структурних фрагмен-

тів не тільки атомами вуглецю, але і атомами кисню, що проникає в метал із робочого середовища через термомеханічну деструкцію молекул води у точках контакту мікронерівностей. Це призводить до виникнення у примежових областях структурних фрагментів метастабільних атомних кластерів Fe–O–C, що є октапоурою ОЦК-заліза, у центрі якої знаходиться атом кисню, а два атоми заліза на вершинах заміщені атомами вуглецю.

Ці кластери і атоми заліза кристалічної ґратки розділяють області з пониженою електронною густиною, які виникають у результаті зниження електронної густини s- і p-електронів і збільшення просторової локалізації валентних d-електронів на атомах заліза, що оточують атоми кисню і вуглецю. Це призводить до обмеженої участі валентних електронів у формуванні зв'язків між атомами заліза кристалічної ґратки і атомами кластерів і, як наслідок, відносно легкому їх руйнуванню під час зміцнення структурних елементів уздовж утворених кластерами меж [14, 15].

Зміцнення зразків за різними режимами, зокрема частотою їх обертання і глибиною врізання, впливає на рівень і характер розподілу мікротвердості та товщину зміцненого шару. Як відомо [16], зменшення частоти обертання призводить до збільшення товщини зміцненого шару через зростання часу перебування оброблюваної поверхні в зоні фрикційного контакту, температури на поверхні та в глибині. Так само впливає збільшення глибини врізання. Однак зростання цих параметрів призводить до оплавлення поверхневого шару і відповідно зменшення його товщини. Така зміна відбувається за глибини врізання більше 0,4 mm. Тому оптимальними є режими зміцнення № 4 і 5 – частота обертання $3,83 \text{ s}^{-1}$ та глибина врізання 0,4 mm [16]. Саме за цих режимів спостерігали найвищу мікротвердість, значну товщину та плавний перехід твердості до основної матричної структури. Такі умови, згідно з працею [3], є найсприятливішими для високої опірності дії контактних навантажень, що і підтверджено цими дослідженнями.

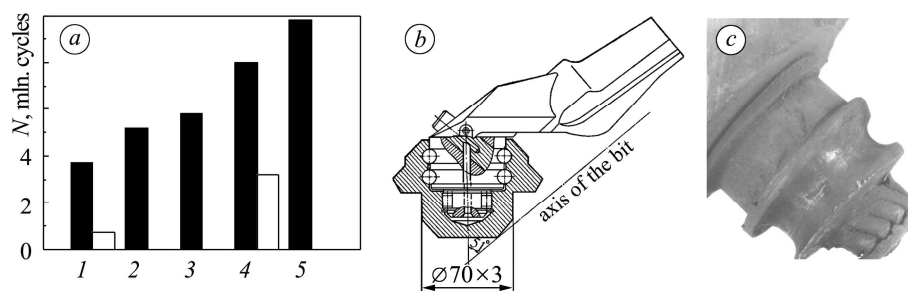


Рис. 3. Контактна довговічність сталі 20XН3А після цементації і шліфування та МІО за різних режимів (а); загальний вид лапи бурильного долота у зборі (b) та після її експлуатації (с): 1 – цементація і шліфування; 2–5 – цементація + МІО за різними режимами зміцнення; ■ – індустріальна олива; □ – вода і кварцовий пісок.

Fig. 3. Contact durability of chisel steel 20XН3А after cementation, grinding and MPT with different parameters of strengthening (a); the general view of the assembled drilling bit leg (b) and after exploitation (c): 1 – cementation and grinding; 2–5 – cementation and MPT under different conditions; ■ – industrial oil; □ – water and quartz sand.

У робочих умовах найнавантаженішою ділянкою лапи бурильного долота є крайня доріжка, яка служить внутрішньою обоймою роликів підшипника (рис. 3b). На ній, виходячи зі співвідношення діаметрів, виникають найбільші контактні напруження і саме ця ділянка лімітує ресурс роботи багаторядного комбінованого підшипника пари лапа–шарошка.

ВИСНОВКИ

Таким чином, дослідження показали, що використання механоімпульсної обробки для формування поверхневої нанокристалічної структури на долотній

сталі 20ХН3А після цементації та шліфування підвищує її контактну довговічність в оливі та воді з кварцовим піском, яка залежить від режимів оброблення та використовуваного робочого середовища.

РЕЗЮМЕ. Исследовано контактну виносливість долотной стали 20ХН3А после цементации и шлифования с поверхностной нанокристаллической структурой, сформированной механоимпульсной обработкой с различными режимами упрочнения. Исследования проведено в индустриальном масле и воде с кварцевым песком при максимальных рабочих нагрузках на долото. Показано, что поверхностная нанокристаллическая структура повышает контактную виносливість в различных рабочих средах сравнительно со шлифованием и зависит от режимов механоимпульсной обработки.

SUMMARY. The contact fatigue of chisel steel 20ХН3А is investigated after cementation and grinding with surface nanocrystalline structure formed by mechanical pulse treatment with different parameters. The investigations have been carried out in the oil and water solution with quartz sand with maxima working loads on the chisel. It is shown that the surface nanocrystalline structure improves the contact durability in different working media compared with grinding and depends on the mechanical pulse treatment parameters.

1. *Nykyforchyn H., Kyrlyiv 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.* – Inbunden: Springer, 2014. – P. 31–41.
2. *Бабей Ю. И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 240 с.
3. *Пунегин С. В.* Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 243 с.
4. *Fulita K. and Yoshida A.* Damaging behaviour of roller under rolling contact stress // *Proc. 16th Jap Congr. Mater. Res. Kyoto.* – 1973. – P. 132–139.
5. *Tricot R.* Influence des paramètres metalurgiques sur la fatigue de contact en roulement-grissconent des contact en engrenages // *Congr. mond. Engren.* – 1977. – **1**. – P. 795–811.
6. *Johnson K. L.* A review of the theory of rolling contact stresses // *Wear.* – 1966. – **9**, № 1. – P. 4–19.
7. *Долговечность буровых долот / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Н. Пашков, В. М. Пубарх.* – М.: Недра, 1977. – 256 с.
8. *Стойкость буровых долот / Под ред. К. Б. Кацова.* – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.
9. *Стришевский А. И.* Электронный автоматический выключатель в машинах для испытания на контактную виносливість // *Заводская лаборатория.* – 1959. – № 9. – С. 1136–1137.
10. *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.
11. *Powder Diffraction File 1973: Search manual alphabetical listing and search section of frequently encountered phases.* – Inorganic-Philadelphia, 1974.
12. *Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю. Р. Колобов, Р. З. Валиев, Г. П. Грабовецкая и др.* – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.
13. *Гликман К. Э., Брувер Р. Э.* Равновесная сегрегация на границах зерен и интеркристаллитная хладноломкость твердых растворов // *Металлофизика.* – 1972. – **43**, вып. 42. – С. 42–63.
14. *Тихонович В. В.* Роль активных элементов рабочей среды в формировании наноструктурных износостойких поверхностных слоев трения стали // *Тезисы IV Междун. науч. конф. “Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии” НАНСИС-2013 (19–22 ноября 2013).* – Киев, 2013. – С. 575.
15. *Горский В. В.* Физическая природа и свойства легированных кислородом сплавов Ме–Ме’–О в зоне контакта металлов при трении: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – К., 1989. – 41 с.
16. *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., Kyrlyiv V. I., Fenchyn S. V.* Mechanopulsed hardening of long components of the hydraulic cylinder rod type // *Materials science.* – 1989. – **25**, № 1. – P. 96–99.)

Одержано 08.04.2015