

УДК 621.785

Т.В. Лоскутова, В.Г. Хижняк,
П.М. Волошановський, О.В. Хижняк,
К.В. Гольштейн

АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОМПЛЕКСНИХ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ НАЯВНОСТІ ТИТАНУ, ВАНАДІЮ, ХРОМУ ТА АЛЮМІНІЮ НА СТАЛІ У8А

Вступ

Використання захисних покриттів з метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин, інструментів, які експлуатують в умовах зношування, загальновідоме [1–3]. Особливий інтерес становлять вироби, які працюють в умовах абразивного зношування. Для розробки зносостійких покриттів і практичних рекомендацій щодо їх використання необхідно враховувати методику випробувань та умови експерименту [1, 4, 5].

У працях [4–6] було показано залежність абразивної зносостійкості металів, сплавів, захисних покриттів від твердості. Для конструкційних, інструментальних сталей встановлено лінійне збільшення зносостійкості із зростанням твердості [4]. Водночас за результатами публікацій [5, 7, 8] факт лінійної абразивної зносостійкості не підтверджується. Аналіз відомих теоретичних уявлень [4, 6] показав, що однозначний зв'язок твердість–зносостійкість виконується не завжди. Матеріали однакової твердості можуть відрізнятися між собою структурою, фазовим складом, тріщиноустійкістю.

Неоднозначність лінійної залежності абразивна зносостійкість–твердість навели дослідників на пошуки інших характеристик матеріалу, які давали можливість прогнозувати стійкість покриттів в умовах абразивного зношування. За результатами досліджень абразивної зносостійкості сталей різного класу після гартування та низького відпуску автори праці [9] дійшли висновку, що найкраще, порівняно з іншими параметрами, зносостійкість відповідає межі міцності та плинності. Це пов'язано з механізмом дії абразивної частинки на поверхню тертя при випробуванні. На думку авторів [9], межі міцності та плинності можуть бути мірою опору переміщення абразивної частки поверхнею тертя, при якому відбувається пружна, пластична деформації та руйнування матеріалу. В

той же час твердість є лише мірою опору проникнення індентора в матеріал і, отже, характеризує пружність та плинність останніх.

Постановка задачі

У даній статті була поставлена актуальна задача визначення мікротвердості, мікрокрихкості покриттів на сталі У8А, адгезії покриттів з основою та встановлення взаємозв'язку отриманих ефективних характеристик з параметрами абразивної зносостійкості.

Методика і техніка експерименту

Результати випробувань на абразивну зносостійкість істотно залежать від запропонованої методики [1, 4, 7, 8]. Нами було використано два методи випробувань. В обох методах покриття взаємодіє з абразивом – карбідом бору у вигляді порошку крупністю 100–150 мкм. У першому методі контактна взаємодія покриття з абразивом відбувається у фіксованому місці (закріпленій абразив). У процесі випробування утворюється лунка з інтенсивним зношуванням матеріалу в центрі зони контакту. Можливе зношування не тільки покриття, але й основи. При другому методі відбувається рівномірне руйнування покриття абразивом по всій поверхні (випробування вільним абразивом) [1]. Можна вважати, що в реальних умовах експлуатації існують обидва варіанти зношування. Величина зносу визначалась за зміною маси зразків після певного часу випробувань. Вимірювання маси відбувалося на аналітичних вагах з точністю до четвертого знаку. Коефіцієнт збільшення абразивної зносостійкості визначався як відношення втрати маси за одиницю часу вихідного зразка до такого ж показника зразка з покриттям.

Експериментальні результати та їх обговорення

Для розробки нових зносостійких покриттів та отримання практичних рекомендацій з їх застосування необхідно провести порівняльні випробування вихідних матеріалів та матеріалів із покриттями.

Аналіз результатів дослідження процесів зношування вільним абразивом захисних покриттів на сталі У8А показав, що ряд, в якому розміщуються покриття, при зростанні зносостійкості добре збігається з рядом розміщення

покриттів із збільшення показника мікрокрихкості (таблиця). У працях [9–11] при розробці моделі зношування в потоці абразиву використано уявлення механіки контактного руйнування з використанням таких характеристик матеріалу, як твердість, модуль пружності, тріщиностійкість.

У [8–13] наведено результати експериментальних досліджень і показано існуючий взаємозв'язок між мікротвердістю, мікрокрихкістю, мікроміцністю покриттів та абразивною зносостійкістю.

Мікрокрихкість і мікроміцність покриттів визначались за методикою [14] при аналізі кривої вдавлювання алмазної піраміди Віккерса на приладі ПМТ-3. При руйнуванні покриття і утворенні тріщини довжиною C на кривій залежності навантаження–деформація формується площадка при навантаженні P_T . Виникнення площадки зумовлено виділенням енергії при утворенні тріщини. Площа під кривою дорівнюватиме роботі індентора під час пружно-пластичної деформації покриття. Під час утворення тріщини частина пружної енергії буде витрачатися на утворення нової поверхні тріщини. Таким чином, зміна пружної деформації і розмір тріщини дають можливість визначити параметр тріщиностійкості тонкого шару.

У випадку руйнування покриття при торцевому до поверхні навантаженні утворюється тріщина довжиною C при навантаженні на інденторі P_T . У [13, 14] запропоновано використати для характеристики міцності покриття для реальних умов напруженого стану величину мікроміцності (σ_{MM}), яка визначалась за виразом

$$\sigma_{MM} = P_T / C^2.$$

При відомих навантаженні утворення тріщини P_T , довжині тріщини C , максимальному навантаженні на інденторі (1Н) P_H та діагоналі відбитка d_n визначався показник мікрокрихкості γ за формулою

$$\gamma = 1,854 P_H C^2 / P_T d_n^2.$$

Таким чином, мікроміцність та показник мікрокрихкості є ефективними характеристиками покриття, які відповідають його фазовому складу, структурі, дефектності, напруженому стану. Можна вважати, що величина P_H / d^2 характеризує мікротвердість, P_H / C^2 – мікроміцність.

Фазовий склад та деякі властивості дифузійних покриттів на сталі У8А наведено в таб-

Таблиця. Фазовий склад та властивості дифузійних покриттів на сталі У8А

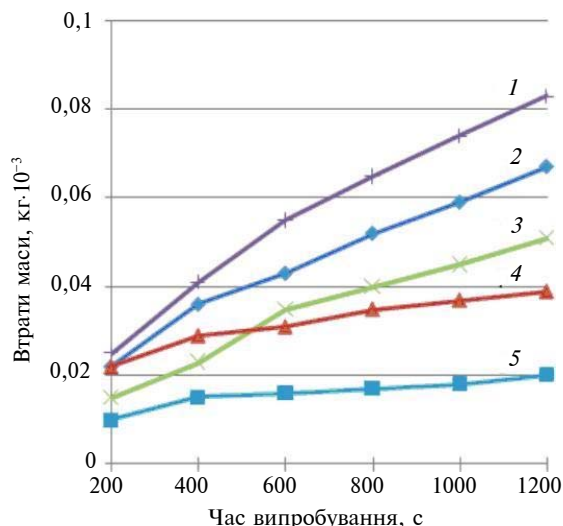
| Вид обробки | Фазовий склад покриття | Товщина, мкм | Мікротвердість, ГПа | Навантаження утворення тріщини P_T , Н | Розміри тріщини C , мкм | Мікроміцність σ_{MM} , МПа | Показник мікрокрихкості γ | Напруження відшарування покриття $\sigma_{вп}$, МПа | Коефіцієнт збільшення зносостійкості при вібруванні вільним абразивом |
|-------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Титанування | TiC | 16,5 | 39,5 | 0,50 | 39,0 | 328,7 | 120,4 | 61,0 | 6,5 |
| Титанованадієхромовання | (Ti,V,Cr)C | 18,0 | 34,5 | 0,55 | 35,0 | 449,0 | 76,9 | 120,0 | 3,9 |
| Ванадіювання | V ₂ C | 4,0 | 21,0 | – | – | – | – | – | – |
| | VC | 12,0 | 28,2 | 0,40 | 32,0 | 390,6 | 65,6 | 115,0 | 3,8 |
| Ванадієхромовання | (V,Cr)C | 13,5 | 23,7 | 0,50 | 30,0 | 555,6 | 42,7 | – | – |
| | (Cr,Fe,V) ₇ C ₃ | 3,0 | 17,5 | – | – | – | – | 180,0 | 3,0 |
| Хромовання | Cr ₂₃ C ₇ | 7,0 | 16,0 | 0,75 | 33,0 | 687,7 | 23,2 | – | – |
| | Cr ₇ C ₃ | 11,5 | 17,1 | 0,70 | 34,0 | 605,5 | 28,5 | 220,0 | 1,9 |
| Титаноалітування | Fe(Ti,Al) ₄ O | 10,0 | 10,0–12,0 | 0,40 | 50,0 | – | – | – | – |
| | TiC | 14,5 | 34,5 | – | – | 160,0 | 62,5 | – | 3,2 |
| | Fe ₃ (Al) | 35,0 | 1,5–3,0 | – | – | – | – | – | – |
| Азототитаноалітування | Fe ₂ (TiAl) ₄ O | 16,5 | 13,5–17,0 | 0,50 | – | – | – | – | – |
| | TiC | 4,5 | 32,0 | – | 52,0 | 184,9 | 91,9 | – | – |
| | TiN | 6,0 | 28,6 | – | – | – | – | – | 4,3 |

лиці. Максимальний показник мікрокрихкості встановлено для покриття на основі карбіду титану TiC. Останнє зумовлено, як вже зазначалось, високою мікротвердістю шару TiC – 39,5 ГПа, а також значним розміром мікротріщини – 39,0 мкм. Мікротвердість хромованого шару на основі карбідів Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ та азоттитаноалітованого на основі $Fe_2(Ti, Al)_4(O, N)$ практично однакова – 16,0–17,0 ГПа. В той же час, показник мікрокрихкості карбідохромових шарів набагато менший, ніж шару інтерметаліду $Fe_2(Ti, Al)_4(O, N)$, а напруження відшарування, навпаки, – майже в три рази більше.

Аналіз випробувань абразивної зносостійкості покриттів на сталі У8А показав значну кореляцію отриманих результатів з показниками мікрокрихкості. Так, мікротвердість покриттів на основі карбіду титану TiC перевищує мікротвердість шару на основі карбіду хрому $Cr_{23}C_6$ в 2,5 рази, показник мікрокрихкості – в 5,2 рази, абразивна стійкість – в 6,8 рази. Зрозуміло, що показник мікрокрихкості набагато точніше характеризує абразивну зносостійкість покриттів, ніж інші показники.

Результати дослідження зносостійкості сталі У8А у вихідному стані (гартування та низькотемпературний відпуск, твердість 60–62 HRC) та з покриттями наведені на рисунку.

Аналіз отриманих даних показав, що зно-



Абразивне зношування закріпленим абразивом сталі У8А у вихідному стані та з покриттями; навантаження – 9,8 Н; швидкість – 0,159 м/с; 1 – загартована та відпущена сталь без покриття; 2 – титаноалітування; 3 – титанування; 4 – азотування з наступним титаноалітуванням; 5 – хромування

состійкість сталі У8А з покриттям підвищується в 1,3–4,1 рази. Ефект підвищення стійкості зумовлений як високою мікротвердістю окремих складових покриттів, параметрами тріщиностійкості, так і особливостями структури. В порядку збільшення стійкості в умовах абразивного зношування закріпленим абразивом досліджені в роботі покриття, за способами нанесення, можна розташувати в ряд: титаноалітування–титанування–азоттитаноалітування–хромування.

Аналіз причин відмінності параметрів зносостійкості досліджених покриттів встановив, що титаноалітування супроводжується формуванням і утворенням на поверхні сполук при наявності титану, алюмінію, заліза, мікротвердість яких поступається мікротвердістю шару на основі карбіду титану та нітриду титану. Швидкість зношування цього шару для обох комплексних покриттів приблизно однакова для часу 200 і 300 с. За цей час покриття руйнується в місці самого значного контакту до основи. При подальшому зношуванні для обох комплексних покриттів протидіє композиція. При титаноалітуванні – це поверхнева зона карбід титану–твердий розчин α -заліза, при азоттитаноалітуванні – поверхнева зона карбід титану–нітрид титану–основа.

Остання композиція виявилася за взятих умов стійкішою за покриття на основі карбіду TiC при часі випробування, більшому за 600 с, але поступилася покриттям на базі карбідів хрому.

Висновки

Визначено, що залежно від технології хіміко-термічної обробки на поверхні сталі У8А формуються карбідні, багатшарові карбонітридні та покриття при наявності карбідів, нітридів і інтерметалідів. За методикою кінетичної мікротвердості визначено мікроміцність та тріщиностійкість покриттів.

Найвищу зносостійкість при випробуванні закріпленим абразивом показали азоттитаноалітована та хромова сталь У8А. Зносостійкість порівняно з вихідною збільшилась відповідно в 2,1 і 4,1 рази.

Зносостійкість покриттів при випробуванні вільним абразивом визначається показником мікрокрихкості γ : чим вище γ , тим більша зносостійкість. Зносостійкість титаноалітованої та азоттитаноалітованої сталі У8А перевищує зносостійкість вихідної після гартування та відпуску (60–62 HRC) відповідно в 3,2 і 4,3 рази, титаноалітованої – в 6,5 рази.

Т.В. Лоскутова, В.Г. Хижняк, П.Н. Волошановский,
О.В. Хижняк, Е.В. Гольштейн

АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПЛЕКСНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ УЧАСТИИ ТИТАНА, ВАНАДИЯ, ХРОМА И АЛЮМИНИЯ НА СТАЛИ У8А

Приведены результаты исследований влияния диффузионной металлизации титана, ванадия, хрома на фазовый состав, структуру и абразивную износостойкость стали У8А. Абразивная износостойкость определялась двумя методами: закрепленным и свободным абразивом, в качестве которого использовался в обоих методах карбид бора. Установлено, что диффузионные покрытия при участии карбидов, нитридов переходных металлов, интерметаллидов повышают абразивную износостойкость стали У8А в 2,1–4,3 раза. Показано влияние микротвердости и трещиностойкости, которую определяли за методом кинетической микротвердости, на абразивную износостойкость.

T.V. Loskutova, V.G. Hignyak,
P.M. Voloschanowskij, O.V. Hignyak,
K.V. Golshtein

ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE DIFFUSIVE COVERAGES OBTAINED BY OF THE TITAN, VANADIUM, CROME AND ALUMINIUM ON У8А STEEL

This paper presents the research results of the influence of diffusive metal coating by titan, vanadium, and chrome on the phase composition, structure and abrasive wear resistance of У8А steel. Using fixed and loose boron carbide abrasive, we establish the abrasive wear resistance. Crucially, we determine that diffusive carbide coverages, nitrides of transition metals, intermetallic compounds increase the abrasive wear resistance of У8А Steel by 2,1–4,3 times. By employing the method of kinetic microhardness, we demonstrate the impact of microhardness and fracture toughness on the abrasive wear resistance.

1. Лоскутов В.Ф., Хижняк В.Г., Куницкий Ю.А. и др. Диффузионные карбидные покрытия. — К.: Техника, 1991. — 168 с.
2. Самсонов Т.В., Епик А.П. Тугоплавкие покрытия. — М.: Металлургия. — 400 с.
3. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. — М: Металлургия, 1985. — 256 с.
4. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970.
5. Брыков Н.Н., Брыков М.Н. Проблема сопротивления сталей и сплавов абразивному изнашиванию // Пробл. трибологии. — Хмельницький: ТУП, 2006. — № 1. — С. 93–97.
6. Torrance A.A. Modelling abrasive wear // Wear. — 2005. — 258. — P. 281–293.
7. Хижняк В.Г., Король В.И. Состав и некоторые свойства карбидных покрытий на стали ХВГ // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2002. — № 9. — С. 67–68.
8. Хижняк В.Г., Лоскутова Т.В., Москаленко Ю.Н., Король В.И. Структура та зносостійкість карбідних покриттів з ніобієм та хромом на сталі У8А // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2002. — № 6. — С. 94–97.
9. Виноградов В.Н., Сорокин Т.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
10. Дворук В.І., Герасимова О.В. Вплив структурного стану на абразивне руйнування сталі. Тертя та зношування // Наук.-техн. збірник. — К.: НАУ, 2007. — Вип. 47. — С. 82–94.
11. Lamy B. Effect of brittness and sliding speed on the morphology of surface scrating in abrasive of erosive process // Tribology Int. — 1984. — 17, N 1. — P. 35–38.
12. Evans A.G., Gulden M.E., Rossenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastics response regime // Proc. Roy, Lond., Ser. A. — 1978. — 361, N 1706. — P. 343–365.
13. Хижняк В.Г., Помарин Ю.М., Курило Н.А., Медова Ц.Ю. Диффузионные покрытия на основе карбидов титана, ванадия и хрома на стали У8А // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 30–33.
14. Хижняк В.Г., Дудка А.И., Хижняк О.В. Определение микрохрупкости карбидных покрытий с использованием методов технической микротвердости // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1996. — № 9. — С. 83.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
24 травня 2010 року