

УДК 621.791.

В. Д. КУЗНЕЦОВ, В. М. ПАЩЕНКО, І. В. СМІРНОВ, Д. В. СТЕПАНОВ

Національний технічний університет України «КПІ», Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ РІЗНОГО СКЛАДУ В УМОВАХ ТЕРТЯ БЕЗ МАЩЕННЯ ТА АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Показано, що вибір матеріалів при відновленні поверхонь наплавленням для різних видів зношування ускладнюється загальним характером існуючих рекомендацій. Рекомендовані композиції з різним складом і структурою не мають прямої кореляції між твердістю і зносостійкістю. Встановлено, що для умов тертя без мащення доцільно використання наплавлених композицій зі структурою метастабільного аустеніту і напилених покриттів на нікелевій основі, а для умов абразивного зношування – високохромистого чавуну.

Ключові слова: *тертя без мащення, абразивне зношування, зносостійкість, наплавлені шари, напилені покриття*

Вступ. При відновленні поверхонь деталей наплавленням існують певні рекомендації щодо вибору матеріалів для конкретних видів зношування. Так, у роботі [1] за результатами обробки документа 11-1303 (11E-221-96) Міжнародного інституту зварювання «Система класифікації сплавів для відновлювального і зміцнювального наплавлення» надані рекомендації щодо вибору матеріалів на основі поділення їх композицій і мікроструктур. Наприклад, для умов тертя металу по металу і дії ударних навантажень виділені структурні групи, а саме: мартенсит, зміцнений карбідами МК1; аустеніт марганцевий тип А2; аустеніт хромомарганцевий тип А3; аустеніт типів 2 і 3, зміцнений карбідами А2К, А3К.

Для прикладу у табл. 1 наведена вибірка з характеристиками структурних груп, що рекомендовані для зносостійкого наплавлення поверхонь для умов ударних навантажень і тертя металу по металу.

Як свідчать дані таблиці кожна з вказаних структурних груп має високий опір при терті металу по металу і дії ударних навантажень, але вибір матеріалу для наплавлення ускладнюється як достатньо широким діапазоном змін хімічного складу композицій у межах окремої структурної групи, так і залежністю типу структури від умов охолодження при наплавленні.

Можна також скористатися рекомендаціями розробленого стандарту (Еп 14700) ДСТУ Еп 14700 «Зварювальні матеріали – Зварювальні матеріали для наплавлення», дія якого поширюється на наплавлення поверхонь нових деталей і заготовок, а також на ремонт поверхонь деталей наплавленням, які повинні протистояти механічному, хімічному, тепловому або їх комбінованій дії [2].

Стандарт передбачає класифікацію наплавлювальних матеріалів на підставі хімічного складу наплавленого металу, а також містить дані по властивостях сплавів різних типів, їх структурі і твердості і рекомендації по застосуванню найбільш поширених типів наплавочних сплавів. Наприклад, матеріали на залізобуглецевій основі поділені на 20 видів з умовними позначками Fe 1–Fe 20. У межах кожного із поділених видів сплаву вказаний також широкий діапазон зміни легуючих елементів, зокрема по вуглецю, хрому, нікелю, марганцю. У рекомендаціях, наприклад, для зношування при терті вказані види сплавів Fe 1, Fe 2, Fe 3, Fe 9, що мають різний хімічний склад при мартенситній структурі.

Таблиця 1

Основні характеристики і область застосування наплавних сплавів

| Показник | Структурна група наплавних матеріалів | | | |
|---------------------------------|--|--|---|--|
| | МК1 | A2 | A3 | A2K, A3K |
| Хімічний склад, % | (0,5–1,5)%C, Cr+W+Mo+V(Co)= 7–16% | (0,7–1,2)%C, Mn+Cr+Ni= =13–25%; звичайно 12–14% (Mn+Cr) і/або Ni | (0,5–0,7)%C, Mn+Cr= =25–35% | (0,9–1,7)%C, Mn+Cr+Nb= =15–30% |
| Мікроструктура | Мартенсит з сіткою карбідів в стані після наплавлення. | Аустеніт або аустеніт, зміцнений карбідами. | Аустеніт. Термічна обробка не бажана | Аустеніт з дрібно-дисперсними карбідами |
| Твердість | 55–62HRC в стані після наплавлення. | Приблизно 200HB у стані після наплавлення | Приблизно 200HB в стані після наплавлення | 250–300HB в стані після наплавлення. В процесі роботи – зміцнення до 45HRC |
| Опір ударним навантаженням | Високий | Високий | Високий | Високий |
| Опір при терті метала по металу | Високий | Високий | Високий | Високий |

Відмічені обставини також ускладнюють вибір існуючих на ринку матеріалів при відновленні поверхонь для різних видів зношування. У зв'язку з цим, для умов тертя металу по металу як і для інших видів зношування, актуальним є накопичення експериментальних даних в рамках тих хімічних складів сплавів, що рекомендовані для цього виду зношування.

Мета роботи – порівняльна оцінка зносостійкості наплавлювальних матеріалів різного хімічного складу і структур, рекомендованих для умов тертя металу по металу та абразивного зношування.

Матеріали та методики досліджень. Згідно [1; 2] досить високу зносостійкість в умовах тертя металу по металу за наявності навантажень забезпечують матеріали з мартенситною матрицею, зміцненою карбідами, а також з метастабільною структурою марганцевого і хромомарганцевого аустеніту, схильного до деформаційного зміцнення і фазового наклепу. Для умов абразивного зношування також рекомендовані композиції з мартенситною матрицею та високохромистого чавуну.

Отримання таких структур, особливо при відновленні зношених поверхонь наплавленням, визначається не лише хімічним складом наплавлювальних матеріалів, але і умовами охолодження. У зв'язку з цим отримання структур мартенситного типу, аустенітного з твердими складовими, ледебуритного визначалося як

підбором складу наплавлювальних матеріалів, так і погонними енергіями наплавлення, використовуючи в дослідженнях покриті електроди і порошкові дроти.

Для умов тертя без змащення випробували також покриття, отримані повітряно-плазмовим напиленням, оскільки ця технологія не потребує попереднього підігріву, у більшості випадків притаманного для наплавлення. Хімічний склад наплавлених та напилених поверхневих шарів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад поверхневих шарів

| Склад поверхневого шару | Масова доля у відсотках | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|------|-----|------|------|-----|-----|------|------|---|
| | C | Cr | Mn | Ni | Si | Mo | V | Ti | Cu | B |
| Наплавлені шари | | | | | | | | | | |
| 50XГН | 0,5 | 1,1 | 0,8 | 1,7 | 0,43 | 0,5 | – | 0,4 | – | |
| 60X20Г9Н2МД | 0,62 | 20,8 | 9 | 2 | 0,55 | 0,5 | – | – | 0,17 | |
| 30X5Г5 | 0,27 | 4,5 | 5 | – | 0,2 | – | – | 0,08 | | |
| 50Г11М | 0,5 | 0,2 | 11 | 0,08 | 0,8 | 0,3 | – | – | – | |
| 20X13Г6Н6МФД | 0,22 | 13 | 5,8 | 6 | 0,6 | 1,4 | 0,4 | – | 0,9 | |
| 10X10Г10 | 0,11 | 11 | 11 | | | | | 1 | | |
| 50X8СРТ | 0,5 | 8 | | | 1 | | | 1 | | 1 |
| 80X20Р3Т | 0,8 | 20 | | | | | | 1 | | 3 |
| Напилені покриття | | | | | | | | | | |
| Порошок СНГН– 50 | 0,6 | 14 | 1 | 78 | 3,5 | | | | | 3 |
| Порошок NiCr | | 38 | | 62 | | | | | | |

Триботехнічні випробування проводили на машині тертя типу М-22, принцип роботи якої полягає в тому, що нерухомий зразок у вигляді колодки притискається до циліндричної поверхні диска, який обертається. Використовували зразки довжиною 20 мм та шириною 10 мм із вифрезерованою циліндричною поверхнею у вигляді сегмента радіусом R 20 мм та хордою 20 мм.

Для контртіла використовували диск Ø 40мм, який виготовляли зі сталі Р65 твердістю 300-350НВ. Умови випробувань: тиск на зразок – $p = 0,5 \pm 0,1$ МПа; швидкість тертя – $v = 3 \pm 0,25$ м/с; температура випробувань – $t = 60^\circ \pm 20^\circ\text{C}$; тривалість випробувань – 1 год.

Зразки зважували до i після випробувань на точних лабораторних вагах із похибкою 0,0001 г. Масове зношування визначали як різницю значень маси зразка до та після випробувань.

Випробування на абразивне зношування проводили на установці ЛКІ -3 шляхом вимірювання втрат маси через кожні 30 м шляху тертя. У якості абразиву використовувався електрокорунд марки 14А зернистістю (0,4–1,0) мм. Зразки для випробування виготовлялися циліндричної форми. Зразки випробувалися за постійного зусилля навантаження, що складало 150 Н. Загальний шлях тертя становив 300 м. Після кожних 30 м шляху тертя, зразки вимірювалися на терезах ВЛТ-1 (для визначення зміни маси) і проводилось їх обертання на 90° для рівномірного зношування. Інтенсивність зношування I_m знаходили як відношення втрат маси до шляху тертя.

Аналіз структур проводили за стандартними методиками оптичної металографії.

Основний зміст і результати роботи. Досліджували композиції наплавленого металу, які відповідають структурним групам і, відповідно, хімічному скла-

ду, що рекомендовані для умов тертя металу по металу із навантаженням та абразивного зношування.

Для прикладу на рис. 1 наведені основні з досліджених структур. Для випробувань на тертя ковзанням застосовували еталонний зразок (контртіло) рейкової сталі Р75, що має у стані постачання структуру трооститу (рис. 1, *a*) із твердістю 285 НВ. Композиція наплавленого металу 50ХГН має структуру мартенситного типу (рис. 1, *б*); 60Х20Г9Н2МД аустеніто-мартенситну (рис. 1, *б*) і 10Х10Г10 аустенітну з карбідною складовою (рис. 1, *в*). Для умов абразивного зношування композиція наплавленого металу 50Х8СРТ має безструктурний мартенсит (рис. 1, *д*) і композиція 80Х20Р3Т – ледебурит з боридною евтектикою (рис. 1, *е*).

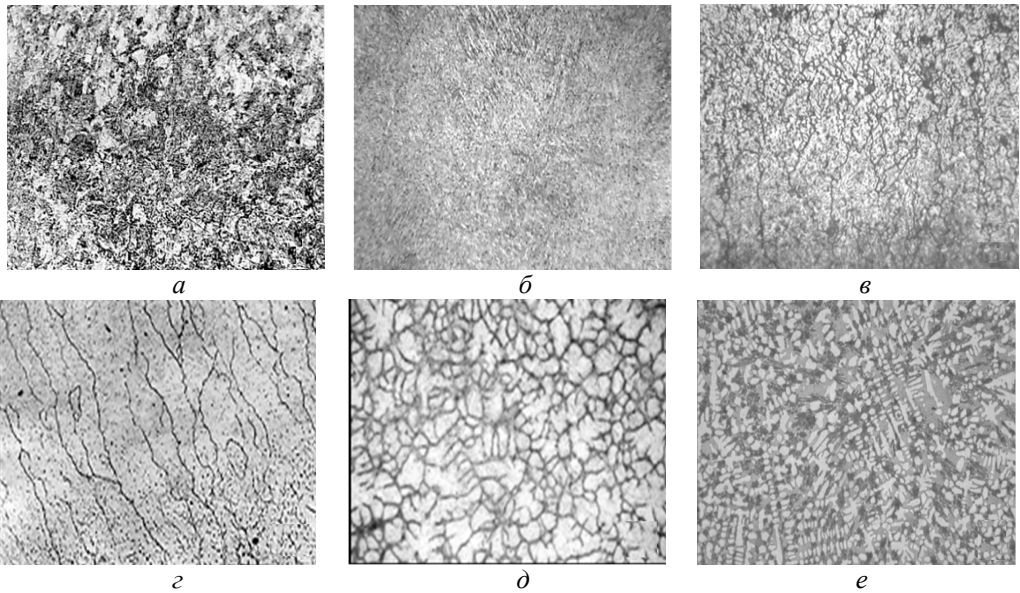


Рис. 1. Мікроструктури досліджених композицій наплавленого металу: *a* – Р75; *б* – 50ХГН; *в* – 60Х20Г9Н2МД; *г* – 10Х10Г10; *д* – 50Х8СРТ; *е* – 80Х20Р3Т ($\times 500$)

Результати випробувань довели, що у більшості випадків не спостерігається взаємозв'язок між твердістю та зносостійкістю (табл. 2). Композиції зі структурами мартенситного типу (50ХГН, 30Х5Г5) мають підвищену твердість (42HRC) порівняно із трооститною основою (32HRC) при показниках зношування приблизно однакових ($\Delta m = 0,08 - 0,012$). З іншого боку, типи наплавленого металу 20Х13Г6Н6МФД і 50Г11М мають приблизно однакову твердість – (13–15)HRC, але значно відрізняються за зносостійкістю – $\Delta m = 0,062$ і $0,11$ відповідно.

Мінімальне зношування $\Delta m = 0,022$ має високолегований наплавлений метал 60Х20Г9Н2МД із аустенітно-мартенситною структурою і твердістю на рівні еталонного зразка 31HRC. У цілому, за показниками зношування композиції метастабільного аустеніту (60Х20Г9Н2МД, 20Х13Г6Н6МФД, 10Х10Г10) значно перевищують більш тверді матеріали (50ХГН, 30Х5Г5). Виключенням є композиція високомарганцевого аустеніту 50Г11М, для якої, можливо, не повною мірою реалізовані умови фазового наклепу під час проведення випробувань (недостатнє навантаження).

Випробування на абразивне зношування показали, що інтенсивність зношування також не корелюється із твердістю матеріалу. Так, композиція високохромистого чавуну 80Х20Р3Т при меншій твердості 46HRC порівняно із композицією

50X8CPT (57HRC) відрізняється меншою інтенсивністю зношування як на початку, так і наприкінці шляху тертя ((0,0033 – 0,0018) і (0,0065 – 0,005), відповідно). Випробування зразків із покриттями показало їх досить високу стійкість до зношування (табл. 3), хоча характер зношування двох видів матеріалів істотно відрізнявся.

Таблиця 3

Результати випробувань

| Склад поверхневого шару | Структура | Твердість, HRC контртіло/зразок | Зношування, Δm , г | Інтенсивність зношування, кг/м |
|--|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| P75 (еталон - контртіло) | троостит | 30/32 | 0,12 | |
| Наплавлені шари (сухе тертя) | | | | |
| 50XГН | бейніто-мартенситна суміш | 30 /42 | 0,08 | |
| 60X20Г9Н2МД | Аустенітно мартенситна | 30/ 31 | 0,022 | |
| 30X5Г5 | сорбіт | 30/42 | 0,11 | |
| 50Г11М | Високомарганцевий аустеніт | 30/13 | 0,11 | |
| 20X13Г6Н6М ФД | Аустеніт | 30/ 15 | 0,065 | |
| 10X10Г10 | Хромомарганцевий аустеніт | 30/28 | 0,05 | |
| Наплавлені шари (абразивне зношування) | | | | |
| 50X8CPT | Безструктурний мартенсит | 57 | | 0,0065 – 0,005* |
| 80X20P3T | Ледебурит+боридна евтектика | 46 | | 0,0033 – 0,0018* |
| Напилені покриття (сухе тертя) | | | | |
| Порошок СНГН– 50 | | 30/45 | 0,026 | |
| Порошок NiCr | | 30/29 | 0,007 | |

Примітка: * перша цифра–інтенсивність зношування на початку шляху тертя,остання – наприкінці шляху тертя

У покриттях із ніхрому, які піддавались наступному нагріванню плазмою до температур (900 – 1000) °С спостерігалось досить швидке зношування основного шару покриття і різке зниження темпу зносу на перехідному шарі між покриттям і основою. Інтегральне значення зношування досить низьке і становило порядку $\Delta m = 0,007$ г при твердості матеріалу покриття HRC (27 – 29).

Механізм підвищення зносостійкості доки не зовсім ясний, але, згідно [5; 7] підвищення стійкості до стирання може бути результатом «аномального масопереносу» у перехідній зоні між покриттям і основою при напиленні сплавів на нікелевій основі і наступній термообробці.

При цьому можлива поява досить широкої перехідної зони, збагаченої компонентами покриття із сполуками, що утворилися під час термічної обробки покриття, у тому числі в результаті взаємодії з киснем і азотом повітря довкілля. Ширина перехідної зони при плазмовому напиленні становить (100 – 150) мкм.

При подальшому нагріванні плазмового покриття глибина проникнення нікелю, хрому зростає до 0,5 мм.

Покриття із сплавів, що самофлюсуються, після плазмового напилення складається із пересиченого хромонікелевого розчину, бориду нікелю, бориду і карбідів хрому, а також, можливо, складних сполук типу карбоборидів (Cr, Fe, Ni) *n*, (B,C) *m*.

Оксиди металів, що утворюються у покритті, розчиняються з утворенням скловидних шлаків, які спливають на поверхню покриття. При цьому досягається висока міцність зчеплення за рахунок дифузійних процесів, що відбуваються у контактній зоні «покриття–основа» [6].

Зразок із напиленим і оплавленим покриттям показав дещо гірші результати за зносостійкістю ніж у попередньому випадку, але зношування відбувалося у межах маси покриття без участі у процесі перехідної зони між покриттям і основою.

Висновки:

1. Досліджено зносостійкість і структури наплавленого металу різних типів. Показано, що не спостерігається взаємозв'язок між твердістю та зносостійкістю як для структур мартенситного, так аустенітного типів. При меншій твердості структури аустенітного типу мають більш високу зносостійкість.

2. Встановлено, що з досліджених типів наплавленого металу різних систем легування оптимальне поєднання властивостей для умов тертя без змащення метала по металу має наплавлений метал 10X10Г10.

3. Показано, що напилені покриття на нікелевій основі відрізняються високою зносостійкістю і для умов сухого тертя можуть розглядатися як технологічна альтернатива наплавленню.

4. Встановлено, що для умов абразивного зношування за показниками зносостійкості доцільно застосовувати композиції високохромистого чавуну.

Список літератури

1. Мазель Ю.А. Классификация сплавов на основе железа для восстановительной и упрочняющей наплавки/ Ю. А. Мазель, Ю. В. Кусков, Г. Н. Полищук // Сварочное производство. 1999. – № 4. – С. 35–38.

2. Рябцев И.И. Гармонизация стандартов на наплавочные материалы в соответствии с требованиями европейского стандарта EN 14700 «Сварочные материалы – Сварочные материалы для наплавки» / И.А. Рябцев, Н.А. Проценко // Сварщик, 2007. – № 6(67). – С. 30–36.

3. Попов В.С. Износостойкость сплавов, восстановление и упрочнение деталей машин. Под редакцией Попова В. С. – Издательский комплекс ОАО «Мотор Сич», Запорожье, 2006. – 420 с.

4. Виноградов В.Н. Износостойкость сталей и сплавов / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин М.: Нефть и газ.– 1985, – 417 с.

5. Спиридонов Н.В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин/ Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов – Минск: Выш. шк., 1988. – 155 с.

6. Некоторые особенности формирования контактной зоны при газотермической металлизации самофлюсующимися сплавами на основе никеля / Е.Г. Гинзбург, О.С. Кобяков, В.А. Розанцев, Н.В. Спиридонов // Порошковая металлургия. – 1986. – № 10. – С.47–50.

V. D. KUZNETSOV, V. M. PASCHENKO, I. V. SMIRNOV, D. V. STEPANOV

COMPARISON OF WEAR RESISTANCE OF SURFACE LAYERS DIFFERENT COMPOSITIONS UNDER DRY FRICTION AND ABRASION

It is shown that the choice of materials to restore the surfaces by weld surfacing for different types of wear is complicated because of general character of existing recommendations. According to the results of experimental studies and tests for conditions of dry friction of metal on metal recommended compositions with martensitic and metastable austenite structures have no direct correlation between the hardness and wear resistance. More hard martensitic compositions do not have the higher wear resistance than the less hard composition of the austenitic type. The lack of correlation between the hardness and wear resistance is also observed in the compositions of high chrome cast iron and structureless martensite which are recommended for abrasive wear conditions. It was found that for the conditions of dry friction it is expedient to use the compositions and structures of metastable austenite and for the conditions of abrasive wear - high chrome cast iron. It is shown that wear resistance for the conditions of dry friction sprayed coatings on nickel-base much higher than the studied compositions of deposited layers.

Key words: dry friction, abrasion, wear, weld surfacing layers, sprayed coatings

Кузнецов Валерій Дмитрович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерії поверхні Національного технічного університету України «КПІ», v.kuznetsov@kpi.ua.

Пашенко Валерій Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії поверхні Національного технічного університету України «КПІ».

Смирнов Ігор Володимирович – д-р. техн. наук, професор, кафедра інженерії поверхні Національного технічного університету України «КПІ», smirnovkpi@gmail.com.

Степанов Денис Володимирович – асистент кафедри інженерії поверхні Національного технічного університету України «КПІ», schweiser1@gmail.com.