

УДК 669.01:621.762:621.89:621.9.048

Т.А. Роїк, В.В. Холявко, Б.П. Зора,
О.С. Луфференко

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ АНТИ- ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СТАЛЕВИХ ВІДХОДІВ

Вступ

Розвиток сучасної техніки в різних галузях промисловості, передусім у машинобудуванні, надав проблемі підвищення довговічності устаткування, обладнання, механізмів величезної значущості.

Еволюція техніки вимагає підвищення якості високопродуктивного обладнання, що тісно пов'язано з розвитком матеріалознавства в машинобудуванні та зумовлює потребу в нових матеріалах з вищим рівнем службових властивостей.

Ресурс роботи машин та устаткування здебільшого визначається здатністю машин чинити опір різним видам контактної взаємодії. У цьому випадку найважливіше місце серед матеріалів, з яких виготовлене обладнання, займають матеріали тертьових пар, зокрема антифрикційні матеріали. Це особливо важливо для вузлів тертя, що працюють у важких умовах – при підвищених навантаженнях, в агресивних середовищах, за високих температур (500–600 °С), оскільки 80 % відмов у роботі машин та агрегатів відбувається саме через вихід з ладу тертьових деталей [1]. Зазначені явища властиві насамперед устаткуванню металургійної та вугільної промисловості, транспортним засобам і нагрівальним установкам термічних цехів тощо.

Тому на сьогодні проблема створення нових антифрикційних матеріалів, здатних істотно подовжити термін корисного використання високотемпературних підшипників та забезпечити надійність їх роботи постає надзвичайно гостро.

З цього приводу слід зазначити, що в сучасному машинобудуванні є великі сировинні резерви – шламові відходи чорних та кольорових металів і сплавів, які з'являються на операціях шліфування різального інструменту, штампів, кулькопідшипників тощо. Наразі вони безповоротно відвозяться у відвали і не використовуються у подальшому виробництві. Вказані

металеві відходи містять у своєму складі значну кількість цінних легувальних елементів – мідь, вольфрам, ванадій, хром, нікель, ніобій, кремній, титан, кобальт та ін. Наявність у шламових відходах зазначених елементів робить їх привабливими при подальшому використанні для одержання нових якісних матеріалів антифрикційного призначення [2–8].

Постановка задачі

Дослідженнями [2–5] встановлено, що для важких умов роботи антифрикційних високотемпературних матеріалів певна комбінація легувальних елементів у металевій матриці та наявність у складі композиту твердої змащувальної речовини здатні забезпечити високий рівень експлуатаційних властивостей підшипників. Проте досі залишаються не визначеними природа зміцнення і високої антифрикційності матеріалів із використанням широкої гами сталевих відходів та яким чином технологічні режими виготовлення матеріалів впливають на формування комплексу їх властивостей, що задовольняють умови експлуатації.

Метою досліджень, які розглядаються в статті, було визначення принципів формування структури та її вплив на природу зміцнення і антифрикційності композитних антифрикційних високотемпературних матеріалів на основі відходів штампованої сталі 5Х3ВЗМФС.

Методика проведення експериментів

Вибір металевої основи та антизадирних домішок [9] при створенні нових матеріалів спричинений, по-перше параметрами умов роботи матеріалу, а по-друге, саме властивості основи високотемпературних антифрикційних матеріалів визначають необхідний рівень фізико-механічних характеристик композиту, від яких залежить несуча здатність підшипників. Крім того, металева основа матеріалу при високих робочих температурах має забезпечувати перебіг у матеріалі таких фізико-хімічних процесів, які можуть зумовити утворення при терті вторинних структур, що відповідають за високу антифрикційність матеріалу.

Сталь 5Х3ВЗМФС (ГОСТ 5950–73) належить до категорії сталей підвищеної теплостійкості, тобто таких, які до температур 600 °С зберігають свою твердість і міцність, що свого часу було використано при розробці даної марки штампової інструментальної сталі. Тому

шліфувальні відходи сталі 5Х3В3МФС було вибрано як матеріал основи антифрикційних композитів, призначених для роботи при температурах 600 °С на повітрі.

У важких і надто важких умовах роботи антифрикційного матеріалу [8], коли серед навантажувальних чинників наявний вплив високих температур навколишнього середовища і жодне рідке мастило не є працездатним, дуже важливо захистити поверхні тертя від зчеплення та інтенсивного зношування.

Враховуючи досить високу термічну і хімічну стабільність багатьох лужноземельних металів, що застосовуються як твердозмащувальні речовини, твердим мастилом для високотемпературного антифрикційного матеріалу ми вибрали фторид кальцію (CaF_2) у припущенні, що за його наявності у важких умовах функціонування матеріал підшипників буде відповідати вимогам антифрикційності [8, 9].

Дослідні зразки виготовляли, застосовуючи технологію порошкової металургії. Шліфувальні відходи сталі 5Х3В3МФС після підготовчих операцій очищення від забруднень абразивними частинками та відновлювального відпалу змішували з порошками високотемпературного твердого мастила фториду кальцію (CaF_2) протягом чотирьох годин [10]. Масовий вміст CaF_2 становив 3–7 %, що було викликано такими причинами [11]:

- масовий вміст фториду кальцію, менший за 2–3 %, є недостатнім для виконання ним функцій твердого мастила, бо зменшується його відтворюваність на поверхні тертя і знижується антифрикційність матеріалу;

- масова концентрація CaF_2 , більша за 7–8 %, у матеріалах на основі заліза призводить до істотного втрачання матеріалом його конструкційної міцності, наслідком чого може бути вихід із ладу підшипника і вузла тертя в цілому.

Подальше пресування проводили з використанням гідравлічного пресу ПСУ-125 при тиску 700–900 МПа та спікали в середовищі водню при температурах 1100–1150 °С протягом двох годин [5,7].

Таким чином, було одержано зразки матеріалів, форма і розміри яких відповідали вимогам проведення фізико-механічних та триботехнічних випробувань, складів, %:

5Х3В3МФС + 3 % CaF_2 ;

5Х3В3МФС + 5 % CaF_2 ;

5Х3В3МФС + 7 % CaF_2 .

Зразки після спікання мали пористість 10–11 %.

Результати досліджень і їх аналіз

В результаті зазначених операцій виготовлення матеріалів на основі відходів сталі 5Х3В3МФС з домішками CaF_2 сформувалась їх складна гетерофазна металографічна структура. Вона складається з металевої матриці, в якій залягають частинки твердого мастила CaF_2 , що видно з рис. 1.

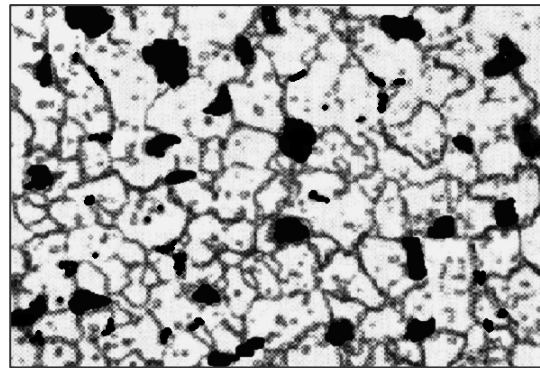


Рис. 1. Мікроструктура матеріалу 5Х3В3МФС + 5 % CaF_2 ; травлено лужним розчином, $\times 400$

У свою чергу, структура металевої матриці і зокрема матеріалу 5Х3В3МФС + 5 % CaF_2 ферито-перлітна і складається з високолегованого α -твердого розчину і зерен складних карбідів легувальних елементів. У доєвтектонічної сталі 5Х3В3МФС α -фаза містить до 50 % хрому і невелику кількість W, Mo, Si та V [12], тобто частку карбідів легувальних елементів, частина яких первинні, що утворилися ще на етапі кристалізації сталі й спричинили утворення перліту зернистої форми.

Для сталі 5Х3В3МФС властива наявність складних карбідів легувальних елементів: типу Me_{23}C_6 – це, зокрема, складні карбіди хрому (Cr, Fe, Mo, W, V) $_{23}\text{C}_6$; карбіди Me_6C – це складні карбіди вольфраму та молібдену (Cr, Fe, Mo, W, V) $_6\text{C}$, що не схильні [12] до коагуляції та ефективно затримують зростання зерна при нагріванні.

Карбіди Me_6C переважають у сталі 5Х3В3МФС. Крім зазначених, в ній також присутні карбіди ванадію типу MeC-VC , які утворюються, як відомо [12], за умови вмісту ванадію 0,9–2,0 %, що відповідає розгляданому випадку (у сталі 5Х3В3МФС кількість V становить 1,5–1,8 %). Карбіди ванадію – най-

твердіші в сталі 5Х3В3МФС (їх твердість сягає 20ГПа), тому вони можуть істотно підвищити зносостійкість матеріалу.

Загалом кількість карбідної фази в матеріалі матриці композитів 5Х3В3МФС + CaF₂ становить 12–13% за об'ємом.

Кремній у перліті сталі 5Х3В3МФС підвищує температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення [12] і тим самим сприяє збільшенню теплостійкості антифрикційного матеріалу. Крім того, кремній, гальмуючи дифузію інших елементів, сприяє збереженню дрібного зерна, зміцнює ферит, підвищуючи твердість матеріалу, яка зберігається при температурах його експлуатації.

Наявність у складі матеріалу ніобію (у сталі 5Х3В3МФС масовий вміст Nb становить 0,05–0,15%), як відомо [12], поліпшує стан меж зерен завдяки утворенню карбідів із стехіометричною формулою NbC (рис. 2), що сприяє підвищенню ударної в'язкості матеріалу [9].

Електронна мікрофотографія (рис. 3) ілюструє дрібні частинки NbC, які іноді утворюють ряди.

Отже, після спікання матеріалів на основі високолегованих порошків – відходів сталі

5Х3В3МФС з домішками CaF₂ сформувалася структура антифрикційних композитів, яка забезпечує оптимальну комбінацію фізико-механічних та антифрикційних характеристик, значення яких наведено в таблиці.

Антифрикційні властивості матеріалу визначали на високотемпературній машині тертя ВМТ-1 в парі з контртілом із сталі Р18 (52–54 HRC) при навантаженнях 3,0–8,8 МПа, швидкості ковзання 1 м/с і температурі 600 °С на повітрі.

Аналіз результатів досліджень, наведених у таблиці, показує, що нові матеріали (складом 1–3) порівняно з відомим (складом 4) [1], який використовують нині в аналогічних умовах (при температурах до 400 °С і навантаженнях 3 МПа), мають значно вищі як фізико-механічні, так і антифрикційні властивості, а також здатні працювати в умовах більш жорстких режимів тертя.

Комплекс легувальних елементів у металевій основі (відходи сталі 5Х3В3МФС), що утворюють гетерогенну структуру матриці матеріалу, зокрема, при наявності дисперсних карбідів, разом із фторидом кальцію забезпечує зниження коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування, внаслідок чого нові матеріали

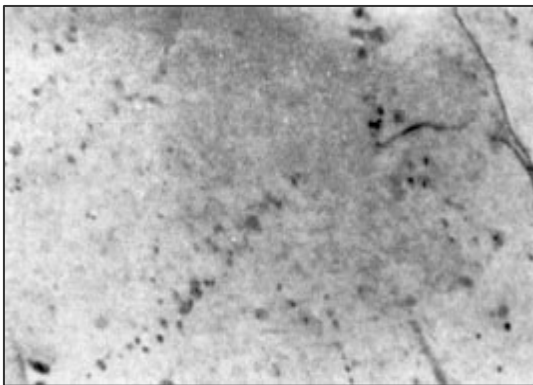


Рис. 2. Тонка фольга. Карбіди NbC у структурі матеріалу 5Х3В3МФС + 5% CaF₂, $\times 20000$

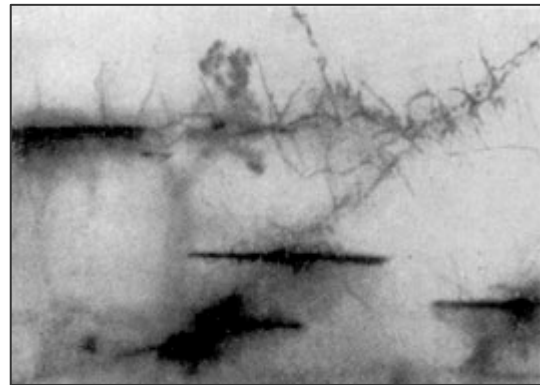


Рис. 3. Тонка фольга. Карбіди NbC у структурі приповерхневого шару матеріалу 5Х3В3МФС + CaF₂ після триботехнічних випробувань, $\times 30000$

Таблиця. Фізико-механічні і антифрикційні властивості матеріалів на основі відходів сталі 5Х3В3МФС

Масовий склад, %	$\sigma_{\text{виг'}}$, МПа	$\alpha_{\text{к}}$, Дж/м ²	НВ, МПа (20°С)	НВ, МПа (600°С)	Коефіцієнт тертя при 7 МПа	Інтенсивність зношення при 7 МПа, мкм/км	Гранично-допустиме навантаження, МПа	Гранично-допустима температура, °С
5Х3В3МФС+3 CaF ₂	560	725	870	730	0,16	30	8,7	600
5Х3В3МФС+5 CaF ₂	550	718	850	710	0,14	27	8,8	600
5Х3В3МФС+7 CaF ₂	540	680	780	700	0,17	28	8,7	600
ЖГр3М15[1]	410	94	800	—	0,29*	470*	3,0	400

* Коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування при навантаженні 5 МПа.

здатні витримувати вищі навантаження і стабільно працювати при вищих температурах (порівняно з матеріалами, що застосовуються на сьогодні). Зменшення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування підшипникового матеріалу зумовлює підвищення стійкості вузла тертя в цілому за рахунок менш інтенсивного виділення тепла в процесі тертя та відсутності деформування підшипника під дією навантажень.

Дослідження приповерхневої зони матеріалів на основі відходів сталі 5Х3В3МФС з домішками CaF_2 після проведення триботехнічних випробувань ілюструють (рис. 3) форму частинок карбідів легувальних елементів, яка є подовженою в напрямку прикладання навантаження під час тертя.

Як видно з рис. 4, поблизу частинок карбідів утворюються дислокації, якими карбіди (зокрема, NbC) чинять опір при їх пересуванні і тим самим зміцнюють приповерхневу зону антифрикційного матеріалу. Це особливо важливо при роботі за високих температур і навантажень, коли необхідним є забезпечення мінімізації інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя.

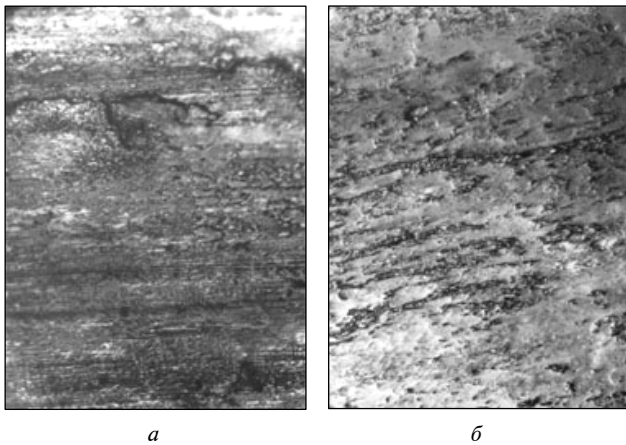


Рис. 4. Поверхні тертя матеріалу 5Х3В3МФС + 5% CaF_2 (а) і контролі із сталі Р18 (б), $\times 400$

На робочих поверхнях антифрикційних матеріалів на основі відходів сталі 5Х3В3МФС та контролі із загартованої сталі Р18 у процесі тертя утворюються щільні суцільні розділювальні плівки, що запобігають зчепленню кон-

тактуючих поверхонь та забезпечують стабільне функціонування пари тертя (див. рис. 4).

Утворені протизадирні плівки (див. рис. 4) завтовшки 20–30 мкм надійно захищають тертьові поверхні від схоплення завдяки наявності в продуктах зносу мікрочастинок (розмірами 0,1–1 мкм) оксидних фаз та ультрадисперсних частинок CaF_2 , утворених при високотемпературному терті на повітрі. Вказані частинки створюють ефект твердого змащування внаслідок диспергування [13] під час тертя передусім метастабільних напружених структур. При цьому перенесення продуктів тертя на тертьові поверхні забезпечує безперервне ротапринтне змащування.

Висновки

Аналізуючи одержані при виконанні досліджень результати, можна констатувати однозначний зв'язок між природою зміцнення композиційних матеріалів на основі відходів сталі 5Х3В3МФС з домішками CaF_2 та їх антифрикційністю, що дає змогу застосовувати ці матеріали для роботи при температурах 550–600 °С, навантаженнях 5–8,8 МПа, швидкості ковзання 1 м/с на повітрі. Все це відкриває можливість створювати вигідну, з погляду на тертя та зношування, гетерогенну металографічну структуру матеріалів і керувати нею в потрібному напрямку технологічними заходами, передусім шляхом вибору відповідних комбінацій легуючих елементів.

Крім зазначеного, застосування шламових металевих відходів для створення нових класів матеріалів антифрикційного призначення відкриває широкі можливості для подальшого використання цінної, багатой на легувальні елементи, вторинної сировини.

Подальші розробки з даної проблематики будуть спрямовані на дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються на тертьових поверхнях матеріалів із металевих відходів, мікроструктуру та субмікроструктуру тонких поверхневих плівок тертя (вторинних структур), наноструктурних утворень, що є носіями високої антифрикційності матеріалів.

Т.А. Роїк, В.В. Холявко, Б.П. Зора, А.С. Луференко
 ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И
 СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИФРИКЦИ-
 ОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАЛЬНЫХ
 ОТХОДОВ

Представлены результаты исследования особенностей формирования металлографической структуры, физико-механических и триботехнических свойств антифрикционных композиционных материалов на основе отходов стали 5ХЗВ3МФС с добавками высокотемпературной твердой смазки CaF₂. Показано, что в процессе спекания формируется сложная гетерогенная структура материалов, обеспечивающая формирование высокого уровня эксплуатационных свойств антифрикционных композитов. Проиллюстрирована перспективность использования отходов легированных сталей для создания высококачественных подшипниковых материалов.

T.A. Royik, V.V. Kholiavko, B.P. Zora, O.S. Luferenko
 THE FORMATION PRINCIPLES OF STRUCTURE
 AND PROPERTIES OF COMPOSITE ANTI-FRICTION
 MATERIALS ON THE BASE OF STEEL
 WASTES

The experimental results demonstrate the specificity of the metallographic structure formation of the physical-mechanical properties and tribotechnical characteristics of antifriction composite materials, based on the 5ХЗВ3МФС steel wastes with the high temperature solid lubricant CaF₂ impurities. Furthermore, we show that a complex heterogeneous materials structure is formed in the sintering process, ensuring the high-level formation of antifriction composites operational properties. The benefits of our approach are illustrated by using alloyed steel wastes for generation of high-quality bearing materials.

1. *Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П.* Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 404 с.
2. *Гавриш А.П., Роїк Т.А.* Особенности формирования структуры и свойств новых подшипниковых композиционных материалов с использованием отходов стали Р6М5К5 // Проблемы техники. – 2002. – № 2. – С. 15–26.
3. *Роїк Т.А.* О возможности использования порошков-отходов в высокотемпературных узлах трения // 36. пр. “Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва.” – К.: НТУУ “КПІ”, 1998. – Т. 2. – С. 213–218.
4. *Roik T.A.* Perspective powder bearing materials for a work at high temperatures // Proc. of Conference “Situation and Perspective of Research and Development in Chemical and Mechanical Industry”. – Krusevac (Yugoslavia), 2001. – P. 357–363.
5. *Гавриш А.П., Роїк Т.А.* Нові ефективні антифрикційні композиційні матеріали з утилізованих відходів інструментального виробництва // 36. наук. пр. “Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем”. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – Вип. 15. – С. 150–154.
6. *Патент України № 32854А, МКИ С22С33/02.* Порошковий підшипниковий матеріал на основі заліза для підвищених температур / Т.А. Роїк, Ю.Ф. Шевчук. – № 98063001; Заявл. 10.06.98; Опубл.15.02.01, Бюл. № 1. – 4 с.
7. *Роїк Т.А.* Перспективні антифрикційні матеріали для вузлів нафтодобувних машин // Вісн. укр. відділення Міжнар. академії наук вищої школи. – 2004. – № 2. – С. 120–128.
8. *Федорченко И.М., Пугина Л.И.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. думка, 1980. – 404 с.
9. *Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А.* Технология порошковой металлургии. – К.: Вища шк., 1989. – 416 с.
10. *Патент України № 25625, МПК 8 С22С33/02.* Підшипниковий композиційний матеріал на основі сталі / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, В.В. Холявко, Б.П. Зора. – № U200704587; Заявл. 25.04.07; Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12. – 4 с.
11. *Зозуля В.Д.* Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – К.: Наук. думка, 1989. – 288 с.
12. *Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
13. *Морохов И.В., Трусов Л.И., Лаповок В.И.* Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Наука, 1984. – 320 с.