

DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.189200

УДК 621.923.6:621.318.4:621.002.1

Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віщук\*, О.І. Хмілярчук  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
\*corresponding author: iuvitsiuk@gmail.com

## СТРУКТУРА І ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ СТАЛІ P7M2Ф6

**Проблематика.** Розробка технологічних заходів для створення нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі промислових шліфувальних відходів сталі P7M2Ф6 із домішками твердого мастила CaF<sub>2</sub>, що призначені для роботи за температур до 600 °С, швидкості ковзання до 1 м/с, навантажень до 5,0 МПа на повітрі.

**Мета дослідження.** Визначення особливостей структури та функціональних властивостей композиційних самозмащувальних антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальної швидкорізальної сталі P7M2Ф6, що містить у своєму складі тверде мастило CaF<sub>2</sub>, для роботи у високотемпературних вузлах тертя на повітрі.

**Методика реалізації.** Розробка технологічних режимів регенерації промислових відходів сталі P7M2Ф6, визначення технологічних операцій виготовлення нових антифрикційних композитів, що включають змішування металевих порошків сталі з твердим мастилом, пресування і спікання композитів. Дослідження процесів структуроутворення і властивостей матеріалів виконувались із застосуванням методів оптичної та електронної мікроскопії, стандартних методів визначення механічних властивостей і випробувань на тертя і знос.

**Результати досліджень.** Визначено та обґрунтовано вплив розробленої технології виготовлення на формування структури, фізико-механічних і триботехнічних властивостей матеріалів на основі відходів сталі P7M2Ф6 із домішками твердого мастила CaF<sub>2</sub>, наслідком чого є формування складного гетерогенного антифрикційного матеріалу з високими функціональними характеристиками. Показано механізм формування структури нових матеріалів та її вплив на властивості після використання розроблених технологічних режимів. Мікрорентгено-спектральний аналіз підтвердив, що CaF<sub>2</sub>, хімічні елементи контактної пари та кисень утворюють антифрикційну плівку, яка забезпечує режим самозмащення за визначених температур тертя.

**Висновки.** Показано можливість прогнозування структури і властивостей антифрикційних самозмащувальних композиційних матеріалів за високих температур через цілеспрямований вибір вихідних металевих шліфувальних відходів для визначених умов роботи контактної пари.

**Ключові слова:** антифрикційний композиційний матеріал; шліфувальні відходи; швидкорізальна сталь; тверде мастило; технологія; структура; функціональні властивості; плівки тертя.

### Вступ

Потреби сучасної техніки нерозривно пов'язані з необхідністю створення нових високо-ефективних матеріалів і деталей із них, здатних істотно підвищити надійність і довговічність окремих вузлів і машин у цілому. Це повною мірою стосується матеріалів контактних пар, таких як антифрикційні матеріали, які використовуються у важких умовах експлуатації за високих температур – 500 °С і вище, підвищених навантажень понад 2,0 МПа, швидкостей обертання більше 500 об/хв, у агресивних середовищах. Тому питання підвищення зносостійкості таких матеріалів стоїть надзвичайно гостро, оскільки від здатності деталей чинити опір зношуванню залежить довговічність вузла тертя і всього механізму.

При розробці нових антифрикційних матеріалів перед науковцями постає потреба одночасного вирішення низки проблем: з одного боку, це необхідність підвищення зносостійкості, а з іншого, забезпечення високої технологічності й економічності виготовлення нових матеріалів.

Вирішенню означених проблем сприяє те, що композиційні матеріали мають суттєві переваги над литими, оскільки саме порошкова технологія може забезпечити поєднання різних за природою і властивостями компонентів, які не поєднуються при застосуванні традиційної технології лиття.

Утім технологія порошкової металургії має суттєвий недолік, що обмежує широке використання композиційних матеріалів. Це висока вартість вихідних порошків, яка пов'язана як із дороговизною технології їх виготовлення, так і з високою вартістю відповідного обладнання, що

у багатьох випадках не відповідає умовам економічності виробництва і застосування таких матеріалів.

Литі антифрикційні матеріали значно дешевші, але мають набагато нижчі триботехнічні характеристики порівняно з композиційними, вони здатні працювати лише за наявності рідких мастил і, як наслідок, потребують застосування мастилоподавальних систем. У важких умовах експлуатації у низці випадків змащувальне мастило стає неефективним (за високих швидкостей обертання або температур), у результаті чого литі антифрикційні матеріали мають незадовільні параметри коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування, а інколи стають загалом непрацездатними, що може спричинити до повної деградації деталі. Це призводить до виходу з ладу вузла тертя і машини в цілому і, як наслідок, викликає зупинки обладнання, збільшення ремонтних періодів, потребує великої кількості запасних частин тощо. Такі явища притаманні матеріалам на основі як заліза, так і кольорових металів.

Тому такі завдання, як значне підвищення зносостійкості антифрикційних матеріалів, спрощення технології їх виготовлення, застосування дешевої вихідної сировини, мають бути одночасно враховані при створенні нових антифрикційних матеріалів і деталей із них. Перелічені аргументи свідчать про затребуваність і актуальність означеного напрямку досліджень.

Важкі умови експлуатації антифрикційних матеріалів, особливо композиційних, що працюють в умовах самозмащення, без рідкого мастила, передбачають поєднання достатніх механічних властивостей для забезпечення конструкційної міцності деталі під дією зовнішніх навантажень із високими триботехнічними властивостями. Це можна досягти завдяки цілеспрямованому формуванню структури матеріалу з урахуванням чинників, що діють у процесі експлуатації.

Водночас для реалізації таких завдань науковці різних країн у своїх науково-технічних дослідженнях враховують економічні аспекти щодо використання цінних металевих промислових відходів у повторному циклі виробництва, а саме як основу для розробки нових матеріалів і виробів із них [1–3].

Така практика не тільки відкриває можливості створення нових ефективних матеріалів, але й сприяє захисту довкілля від забруднень.

Як правило, повторне широке використання промислових металевих відходів пов'язане із застосуванням традиційних технологій лиття [1–3] для одержання нових матеріалів різного призначення. Такій переробці піддають металеві відходи як промислового, так і побутового походження, а саме металеву стружку машинобудівних підприємств, інструментального виробництва, скраб металургійного походження, утилізовану металеву тару від продуктів і напоїв тощо. В результаті застосування розроблених технологій одержують нові матеріали і деталі з них із високими функціональними характеристиками [1–3]. Так, науковцями Інституту електрозварювання НАН України відпрацьована технологія одержання інструмента з утилізованої металеві стружки швидкорізальної сталі Р6М5, який за властивостями не поступається ріжучому інструменту з первинної сировини [3].

На жаль, використання у повторному виробничому циклі такої цінної та дешевої сировини, як металеві відходи шліфування, на сьогодні є вельми обмеженим унаслідок забруднення таких відходів абразивними частинками від шліфувальних кругів. Утім, як показали дослідження [4–6], шліфувальні відходи металів і сплавів, які виникають у великих кількостях при операціях шліфування різних деталей, є потенційно надзвичайно цінною сировиною, багатою на хімічні елементи: Ti, Cr, V, Mo, W, Ce, B, Al, Ni, Co та ін. Тому після певної переробки такі відходи можуть слугувати вихідною сировиною при створенні нових матеріалів деталей різного конструкційного призначення для широкого діапазону умов експлуатації.

Напрацювання науковців [4–6] щодо використання доступної та водночас цінної сировини – шліфувальних відходів деяких металів і сплавів – для створення нових антифрикційних композиційних матеріалів надали позитивні результати. Зокрема, нові композиційні антифрикційні матеріали на основі шліфувальних відходів сталей 2Х6В8М2К7, 11Р3М3Ф2, ШХ15СГ та деяких інших марок сплавів продемонстрували високі триботехнічні властивості у відповідних умовах роботи і були рекомендовані для виготовлення деталей, що працюють на тертя та знос в умовах підвищених зовнішніх навантажень [4–6].

Одержані результати показали широкі перспективи цього напрямку, але на сьогодні таких наукових робіт ще замало.

Залишились не вирішеними питання охоплення більш широкої номенклатури металевих шліфувальних відходів для їх використання як

основи нових композиційних антифрикційних матеріалів, особливостей формування складників структури залежно від наявності тих чи інших легувальних елементів, комбінацій металевої основи з різними твердими мастилами для роботи композитів у різних діапазонах умов експлуатації залежно від виду навантажуючих факторів, технології їх виготовлення та її впливу на формування структури і властивостей, граничні режими роботи тощо.

У той же час в умовах високих температур (400 °С і вище), коли жодне рідке мастило не ефективно, змащення контактуючих поверхонь відбувається за рахунок утворення на них плівок тертя, так званих вторинних структур, які можуть як забезпечити стабільний режим самозмащення пари тертя, так і проявляти себе як абразив залежно від умов роботи. В режимі самозмащення такі вторинні структури (плівки тертя) є одним із головних факторів, від яких залежить працездатність антифрикційного матеріалу. Ці плівки є тим самим елементом пари тертя, який забезпечує ті чи інші триботехнічні властивості.

Тому виявлення особливостей плівок тертя, їх складу, морфології та впливу на функціональні властивості антифрикційного матеріалу залежно від хімічного складу контактної пари і зовнішніх навантажуючих факторів є дуже важливою задачею, розв'язання якої дасть можливість визначити закономірності формування вторинних структур і цілеспрямовано встановлювати режими роботи матеріалу.

Вказане вище стало мотивацією для проведення різнобічних досліджень із розширення технологічних можливостей використання більш широкої номенклатури шліфувальних металевих відходів для створення на їх основі нових ефективних самозмащувальних антифрикційних композиційних матеріалів із прогнозованою структурою і властивостями, а саме на основі шліфувальних відходів швидкорізальної інструментальної сталі Р7М2Ф6 для роботи за температур 500–600 °С, підвищених навантажень до 5 МПа на повітрі, що є актуальним науково-технічним завданням.

Одночасно реалізація вказаного завдання стане ще одним кроком для подальшого використання у більш широких масштабах доступної та багатой на цінні хімічні елементи сировини, якими є металеві шліфувальні відходи, для виготовлення на її основі нових матеріалів і виробів.

### Постановка задачі

Метою роботи є визначення особливостей структури і функціональних властивостей композиційних самозмащувальних антифрикційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальної швидкорізальної сталі Р7М2Ф6, що містить у своєму складі тверде мастило  $\text{CaF}_2$ , для роботи у високотемпературних вузлах тертя на повітрі.

### Основні результати досліджень

**Підготовчі процедури.** Предметом дослідження є новий антифрикційний композиційний матеріал на основі шліфувальних відходів інструментальної швидкорізальної сталі Р7М2Ф6 із твердим мастилом  $\text{CaF}_2$  (табл. 1).

Швидкорізальна сталь Р7М2Ф6 була вибрана як металева основа дослідженого матеріалу завдяки своїм властивостям, зокрема високій теплостійкості та достатній жаростійкості до температур 500–600 °С [7], які відповідають умовам роботи низки високотемпературних вузлів тертя. Оскільки досліджений антифрикційний композиційний матеріал призначений для роботи в умовах самозмащення, до його складу додавали термічно і хімічно стійке тверде мастило – фторид кальцію  $\text{CaF}_2$  [6, 8, 9]. Вміст твердого мастила  $\text{CaF}_2$  становив 4,0–8,0 мас. %, оскільки його кількості менше 4 % не достатньо для реалізації функції змащення контактуючих поверхонь, а за його вмісту більше 10 % суттєво знижуються механічні властивості, особливо пластичність матеріалу, що пов'язано з природою фториду кальцію як непластичної речовини.

Забруднені абразивними частинками відходи теплостійкої швидкорізальної сталі Р7М2Ф6

**Таблиця 1.** Хімічний склад матеріалу на основі шліфувальних відходів сталі Р7М2Ф6

Вміст компонентів, мас. %										
C	W	Cr	Mo	Si	Mn	V	S	P	Fe	$\text{CaF}_2$
1,65–1,75	6,50–7,50	3,80–4,30	1,80–2,30	0,60	0,50	5,50–6,20	0,02–0,03	0,02–0,03	Основа	4,0–8,0

утворюються при операціях шліфування різального інструмента. Внаслідок цього такі відходи не використовуються у повторному виробничому циклі, а вивозяться у відвали. Втім вони містять низку цінних хімічних елементів (див. табл. 1), що стало додатковим аргументом для застосування таких відходів як металевої основи для антифрикційного матеріалу високотемпературного призначення.

Для очищення шліфувальних відходів від абразивної крихти була застосована методика магнітної сепарації [4, 5], після якої кількість абразиву становить близько 2 %.

**Виготовлення шихти, компактування і спікання.** Вихідні складники шихти – очищені відходи сталі Р7М2Ф6 та порошки  $\text{CaF}_2$  – змішували та піддавали пресуванню за тисків 700–800 МПа, у результаті чого пористість брикетів становила 18–20 %.

Після пресування виконували спікання брикетів за температур 1100–1150 °С, що забезпечило одержання пористості в межах 11–13 %.

**Техніка експериментальних досліджень.** Структуру вивчали за допомогою оптичного та растрового електронного мікроскопа; фторид кальцію в матриці визначали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). Триботехнічні випробування проводилися на машині тертя vmt-1 за температур до 600 °С, швидкості ковзання  $V = 1,0$  м/с і навантажень  $P$  до 5,0 МПа, контртіло – з литої інструментальної сталі R18 (твердість 58–59 HRC). Склад утворених плівок тертя вивчали, застосовуючи метод мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА).

**Аналіз результатів досліджень.** Після спікання в матеріалі системи шліфвідходи сталі Р7М2Ф6– $\text{CaF}_2$  сформувалась складна гетерогенна структура (рис. 1), що поєднує металеву перліто-цементитну матрицю (рис. 1, в) і розподілені в ній частинки твердого мастила  $\text{CaF}_2$ . Структура металевої матриці композиційного матеріалу на основі відходів сталі Р7М2Ф6 суттєво відрізняється від структури литої сталі Р7М2Ф6: вона позбавлена недоліку, притаманного литим швидкорізальним сталям – карбідної ліквациї. Це зумовлено тим, що композиційний матеріал сформований з окремих частинок металевих відходів, які по суті є мікротельцями. Така особливість виключає появу карбідної ліквациї, що позитивно впливає на властивості композиційного матеріалу.

Як видно з рис. 1, а, тверде мастило  $\text{CaF}_2$  рівномірно розподілене в об'ємі композиційного матеріалу, що сприяє процесу самозмащення.

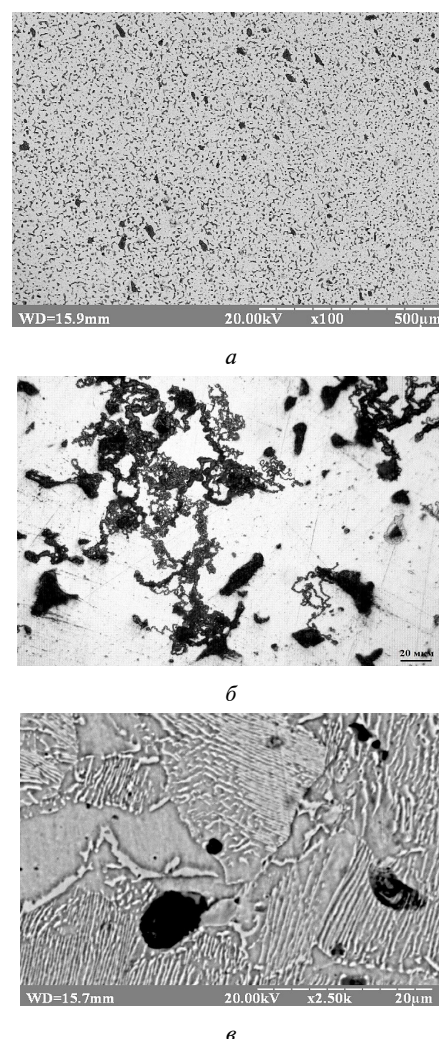


Рис. 1. Мікроструктура матеріалу, шліф не травлений, темні включення –  $\text{CaF}_2$ : а – електронна мікроскопія; б – оптична мікроскопія; в – фрагмент перліту в металевій матриці, електронна мікроскопія

Одержання матеріалу з легованої сировини забезпечує формування більш однорідної структури, що позитивно впливає на функціональні властивості, наведені у табл. 2.

Результати випробувань (табл. 2) показують триботехнічні властивості досліджуваних матеріалів порівняно з відомим порошковим матеріалом на основі Fe [8], який використовується для роботи за підвищених температур на повітрі. Як видно з табл. 2, досліджений композиційний матеріал на основі відходів має більш високі антифрикційні властивості в режимі самозмащення за високих температур і навантажень, ніж відомий композиційний матеріал на основі Fe, який показав незадовільні триботехнічні характеристики за таких умов експлуатації. При

Таблиця 2. Триботехнічні властивості досліджених матеріалів

Склад, мас. %	Знос, мкм/км, за 600 °С	Коефіцієнт тертя за 600 °С	Знос, мкм/км, за 650 °С	Коефіцієнт тертя за 650 °С	Максимально допустиме навантаження, МПа/температура, °С
P7M2Ф6 + 4 CaF <sub>2</sub>	41–44	0,19	212	0,36	5/650
P7M2Ф6 + 6 CaF <sub>2</sub>	39–43	0,16	207	0,34	5/650
P7M2Ф6 + 8 CaF <sub>2</sub>	42–47	0,18	209	0,35	5/650
ЖГрЗМ15 [8]	476–840	0,44	Непрацездатний		1,5/350

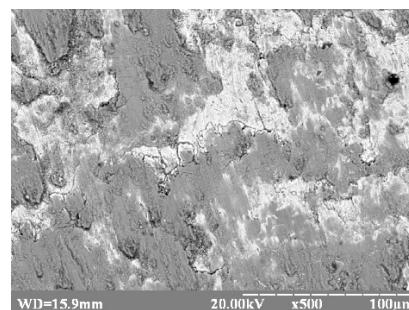
підвищенні температури випробувань до 650 °С відомий порошковий матеріал на основі Fe стає взагалі непрацездатним, що обумовлено його інтенсивним окисненням, пов'язаним із відсутністю в його структурі фаз, здатних чинити опір окисненню. У той же час складнолегована сталь P7M2Ф6 має високу теплостійкість і достатню жаростійкість за вказаних температур завдяки наявності в її структурі складних карбідів та інтерметалідів [4, 7]. А поєднання металевої матриці з твердим мастилом CaF<sub>2</sub>, яке при терті намащується на обидві контактні поверхні, обумовлює додатковий захист матеріалу від інтенсивного окиснення.

При триботехнічних випробуваннях за температур 500–600 °С на контактних поверхнях як досліджуваного матеріалу, так і контртіла утворились щільні змащувальні антифрикційні плівки. Такі плівки забезпечили високі триботехнічні характеристики дослідженого матеріалу в указаному температурному діапазоні (див. табл. 2).

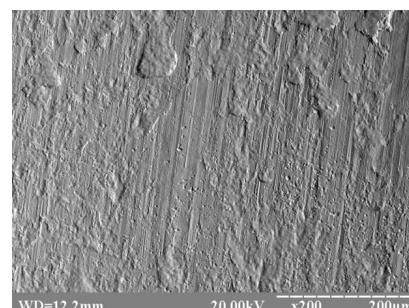
Мікроскопічні дослідження підтвердили наявність щільного антифрикційного шару (плівок тертя) на контактуючих поверхнях після триботехнічних випробувань за температур 500–600 °С (рис. 2).

Утворені в процесі трибовипробувань плівки складаються з легувальних елементів контактних матеріалів і твердого мастила CaF<sub>2</sub>, що було підтверджено методом МРСА (рис. 3, 4).

Наявність хімічних елементів в утвореній плівці тертя визначали за допомогою аналізу від вибраних місць поверхні (рис. 3, спектри 1 і 2). Дані для спектрів 1 і 2 (рис. 4) показують наявність усіх хімічних елементів дослідженого матеріалу і контртіла, а також твердого мастила CaF<sub>2</sub>.



а



б

Рис. 2. Зображення поверхні дослідженого матеріалу після трибовипробувань за 600 °С: а – намащування CaF<sub>2</sub> на поверхні; б – топографія поверхні (електронна мікроскопія)

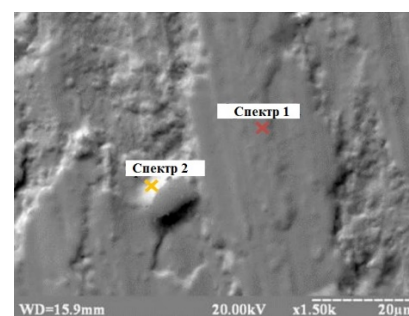


Рис. 3. Поверхня тертя, зображення в режимі вторинних електронів (x – точки аналізу)



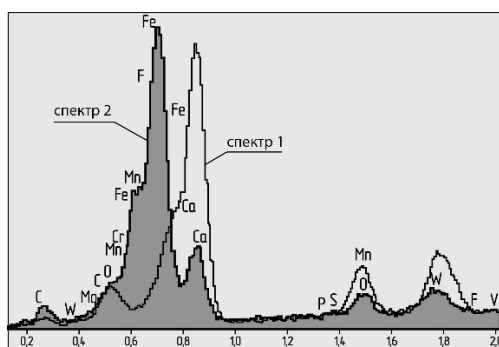


Рис. 4. Спектри від вибраних ділянок поверхні тертя

Співвідношення хімічних елементів (рис. 4, спектри 1, 2) від вибраних ділянок поверхні таке, ат. %:

Спектр 1: Fe – 61,29; C – 10,13; Ca – 3,53; W – 6,77; Mo – 1,80; Cr – 2,65; Mn – 0,39; F – 3,37; O – 5,19; P – 0,09; S – 0,07; V – 4,71.

Спектр 2: Fe – 65,00; C – 11,59; Ca – 2,02; W – 4,76; Mo – 1,86; Cr – 1,68; Mn – 0,27; F – 2,58; P – 0,05; S – 0,04; O – 6,31; V – 3,83.

Аналіз результатів спектрального мікроаналізу (див. рис. 4) також свідчить про наявність значної кількості кисню на контактних поверхнях. Це є наслідком активізації процесів окиснення при терті на повітрі за високих температур, що обумовлює окиснювальний механізм зношування.

Сформовані плівки тертя, вочевидь, містять оксидні та фторидні фази. За температур 500–600 °C утворені вторинні структури перебувають у балансі між швидкістю їх зносу та швидкістю відтворення нових ділянок на зношених місцях. У результаті такого балансу контактні поверхні постійно покриті плівками, вони мають гладку топографію і виступають як змащувальний елемент, що мінімізує коефіцієнт тертя і знос контактної пари.

## References

- [1] R.S. Ramachandra, *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. Elsevier, 2011.
- [2] Zh. Wenshen *et al.*, “A literature review of titanium metallurgical processes”, *Hydrometallurgy*, vol. 108, no. 3-4, pp. 177–188, 2011. doi: 10.1016/j.hydromet.2011.04.005
- [3] P. Shpak *et al.*, “Influence of electron-beam remelting on the structure and properties of high-speed steel R6M5”, *Problemy Special'noj Metallurgii*, no. 3, pp. 14–17, 2002.
- [4] T. Roik *et al.*, “Features of structure formation and properties of composite antifriction materials for printing machines based on utilized waste”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 50–57, 2018. doi: 10.20535/1810-0546.2018.5.146165
- [5] T. Roik *et al.*, “Features of the tribotechnical properties formation of composite materials based on grinding wastes of structural steel”, *Powder Metallurgy*, no. 7/8, pp. 88–97, 2019.
- [6] P. Kyrychok *et al.*, *Newest Composite Materials for Friction Parts of Printing Machines*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2015.
- [7] Yu.A. Heller, *Tool Steels*. Moscow, SU: Metallurhiya, 1983.

## Висновки

Аналіз результатів дослідження структури нового антифрикційного композиційного матеріалу на основі відходів швидкорізальної сталі Р7М2Ф6 із твердим мастилом  $\text{CaF}_2$  показав особливості її формування з урахуванням природи наявних легувальних елементів, утворюваних ними фаз у металевій матриці та розподілу твердої змащувальної речовини по об'єму композиту.

Експерименти засвідчили, що процес тертя за температур 500–600 °C на повітрі супроводжується утворенням суцільних щільних змащувальних плівок тертя на контактних поверхнях. Склад таких плівок визначається вмістом хімічних елементів антифрикційного матеріалу, контртіла і кисню повітря та безпосередньо залежить від умов тертя.

У встановленому діапазоні робочих температур спостерігається рівновага між зносом окремих ділянок плівки і утворенням її нових фрагментів. Це обумовлює високі функціональні властивості нового матеріалу на основі шліфувальних відходів інструментального виробництва.

Одержані результати дають змогу рекомендувати досліджений матеріал для важких умов роботи, а саме за температур 500–600 °C, навантажень до 5,0 МПа, швидкості ковзання 1 м/с на повітрі.

Подальші дослідження будуть присвячені встановленню фазового складу вторинних структур, що надасть змогу прогнозувати антифрикційну поведінку матеріалів на основі шліфувальних відходів через цілеспрямований вибір вихідних матричних і змащувальних компонентів та їх кількісного співвідношення для конкретних умов тертя.

- [8] A. Kostornov, *Tribotechnical Material Science*. Lugansk, Ukraine: Noulyge, 2012.
- [9] D. Jianxin and C. Tongkum “Self-lubricant mechanisms via the *in situ* formed tribofilm of sintered ceramics with CaF<sub>2</sub> additions when sliding against hardened steel”, *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 189–197, 2007.  
doi: 10.1016/j.ijrmhm.2006.04.010.

Т.А. Роик, Ю.Ю. Вицюк, О.И. Хмилярчук

#### СТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СТАЛИ P7M2F6

**Проблематика.** Разработка технологических мер по созданию новых антифрикционных композиционных материалов на основе промышленных отходов стали P7M2F6 с примесями твердой смазки CaF<sub>2</sub>, предназначенных для работы при температурах до 600 °C, скорости скольжения до 1 м/с, нагрузках до 5,0 МПа на воздухе.

**Цель исследования.** Определение особенностей структуры и функциональных свойств композиционных самосмазывающихся антифрикционных материалов на основе шлифовальных отходов инструментальной быстрорежущей стали P7M2F6, содержащей в своем составе твердую смазку CaF<sub>2</sub>, для работы в высокотемпературных узлах трения на воздухе.

**Методика реализации.** Разработка технологических режимов регенерации промышленных шлифовальных отходов стали P7M2F6, определение технологических операций изготовления новых антифрикционных композитов, включающих смешивание металлических порошков стали с твердой смазкой, прессование и спекание композитов. Исследования процессов структурообразования и свойств выполнялись с применением методов оптической и электронной микроскопии, стандартных методов определения механических свойств и испытаний на трение и износ.

**Результаты исследования.** Определено и обосновано влияние разработанной технологии изготовления на формирование структуры, физико-механических и триботехнических свойств материалов на основе шлифовальных отходов стали P7M2F6 с добавками твердой смазки CaF<sub>2</sub>, следствием чего является формирование сложного гетерогенного антифрикционного материала с высокими функциональными характеристиками. Показаны механизм формирования структуры новых материалов и ее влияние на свойства после использования разработанных технологических режимов. Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил, что CaF<sub>2</sub>, химические элементы контактной пары и кислород образуют антифрикционную пленку, которая обеспечивает режим самосмазывания при определенных температурах трения.

**Выводы.** Показана возможность прогнозирования структуры и свойств антифрикционных самосмазывающихся композиционных материалов при высоких температурах посредством целенаправленного выбора исходных металлических шлифовальных отходов для определенных условий работы контактной пары.

**Ключевые слова:** антифрикционный композиционный материал; шлифовальные отходы; быстрорежущая сталь; твердая смазка; технология; структура; функциональные свойства; пленки трения.

T.A. Roik, Yu.Yu. Vitsiuk, O.I. Khmiliarchuk

#### STRUCTURE AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITE ANTI-FRICTION MATERIALS BASED ON R7M2F6 STEEL WASTE

**Background.** Development of the technological measures for creating new antifriction composite materials based on waste powders of steel P7M2F6 with solid lubricant CaF<sub>2</sub> intended for operation at temperatures up to 600 °C, sliding speeds up to 1 m/s, loads up to 5.0 MPa in air.

**Objective.** The purpose of the paper is to determine the features of structure formation and their influence on the properties of composite antifriction materials based on industrial grinding waste of steel P7M2F6 with solid lubricant CaF<sub>2</sub> for operation at high temperature friction units in air.

**Methods.** Methodology consisted of the development of the regeneration technological modes of the industrial grinding waste of steel P7M2F6, determination of technological manufacturing operations for new antifriction composites that include mixing of steel powders with solid lubricant, pressing and sintering of composites. The study of the structure formation processes and properties of materials was carried out using optical and electron microscopy methods, standard methods for determining mechanical properties and tests for friction and wear.

**Results.** The influence of the developed manufacturing technology on the formation of the structure, physical mechanical and tribotechnical properties of materials based on steel P7M2F6 grinding waste with solid lubricant CaF<sub>2</sub> additives was determined and grounded; resulting is the formation of complex heterogeneous antifriction material with high functional characteristics. The new material's structure formation and its influence on the functional properties after using the developed manufacture modes was shown. Micro-X-ray spectral analysis confirmed the fact that CaF<sub>2</sub>, the contact pair's chemical elements and oxygen form an antifriction film that provides a self-lubrication mode at the determined friction temperatures.

**Conclusions.** The possibility of predicting the structure and functional properties of antifriction self-lubricating composite materials at high temperatures by purposeful choice of starting metal grinding wastes for certain operation conditions of contact pair was shown.

**Keywords:** antifriction composite material; grinding waste; high-speed steel; solid lubricant; technology; structure; functional properties; friction films.

Рекомендована Радою  
Видавничо-поліграфічного інституту  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
20 грудня 2019 року

Прийнята до публікації  
04 лютого 2020 року