

УДК 669.01:621.762:621.89:621.9.048 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.12

Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНТИФРИКЦІЙНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

У статті досліджено вплив технологічних параметрів виготовлення нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом на структуру, механічні та триботехнічні властивості при високих швидкостях тертя (підшипники працюють при швидкості обертання до 700 об./хв. і тиску до 5,0 МПа в повітрі). Проілюстровано механізм формування структури нових матеріалів та її вплив на властивості після використання розроблених технологічних режимів. Така технологія здатна забезпечити мікрогетерогенну дрібнозернисту структуру. Структура композиту складається з матриці на основі відходів інструментальної сталі та рівномірно розподіленого твердого мастила CaF_2 . Металева матриця є перлітною і складається з α -твердого розчину на основі заліза та карбідів легуючих елементів. Така гетерогенна структура сприяє високому рівню антифрикційних властивостей при важких робочих умовах. Тверда змащувальна речовина CaF_2 рівномірно розподіляється по поверхнях тертя. Фторид кальцію та хімічні елементи контактної пари утворюють антифрикційну плівку, яка забезпечує умови самозмащування. Продемонстровано можливість прогнозування та контролю поведінки антифрикційних матеріалів при високих швидкостях обертання шляхом вибору вихідних металевих шліфувальних відходів для забезпечення високого рівня функціональних властивостей. Використання шліфувальних відходів для отримання ефективних антифрикційних матеріалів дає можливість частково вирішувати глобальну проблему охорони навколишнього середовища.

Ключові слова: антифрикційний композиційний матеріал, шліфувальні відходи, інструментальна сталь, тверде мастило, технологія, структура, властивості, фрикційні плівки.

Т.А. Роик, Ю.Ю. Вицюк

АНТИФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПЕЧАТНЫХ МАШИН

В статье исследовано влияние технологических параметров изготовления новых антифрикционных композиционных материалов на основе шлифовальных отходов стали 7ХГ2ВМФ с твердой смазкой на структуру, механические и триботехнические свойства при высоких скоростях трения (подшипники работают при скорости вращения до 700 об./мин. и давлениях до 5, 0 МПа на воздухе). Проиллюстрировано механизм формирования структуры новых материалов и ее влияние на свойства после использования разработанных технологических режимов. Такая технология способна обеспечить микрогетерогенную мелкозернистую структуру. Структура композита состоит из матрицы на основе отходов инструментальной стали и равномерно распределенной твердой смазки CaF_2 . Металлическая матрица является перлитной и состоит из α -твердого раствора на основе железа и карбидов легирующих элементов. Такая гетерогенная структура способствует высокому уровню антифрикционных свойств при тяжелых рабочих условиях. Твердая смазка CaF_2 равномерно распределяется по поверхностям трения. Фторид кальция и химические элементы контактной пары образуют антифрикционную пленку, которая обеспечивает условия самосмазывания. Продемонстрирована возможность прогнозирования и контроля поведения антифрикционных материалов при высоких скоростях вращения путем выбора исходных металлических шлифовальных отходов для обеспечения высокого уровня функциональных свойств. Использование шлифовальных отходов для получения эффективных антифрикционных материалов дает возможность частично решать глобальную проблему охраны окружающей среды.

Ключевые слова: антифрикционный композиционный материал, шлифовальные отходы, инструментальная сталь, твердая смазка, технология, структура, свойства, фрикционные пленки.

Т.А. Roik, Yu.Yu. Vitsiuk

ANTIFRICTION COMPOSITE MATERIAL BASED ON TOOL STEEL GRINDING WASTE FOR PARTS OF PRINTING MACHINES

The article studies the effect of the technological parameters for the manufacture of new effective antifriction composite materials based on 7HG2VMF tool steel grinding waste with CaF_2 additions as a solid lubricant, on the structure, mechanical and tribological properties at the high friction speeds (bearings perform at the rotational speeds of 700 rpm and pressure up to 5.0 MPa in air). The paper illustrates the mechanism of new materials' structure formation and its effect for properties after use the developed technological modes. Such technology is able to ensure the microheterogeneous fine-grained structure. The composite's structure consists of the matrix based on tool steel waste and uniformly distributed solid lubricant CaF_2 . The metal matrix is perlite and consists of α -solid solution based on iron with hard grains of alloying elements' carbides. Such heterogeneous structure promotes the high level of the antifriction properties at severe operating conditions. It was shown the behavior of CaF_2 in the friction area under high temperature operating conditions. The solid lubricant CaF_2 is evenly distributed over the entire friction surfaces. Calcium fluoride and chemical elements of the contact pair form an antifriction film, which provides self-lubricating conditions. It was demonstrated the possibility of predicting and controlling the behavior of antifriction materials at high rotational speeds by selection of initial metal grinding waste for

ensuring the functional properties high level. The use of grinding waste to produce the effective antifriction materials makes it possible to partially solve the global problem of environmental protection.

Keywords: antifriction composite material, grinding waste, tool steel, solid lubricant, technology, structure, properties, friction films.

Постановка проблеми. Антифрикційні матеріали, що функціонують за високих швидкостей обертання, підвищених та високих температур, навантажень, у агресивному середовищі займають важливе місце серед існуючих матеріалів. Так, антифрикційні матеріали на основі заліза часто використовуються для жорстких умов роботи вузлів друкарських машин, насамперед, КВА Rapida-105, КВА Rapida-105-5, КВА Rapida-105-10 на повітрі при швидкостях обертання 500-600 об./хв. і підвищених навантаженнях (до 5 МПа), оскільки інші матеріали, зокрема на основі кольорових сплавів мають або незадовільні триботехнічні властивості, або взагалі є неприцездатними за таких важких умов роботи. Це призводить до виходу вузла тертя з ладу, скороченню термінів міжремонтних періодів та збільшенню кількості запасних частин. Окрім цього ряд матеріалів значно підвищують вартість вузла тертя і механізму у цілому [1, 2].

На сьогодні існуючі антифрикційні матеріали на основі заліза для важких умов роботи не задовольняють стрімко зростаючим потребам поліграфічної техніки. Литі матеріали часто мають недостатні показники експлуатаційних властивостей (високий коефіцієнт тертя та знос) або є взагалі неприцездатними, а матеріали, одержані методами порошкової металургії, мають високу вартість в наслідок високої вартості вихідних порошків [1–3].

Втім на промислових підприємствах існують великі потенційні джерела цінної та водночас дешевої сировини. Такою сировиною є шліфувальні відходи металів і сплавів, що утворюються на операціях шліфування на підприємствах металургійної, авіа- та суднобудівної, машинобудівної галузі тощо. Ці відходи вивозяться у відвали в наслідок їх забруднення абразивною крихтою від шліфувальних кругів і не використовуються у повторному виробничому циклі. Шліфувальні відходи містять у своєму складі велику кількість цінних легувальних елементів, таких як W, Mo, V, Co, Al, Ti, Cr, Nb та ін. [4, 5]. Після відповідної переробки їх можна використовувати у подальшому виробничому циклі, зокрема, для виготовлення ефективних композиційних підшипників ковзання, як це було започатковано авторами [4–8].

Тому питання створення нових композиційних антифрикційних матеріалів з високими експлуатаційними властивостями для жорстких умов роботи, у тому числі на основі заліза, при цьому таких, що виготовлені з цінної і дешевої сировини, відповідає вимогам часу і потребує виконання глибоких всебічних досліджень. Це є особливо важливим з погляду пошуку дешевих і доступних видів сировини і вирішення завдань реалізації ресурсо- та енергоощадних технологій.

Наведені аргументи стали підґрунтям для проведення комплексу досліджень, що спрямовані на створення нових антифрикційних самозмащувальних матеріалів на основі шліфувальних відходів швидкорізальної сталі Р7М2Ф6, що можуть використовуватись для роботи у важких умовах експлуатації, зокрема, у вузлах тертя друкарських машин.

Аналіз попередніх досліджень. Аналіз процесів тертя в умовах самозмащення показує, що темп зношування контактних поверхонь визначається властивостями утворених розділювальних антифрикційних плівок (вторинних структур) і значною мірою залежить від їх властивостей [2, 9–11]. Залежно від умов роботи плівки на контактних поверхнях можуть відігравати як позитивну роль, мінімізуючи сили тертя і запобігаючи зчепленню підшипника і валу, так і негативну роль, коли утворена плівка тертя виступає як абразив.

Причому при формуванні плівок тертя не окрема властивість матеріалу є значущою, а весь комплекс властивостей впливає на тривалу і надійну роботу антифрикційного матеріалу.

Ці властивості залежать від наявності у матеріалі легувальних елементів, здатних утворити таку структуру, яка буде забезпечувати утворення стабільних змащувальних плівок у процесі тертя та надасть антифрикційній деталі необхідного рівня функціональних властивостей. У свою чергу характер матричної структури будь-якого матеріалу, і антифрикційного у тому числі, залежить від застосованих технологічних заходів і їх параметрів у процесі виготовлення матеріалу.

На сьогодні проблема використання промислових металевих відходів у повторному циклі виробництва є надзвичайно важливою. Багато вчених в усьому світі присвячують свої дослідження проблемі утилізації і повторного використання відходів чорних і кольорових металів. Зазвичай такі відходи являють собою металеву стружку, скраб тощо [12, 13]. Ці відходи є

вихідною сировиною для виробництва нових конструкційних деталей, інструменту, які виготовляються за різними технологіями.

Однак відомості щодо повторного використання шліфувальних металевих відходів є вельми обмежені.

Роботи вчених за останні роки показали доцільність використання шліфувальних відходів деяких марок сталей і сплавів для виготовлення з них якісних конструкційних деталей [2, 9–11]. Автори [4–8] присвятили наукові дослідження з використання шліфувальних відходів деяких кольорових сплавів та сталей для виготовлення антифрикційних композиційних матеріалів і отримали позитивні результати.

Проте досліджень із застосування шліфувальних відходів широкої номенклатури сталей і сплавів як основи композиційних антифрикційних матеріалів для важких умов експлуатації було проведено у обмеженій кількості. Лише окремі публікації з означеної проблематики показали перспективність цього напрямку [4–8].

Вказані аргументи спричинили виконання всебічних досліджень з визначення особливостей структури, властивостей і характеру плівок тертя нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ [4–8] з додаванням твердого мастила до вихідної шихти, що призначені для роботи при швидкостях обертання (до 700 об./хв.) та підвищених навантаженнях (до 5 МПа) на повітрі у вузлах друкарського обладнання.

Це є актуальним завданням як з наукової, так і з практичної точок зору, і його вирішення дозволить розширити номенклатуру цінних металевих шліфувальних відходів для їх застосування у повторному виробничому циклі при виготовленні ефективних композиційних матеріалів різного функціонального призначення. Такий підхід сприятиме не тільки подальшому досягненню цілей щодо пошуку доступних видів сировини, але й частковому вирішенню глобальної проблеми захисту навколишнього середовища.

Мета роботи. Метою дослідження є вивчення структурних особливостей, антифрикційних властивостей і характеру антифрикційних плівок самозмащувального антифрикційного композиційного матеріалу на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 , що призначений для деталей високошвидкісних вузлів тертя друкарських машин КВА Rapida-105, КВА Rapida-105-5, КВА Rapida-105-10.

Експериментальна частина з обґрунтуванням отриманих результатів

Предметом дослідження є новий антифрикційний композиційний матеріал на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 (Табл. 1) [8].

Таблиця 1.

Хімічний склад матеріалу на основі шліфувальних відходів сталі 7ХГ2ВМФ

Вміст компонентів, мас. %										
C	W	Cr	Mo	Si	Mn	V	S	P	Fe	CaF_2
0,68- 0,76	0,55- 0,90	1,5- 1,8	0,5- 0,8	0,2- 0,4	1,8- 2,3	0,10- 0,25	0,02- 0,03	0,02- 0,03	основа	4,0- 8,0

Відходи інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ утворюються на операціях шліфування штампів і є забрудненими абразивними частинками від шліфувальних кругів. Тому зазвичай такі відходи не використовуються у подальшому циклі виробництва. Проте ця сталь містить у своєму складі цінні легувальні елементи (табл.1). Тому вона є привабливою для використання як основи антифрикційного матеріалу саме для важких умов роботи.

Методика магнітної сепарації була застосована для очищення шліфувальних відходів від абразиву [1] з використанням магнітного сепаратора. Залишок абразиву становить 1–2 % після очищення металевих порошків-відходів.

Після очищення металеві порошки піддавали відновлювальному відпалу при температурах 870-1000°C в середовищі водню для видалення надлишкового кисню, що присутній у вигляді оксидів заліза та легувальних елементів. Відновлювальний відпал знижує загальну концентрацію кисню у порошках до 0,4 %. Це сприяє одержанню однорідної мікроструктури. Залишки литої структури спостерігаються у зразках з невідпалених порошків у вигляді зернограничних виділень карбідів біографічного характеру. Проте, після відновлювального відпалу карбіди заліза і легувальних елементів сфероїдизуються, зростає міцність матеріалу [14].

Кількість CaF_2 було обрано у межах 4.0-8.0 мас.% з таких причин: при кількості менше 4% CaF_2 не повною мірою виконуються функції твердого мастила, а при вмісті більше 10% дуже знижуються характеристики міцності та пластичності матеріалу [4–8].

Компоненти шихти (відходи сталі 7ХГ2ВМФ та порошки CaF_2) змішували протягом 4 год. та піддавали пресуванню при тисках 800–900 МПа. У результаті пресування композиційних сумішей були одержані пресовки, що мали пористість 20–22%. Пресування при тисках менших за 800 МПа призводило до одержання пористості в межах 34–36 % й майже повної втрати цілісності брикетів, а при тисках більше 900 МПа відбувалося розшарування пресовок, пов'язане з різницею густини вихідних компонентів шихти.

Після пресування проводили спікання зразків матеріалів у муфельній печі у середовищі висушеного водню (точка роси становить -40°C). Дослідження впливу умов спікання проводили в інтервалі температур 800–1200 $^\circ\text{C}$. Отже, було встановлено, що спікання доцільно проводити за температур 1100–1150 $^\circ\text{C}$, які забезпечують одержання максимальної щільності (після спікання пористість становила 11–13%) й високого рівня механічних властивостей (рис. 2).

Структуру вивчали за допомогою оптичних та растрових електронних мікроскопів [8, 10]; фторид кальцію в матриці визначали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). Триботехнічні випробування проводилися на машині тертя ВМТ-1 (швидкість обертання $V = 700$ об./хв., навантаження P до 5,0 МПа), контртіло виготовлено з литої інструментальної сталі Р18 (твердість 57–59 HRC). Матеріал контртіла сталь Р18 відповідає матеріалу реальних валів у високонавантажених вузлах тертя.

В результаті розроблених режимів технологічних операцій виготовлення в матеріалі середнього складу 7ХГ2ВМФ + 5% CaF_2 утворилась складна гетерогенна структура, що складається з металевої матриці та розподілених в ній частинок твердого мастила CaF_2 , зображення якої наведено на рис. 1.

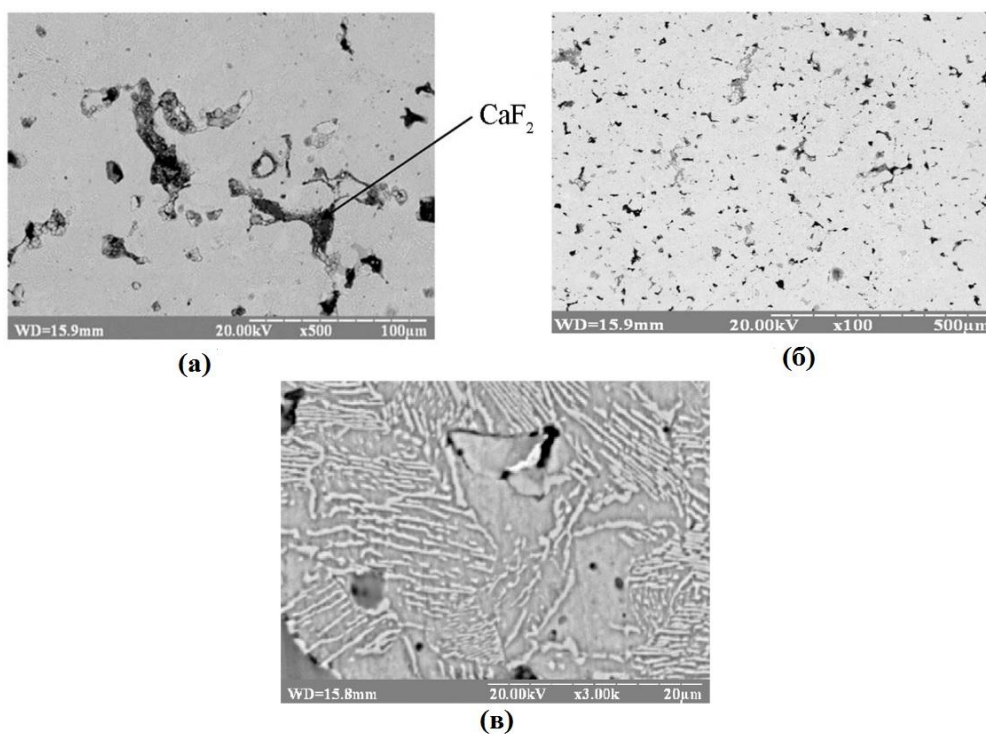


Рис. 1. Зображення мікроструктури композиту, не травлений шліф, (а) електронно-мікроскопічне фото; (б) оптична мікроскопічна фотографія; (в) фрагмент перлітної фази

Як видно з рис. 1, тверде мастило CaF_2 рівномірно розподілене по всьому композиційному матеріалу.

Легувальні елементи утворюють ряд складних карбідів, що описуються формулами Me_{23}C_6 , Me_2C , Me_6C і MeC [14, 15]. Наявність карбідів визначали методом електронної дифракції, зображення яких наведено на рис. 2, 3.

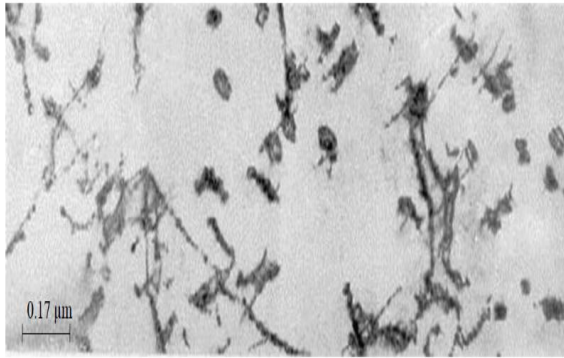


Рис. 2: Карбіди Mo_2C в металевій матриці

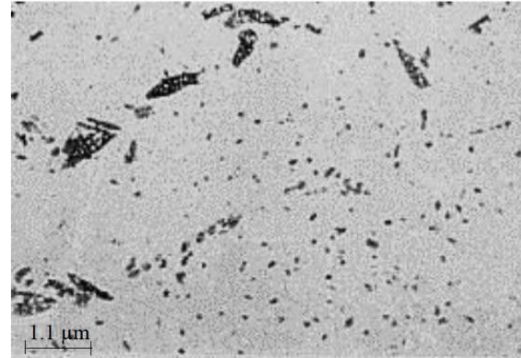


Рис. 3: Карбіди $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$, VC та $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mo})_6\text{C}$ в металевій матриці

Легувальні елементи в порошках-відходах сприяють утворенню в матеріалах фаз, що відповідають за формування експлуатаційних властивостей сплавів. Слід відмітити, що вплив легувальних елементів на характеристики матеріалів залежить від способу їх введення у матеріал.

Так, хром виявляє себе по-різному залежно від способу його введення. При додаванні чистого порошку Cr призводить до формування надто гетерогенної структури. Це обумовлено уповільненням процесів розчинення хрому у залізній основі внаслідок його високої здатності до окиснення та карбідоутворення [15]. Проте одержання матеріалу з легованої сировини (порошків-відходів) забезпечує формування більш однорідної структури. Така структура забезпечила формування властивостей, що наведені у табл. 2.

Таблиця 2.

Властивості досліджених матеріалів

Склад, мас. %	Міцність при згині, МПа	Ударна в'язкість, КС, Дж/м ²	Твердість НВ, МПа	Коеф. тертя/знос, мкм/км (при 700 об./хв.)	Максимально допустиме навантаження, МПа/швидкість, об./хв.
7ХГ2ВМФ + 4 CaF ₂	590–630	650–680	2590–2640	0,18/41	5/750
7ХГ2ВМФ + 6 CaF ₂	570–620	630–670	2570–2630	0,16/39	5/750
7ХГ2ВМФ + 8CaF ₂	560–600	620–640	2550–2620	0,17/42	5/750
ЖГр3М15 [1, 3]	240–300	350–520	850–950	0,31/176	1,5/350

Триботехнічні та механічні властивості досліджуваних матеріалів представлені в таблиці 2 порівняно з відомим порошковим матеріалом на основі Fe [1, 3], який використовується в аналогічних умовах. У табл. 2 показано, що новий композиційний матеріал на основі відходів демонструє більш високі антифрикційні властивості при терті в режимі самозмащування при більш високих швидкостях обертання і навантаженнях, ніж відомий композиційний матеріал на основі Fe, який показав незадовільні триботехнічні характеристики при таких умовах експлуатації.

Щільні антифрикційні плівки утворились на контактних поверхнях, як на поверхні досліджуваного матеріалу, так і на контртілі при триботехнічних випробуваннях.

Скануюча електронна мікроскопія підтвердила наявність тонкого щільного антифрикційного шару на поверхнях тертя після триботехнічних випробувань (рис. 4).

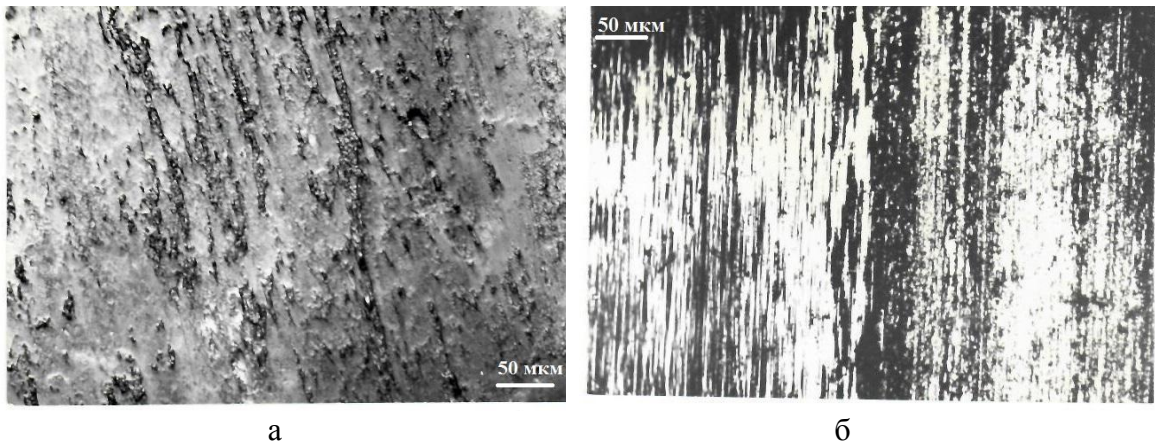


Рис. 4: Поверхні тертя після трибовипробувань: а-поверхня матеріалу; б-поверхня контртіла

Плівки тертя, ймовірно, складаються з складних оксидних і фторидних утворень, які покривають контактні поверхні і оберігають матеріал від об'ємного окислення. У даних умовах тертя має місце баланс між темпом зносу цих плівок і темпом утворення нових ділянок плівки тертя. Таким чином, режим самозмащення реалізується. Плівки тертя (вторинні структури) мають гладку мікротопографію (рис. 4), що мінімізує знос і стабілізує роботу пари тертя.

Висновки. Результати досліджень на прикладі нового антифрикційного композиційного матеріалу на основі відходів сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 , показують можливість визначати особливості формування структури матеріалів на основі відходів легованих сталей з урахуванням природи присутніх легувальних елементів і утворюваних ними фаз у металевій матриці. Це дозволяє прогнозувати природу зміцнення та антифрикційності матеріалів.

При цьому відкривається можливість керувати структурою композитів та їх властивостями через вибір вихідних легованих порошків-відходів для створення необхідної матричної основи та кількості твердого мастила.

Аналіз триботехнічних властивостей дозволив визначити діапазони раціональних режимів експлуатації досліджуваних матеріалів: навантаження до 5.0 МПа, швидкість обертання 700 об./хв., на повітрі, і рекомендувати їх для роботи у вузлах тертя друкарського обладнання.

Використання цінних шліфувальних відходів дозволить не тільки виготовляти нові ефективні композиційні матеріали і деталі з них, але й сприятиме частковому вирішенню проблеми охорони навколишнього середовища.

Подальші дослідження будуть присвячені встановленню складу плівок тертя і їх вплив на фрикційну поведінку залежно від умов експлуатації матеріалу. Це дозволить цілеспрямовано обирати склад матеріалу і встановлювати раціональні режими його використання у вузлах друкарської техніки.

Література

1. Киричок П.О., Роїк Т.А., Гавриш А.П., Шевчук А.В., Віцюк Ю.Ю. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: Монографія.- К.: НТУУ КПІ, 2015.- 428 с.
2. Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: Монографія. - К.: НТУУ „КПІ”, 2007.- 404 с.
3. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение: Монография. — Луганск: «Ноулидж», 2012. — 701 с.
4. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луфференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11Р3М3Ф2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 1.- Технологічні фактори одержання матеріалів і їх вплив на структуру.- №3.- 2009.- С. 47-52.
5. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луфференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11Р3М3Ф2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 2.- Фазовий склад, структура і властивості матеріалів.-№4.- 2009.-С. 72-78.
6. Roik, T., Gavrish, O., Oliynik, V., Vitsiuk, Iu., Analysis of the properties of antifriction composites based on aluminum alloy's grinding waste. Eastern-European Journal of Enterprise technologies, 4/12 (94), PC Technology Center, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, pp. 16–22, 2018.

7. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Ефективні композиційні антифрикційні матеріали на основі шліфувальних відходів сталі ШХ15СГ для середньоважких умов роботи// Наукові нотатки, Луцьк. - №61. -2018.-С. 198-203.
8. Jamroziak K., Roik T. New Antifriction Composite Materials Based On Tool Steel Grinding Waste// Materials Characterisation 2019, 9th International Conference On Computational Methods And Experiments In Material And Contact Characterisation, WIT, Wessex Institute, UK, 22 – 24 May 2019, Lisbon, Portugal.
9. Roik, T., Gavrish, A., Kirichok, P., Vitsyuk, Y., Effect of secondary structures on the functional properties of high-speed sintered bearings for printing machines. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Springer, New York, 54 (1-2), 119–127, 2015.
10. Jamroziak, K., Roik, T., Structure and Properties of the New Antifriction Composite Materials for High-Temperature Friction Units. Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear. FFW-2018, Book ID: 459769_1_En., Chapter No: 57, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, pp. 628–637, 2019.
11. Jianxin, D., Tongkum, C., Self-lubricant mechanisms via the in situ formed tribofilm of sintered ceramics with CaF₂ additions when sliding against hardened steel, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 25(2), pp. 189–197, 2007.
12. Ramachandra, S.Rao, Resource Recovery and Recycling From Metallurgical Wastes. Waste Management Series, Elsevier, 557 p., 2011.
13. Шпак П.А., Гречанюк В.Г., Осокин В.А. Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // Проблемы специальной металлургии. – 2002. – №3. - С. 14–17.
14. Геллер Ю. А. Инструментальные стали.- М.: Металлургия.- 527 с., 1983.
15. Анциферов В. Н., Акименко Б. Н., Гревнов Л. М. Порошковые легированные стали. - М.: Металлургия, 1991. – 318 с.

Рецензенти:

Величко Олена Михайлівна – Завідувач кафедри репрографії КПІ ім. Ігоря Сікорського, професор, доктор технічних наук.

Уманський Олександр Павлович – Завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства НАН України, професор, доктор технічних наук.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2019