

УДК 621.002.3:621.89

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І КОМПЛЕКСУ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДШИПНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ  
НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

© Т. А. Роїк, д.т.н., професор, А. П. Гавриш, д.т.н.,  
професор, Ю. Ю. Віцюк, аспірантка, О. О. Мельник,  
аспірантка, НТУУ «КПІ», І. В. Попов, інженер, Київ, Україна

**В статье показано влияние технологии изготовления  
на закономерности формирования структуры и свойств  
новых подшипниковых материалов на основе шлифоваль-  
ных отходов инструментальных быстрорежущих сталей  
Р6М5, Р6М5К5 и Р6М5Ф3 в присутствии твердой  
смазки — фторида кальция.**

**In the article the influence of making technology for the struc-  
ture formation and properties of new bearings materials  
based on tool high-speed steels Р6М5, Р6М5К5, Р6М5Ф3  
abrasive wastes with solid lubricant CaF<sub>2</sub> for heavy exploita-  
tion conditions have been presented.**

**Постановка проблеми**

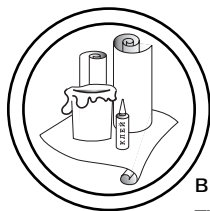
Вимоги науково-технічного прогресу потребують нових матеріалів, які поряд із звичайним комплексом механічних та технологічних властивостей мали б особливі функціональні характеристики, зокрема такі, що суттєво підвищують надійність та довговічність об'єктів машинобудування та приладобудування.

Це у повній мірі стосується підшипникових матеріалів, що працюють з мастилом у неважких умовах роботи (невисокі навантаження, швидкості ковзання, температури до 100 °С), а особливо це важливо для вузлів тертя, що працюють у екстремальних умовах — при підвищених навантаженнях, у агресивному середовищі, при підвищених та високих температурах, в умовах високих швидкостей ковзання [1].

Порошкові підшипникові матеріали позбавлені цих недоліків і мають перед литими матеріалами багато переваг і широкий спектр можливостей, коли стає можливим поєднувати такі вихідні компоненти, що методами лиття не поєднуються.

Проте, суттєвим негативним фактором для порошкових матеріалів, що перешкоджає їх широкому використанню, є їх дуже висока вартість, внаслідок дорогої вихідної сировини (порошків), складність та дорожнеча обладнання для її виготовлення.

Отже, одержання можливості широкомасштабного використання вторинної шламкової сировини у повторному циклі виробництва, розробка нових ресурсозберігаючих технологій, які здатні забезпечити одержання нових ефективних матеріалів та



виробів з них, є надзвичайно актуальним завданням як з наукової, так і практичної точок зору.

### Мета роботи

Метою роботи було дослідження особливостей формування структури та комплексу властивостей підшипникових матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальних швидкорізальних сталей Р6М5, Р6М5К5 та Р6М5Ф3 у присутності твердозмащувальної речовини — фториду кальцію.

### Результати проведених досліджень

Об'єктами дослідження було обрано порошкові відходи інструментальних швидкорізальних сталей Р6М5, Р6М5К5 та Р6М5Ф3 (ГОСТ 19265-73), які відносяться до класу теплостійких сталей та зберігають високі міцнісні властивості, високу окислостійкість до температур 500–550 °С (табл. 1).

Для наведених у табл. 1 сталей характерна висока концентрація вуглецю, а оскільки всі присутні легуючі елементи є сильними карбідоутворюючими елементами (окрім кобальту), у структурі сталей присутня велика кількість карбідів різного складу та природи [2, 3].

Вказані карбіди легуючих елементів типу  $Me_6C$ ,  $Me_7C_3$ ,  $MeC$ ,  $Me_3C$  сприяють підвищенню міцнісних властивостей, окислостійкості та розширюють область нормального зносу у процесі тертя, що було встановлено за результатами досліджень, наведеними на рис. 1.

Шламові відходи вказаних марок сталей утворюються на операціях шліфування ріжучого інструменту — фрез, різців тощо, і, через забруднення абразивною крихтою від шліфувальних кругів, не використовуються у подальшому та вивозяться у відвали. Для очищення відходів сталей від абразиву застосовували методику [2] магнітної се-

Таблиця 1  
Хімічний склад сталей Р6М5, Р6М5К5 та Р6М5Ф3, мас. %

Елемент	Сталь Р6М5	Сталь Р6М5К5	Сталь Р6М5Ф3
C	0,82–0,90	0,84–0,92	0,95–1,05
Mo	4,8–5,3	4,8–5,3	4,8–5,3
Cr	3,8–4,4	3,8–4,3	3,8–4,3
W	5,5–6,5	5,7–6,7	5,7–6,7
V	1,7–2,1	1,7–2,1	2,3–2,7
Co	—	4,7–5,2	—
Si	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Mn	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Fe	решта	решта	решта

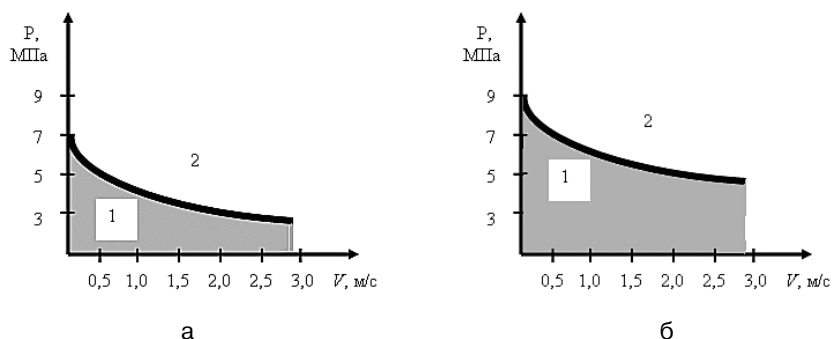
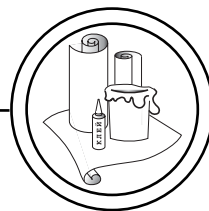


Рис. 1. Діаграма областей нормального зносу пари тертя без пошкоджень (1) та з пошкодженнями (2) робочих поверхонь композицій Fe+20 % мас. Р6М5 (а) та Fe+80 % мас. Р6М5 (б) у залежності від навантаження та швидкості ковзання (контртіло—загартована сталь Р18)

парації з використанням установки — магнітного сепаратора, розробленого ІПМ НАН України, який дозволяє очищувати відходи з продуктивністю 20 кг за годину. Залишок абразивної крихти після очищення становить близько 2 %. Вигляд магнітного сепаратора показано на рис. 2.

Для зниження вмісту кисню проводили операцію відновлювального відпалу порошоків-відходів сталей у середовищі водню за температур 850–1000 °С протягом 1,5–2 год. Відновлювальний відпал знизив загальний вміст  $O_2$  до 0,4 %, а також забезпечив одержання однорідної мікроструктури, яка відрізняється рівномірним розподілом карбідів. Водночас у зразках з невідпалених порошоків відзначено сліди біографічного характеру — залишки литої структури у вигляді зернограничних виділень карбідів.

У результаті відпалу карбіди типу  $Me_6C$ ,  $Me_{23}C_6$ ,  $Me_7C_3$ ,  $MeC$ ,  $Me_3C$ , сфероїдизуються, кількість карбідів цементитного ти-

пу знижується, інтенсифікуються процеси дисперсійного твердіння.

Одержаний після відпалу конгломерат (губку) розмелювали на дробильній машині ЛДМ-150, після чого визначали гранулометричний склад. Після вказаних підготовчих операцій сталеві порошки просіювали через сито № 0160.

Як тверду змащувальну речовину застосовували фторид кальцію ( $CaF_2$ ). Порошки  $CaF_2$  висушували від вологи за температури 120 °С протягом 1 год. та просіювали через сито № 0125. Кількість  $CaF_2$  було обрано у ме-



Рис. 2. Загальний вигляд магнітного сепаратора



жах 4–8 мас. % з таких причин: менше 4 %  $\text{CaF}_2$  він не повною мірою виконує функції твердої змазки, тобто не достатньо захищає поверхні тертя від зносу, а більше 10 % вельми знижує характеристики міцності та пластичності пресовок. Для усунення сегрегації легшого компонента шихти —  $\text{CaF}_2$  застосовували «мокре» змішування. Як зволожувач використовували до 1–2 % бензину або етилового спирту.

У результаті пресування композиційних сумішей при тисках 700–900 МПа були одержані брикети, що мали пористість 20–22 %.

Спінання зразків здійснювали у муфельній печі у середовищі висушеного водню (точка роси становить  $-40^\circ\text{C}$ ) за температур 1150–1200  $^\circ\text{C}$  [2]. Після спінання пористість становила 11–13 %. Час витримки за температури спінання становив 2 год.; як засипку використовували прокалений (у середовищі водню за температури 1000  $^\circ\text{C}$ ) глинозем.

Після спінання в матеріалах утворилась гетерогенна структура, яка складається з металевої матриці та рівномірно роз-

поділених в ній неметалевих частинок фториду кальцію, що видно з рис. 3.

Металева матриця, всіх досліджуваних матеріалів, складається з перлітно-карбідної структури. Карбідна фаза у всіх випадках представлена сполуками, що описуються формулами  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Me}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Me}_6\text{C}$  і  $\text{MeC}$  (фази проникнення). Природу вказаних складних карбідів детально описано у наших попередніх дослідженнях [1, 3].

Кобальт (в сталі Р6М5К5) на відміну від заліза, вольфраму, молібдену, ванадію і хрому не утворює самостійних карбідів. Він присутній у  $\alpha$ -твердому розчині, а також у карбіді  $\text{Me}_6\text{C}$ , заміщаючи частину атомів інших металів [5]. Так, виявлено фазу  $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}_6$  з кубічною ґраткою ( $a = 1,101$  нм). Посилює стійкість твердого розчину проти знеміцнення при нагріванні, підвищуючи температуру початку  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення (це спостерігається при вмісті кобальту  $\sim 5$  %, як у нашому випадку); сприяє більш повному виділенню вольфраму і молібдену у виді карбідів, зменшуючи, очевидно, розчинність цих елементів у  $\alpha$ -фазі, що веде до підвищення жароміцності;

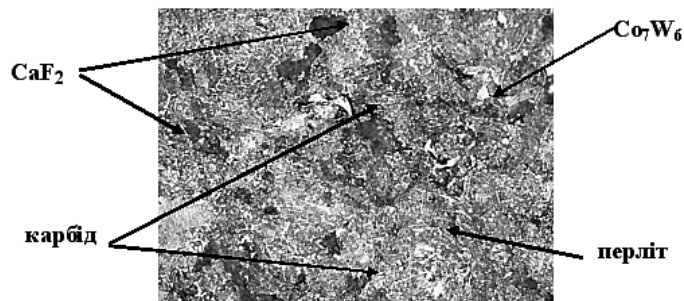
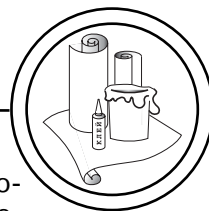


Рис. 3. Мікроструктура матеріалу Р6М5Ф3+5 %  $\text{CaF}_2$ , шліф травлений,  $\times 500$



уповільнює коагуляцію карбідних частинок, що виділяються. До того ж кобальт, як і молібден, сприяє підвищенню стійкості матеріалів проти абразивного зносу і теплостійкості до 600 °С.

Окрім карбідних складових виявлено фази, що виділяються додатково унаслідок впливу кобальту: інтерметаліди типу  $(Co, Fe)_7(W,Mo)_6$ , тобто  $\theta$ -фаза, яка розташовується в серцевині зерна і має твердість до 1050 HV [3]. Виділення зміцнювальної  $\theta$ -фази відбувається при наявності в сталі майже однакової концентрації вольфраму і молібдену. У мікроструктурі (рис. 3) присутні світлі, погано травлені, подібно карбідам, ділянки підвищеної твердості, а на рентгенограмі виявляються лінії фази з ромбоєдричною ґраткою, що збігаються з найбільш сильними лініями фази  $Co_7W_6$ .

Таким чином, у процесі виготовлення матеріалів із використанням порошоків-відходів швидкорізальних сталей у присутності  $CaF_2$  формується макроструктура, що представляє собою міцну, достатньо пластичну металеву матрицю, що складається з  $\alpha$ -твердого розчину із залягаючими у ній твердими зернами карбідів легуючих елементів (сорбітоподібний перліт) та  $\theta$ -фазою (для матеріалу на основі відходів сталі Р6М5К5), а також рівномірно розподіленими в ній включеннями протизадірної домішки  $CaF_2$ .

Зазначена структура з погляду загальної закономірності для антифрикційних матеріалів є найбільш сприятливою для оптимального поєднання фізико-механічних і триботехнічних властивостей, значення яких подано в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-механічні і триботехнічні властивості матеріалів на основі відходів сталей Р6М5, Р6М5К5 та Р6М5Ф3

№ з/п	Склад, % мас.	$\sigma_{\text{виг}}$ , МПа	КС, Дж/м <sup>2</sup>	НВ при 20 °С, МПа	НВ при 500 °С, МПа	Коеф. тертя при 7 МПа	Інтенсивність зносу при 7 МПа, мкм/км	Гранично-допуст. навантаження, МПа	Гранично-допуст. температура, °С
1	Р6М5 + 5CaF <sub>2</sub>	480–510	650–710	750–850	630–680	0,15–0,16	28–36	7,5	500
2	Р6М5К5 + 5CaF <sub>2</sub>	510–520	660–720	760–860	650–720	0,14–0,15	26–29	8,5	600
3	Р6М5Ф3 + 5CaF <sub>2</sub>	520–530	640–700	770–880	660–720	0,16–0,17	27–33	8,5	550
4	ЖГр3М15 [4]	290–410	80–94	700–800	—	0,29–0,34*	470*	3,0	400

\*Коефіцієнт тертя та знос при навантаженні 5 МПа.



Випробування на тертя і знос проводили на високотемпературній машині тертя ВМТ-1 у парі з контртілом із сталі Р18 ( $HRC_e = 52-54$ ) при навантаженнях 3–8,5 МПа, швидкості ковзання 1 м/с і температурах зовнішнього нагрівання 500–600 °С.

З даних табл. 2 видно, що нові матеріали в порівнянні з застосовуваним [4] у даний час за аналогічних умов роботи матеріалом мають більш високі як міцносні, так і антифрикційні властивості, а також здатні працювати при більш високих температурах і витримувати набагато більші гранично-допустимі навантаження.

1. Роїк Т. А. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації / Роїк Т. А., Киричок П. О., Гавриш А. П. — К. : НТУУ «КПІ», 2007. — 404 с. 2. Роїк Т. А. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11РЗМЗФ2. Частина 1. — Технологічні фактори одержання матеріалів і їх вплив на структуру / Роїк Т. А., Холявко В. В., Луфференко О. С. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 3. — С. 47–52. 3. Роїк Т. А. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11РЗМЗФ2. Частина 2. — Фазовий склад, структура і властивості матеріалів / Роїк Т. А., Холявко В. В., Луфференко О. С. — 2009. — № 4. — С. 72–78.

### Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити висновок, що отримана гетерогенна структура нових матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальних швидкорізальних сталей Р6М5, Р6М5К5 та Р6М5Ф3 з домішками фториду кальцію (твердого мастила), що утворюється в результаті розробленої комплексної технології одержання та зміцнення матеріалів, надає сплавам високих антифрикційних властивостей, котрі зберігаються при роботі в умовах температур до 900 °С на повітрі.

Рецензент — О. І. Юркова, д.т.н.,  
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 04.10.10