

**Гальчук Т.Н.**Луцький національний технічний  
університет,  
м. Луцьк, Україна**ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОРОШКУ  
СТАЛІ ШХ15, ОТРИМАНИХ ІЗ ВІДХОДІВ  
МАШИНОБУДУВАННЯ****Вступ**

В сучасних пристроях, що забезпечують рух з'єднань деталей, використовуються різні антифрикційні матеріали, серед яких велика кількість спечених багатокomпонентних композицій. Володіючи зниженими властивостями міцності порівняно із литими, спечені матеріали мають ряд переваг – краще припрацювання в процесі тертя, менше зношують сполучену деталь, характеризуються стабільним коефіцієнтом тертя. Поєднання декількох компонентів, що мають різко відмінні фізико-механічні властивості дозволяє створювати спечені композиції з унікальними і важливими для техніки властивостями – самозмащенням, високою теплостійкістю, хорошими демпфуючими характеристиками тощо [1].

До спечених антифрикційних матеріалів відносяться також антифрикційні матеріали на основі порошкових сталей. Порошки підшипникових сталей – універсальний матеріал, який придатний для всіх умов роботи вузла тертя. Одним із способів отримання порошку підшипникової сталі ШХ15 є виділення його із шліфувальних шламів [2, 3]. В Луцькому НТУ розроблено технологічну схему отримання порошку сталі ШХ15 із шліфувальних шламів підшипникового виробництва (ПАТ „СКФ-Україна”, м. Луцьк) [4]. Дана технологія дозволяє отримувати порошок, близький за складом до початкової сталі і може використовуватися для виготовлення спечених виробів триботехнічного призначення. Використання металовідходів машинобудівного виробництва робить виготовлення деталей відносно дешевим, порівняно швидко окупним. Тому актуальним є проведення досліджень щодо створення композиційного матеріалу з використанням як компонента металічного порошку сталі ШХ15, отриманого із шліфшламів.

**Мета роботи** – дослідження триботехнічних властивостей спечених композиційних матеріалів на основі порошку сталі ШХ15, отриманого із відходів машинобудівного виробництва.

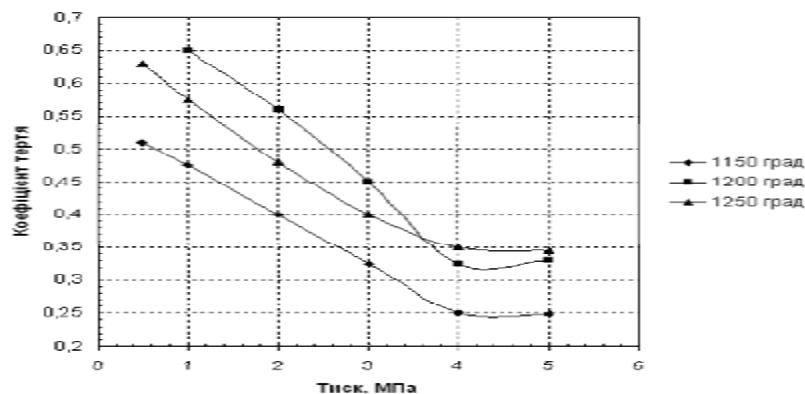
**Викладення основного матеріалу**

У даній роботі розглянуто триботехнічні властивості спеченого порошкового матеріалу із сталі ШХ15 так і композиту на його основі. Композицію на основі порошку сталі ШХ15 готувалися із використанням порошоків міді ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) та графіту ГС4 (ГОСТ/ТУ – 8295).

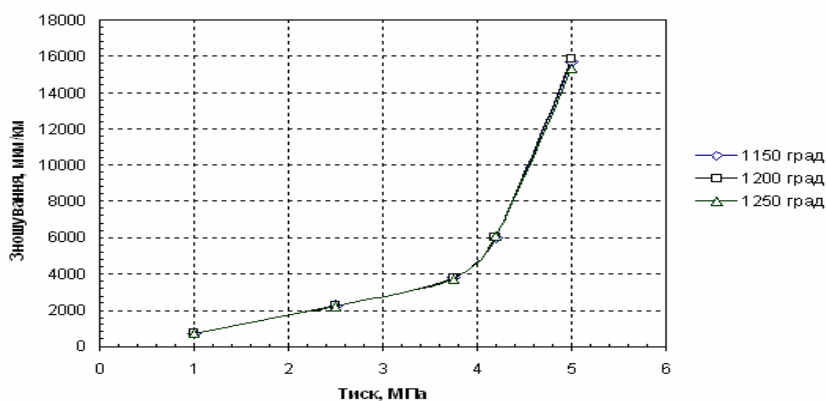
Суміш початкових порошоків перемішували у віброзмішувачі протягом 1,5 - 2 год. Пресування зразків здійснювалося при тиску 200 - 800 МПа. Зразки спікали в металевих коробках, заповнених  $Al_2O_3$ , в електропечі при „рідкому затворі”. Температура спікання 1100 - 1250 °С. Час спікання складав 2 години з моменту встановлення заданої температури.

Триботехнічні характеристики – зношування та коефіцієнт тертя визначали на лабораторній дослідній машині моделі СМЦ-2. Дослідження проводили за схемою з відкритим кінематичним контуром, коли один із зразків нерухомий в режимах граничного тертя і без змащення. Схема контакту вал-вкладка. Контртіло – із сталі 45 ГОСТ 1050-88 з твердістю 45 HRC. Швидкість ковзання до 8 м/с при контактному тиску, в парі тертя, до 15 МПа.

В процесі дослідження встановлено, що коефіцієнт тертя спеченої сталі ШХ15 повільно зменшується із збільшенням нормального навантаження (рис. 1). Це можна пояснити зменшенням модуля зсуву поверхневих шарів в результаті фрикційного нагрівання.



а



б

Рис. 1 – Коефіцієнт тертя (а) та зношування (б) сталі ШХ15, спеченої при різних температурах

При навантаженні 4 МПа коефіцієнт тертя стабілізується. Високе значення коефіцієнта тертя при малих навантаженнях ( $f_m \approx 0,5 - 0,6$ ) може бути зумовлено утворенням окисної плівки на поверхні зразків.

Величина зношування у разі збільшення тиску зростає синхронно із зменшенням коефіцієнта тертя. В результаті збільшення навантаження в спеченій сталі ШХ15 практично зразу мають місце пластична деформація і розрихлення поверхневого шару. Це може сприяти швидкому утворенню шару деградованого матеріалу, що має невеликий модуль зсуву [5]. Тому при номінальному тиску біля 4 МПа інтенсивність зношування визначається властивостями цього шару і приймає катастрофічний характер.

Температура спікання при цьому не має суттєвого впливу на величину зношування. Відмічено, що лише при тиску, більшому за 4 МПа, зношування дещо зменшується у разі збільшення температури спікання. Причинами високого зношування спеченої сталі ШХ15 під час сухого тертя є: низька активність процесу твердофазного спікання під час отримання матеріалу, що зумовлює недосконалу структуру і невисоку міцність; відсутність протизношувальних і антизадирих компонентів у матриці; висока температура в зоні тертя, яка сприяє зношуванню.

Для отримання антифрикційного матеріалу на базі переробленого порошку підшипникової сталі в початкову шихту водили порошки міді та графіту. В роботі [6] було визначено оптимальний склад матеріалу (4 мас.% міді, 2 мас.% графіту, решта порошок сталі ШХ15) і умови отримання спеченого матеріалу для втулки ковзання автомобільних стартерів. Для композиту порошок сталі ШХ15 – мідь – графіт, спресованого при 500 МПа коефіцієнт тертя (рис. 2, а) послідовно зменшується із збільшенням номінального тиску під час тертя. Ця залежність аналогічна залежності коефіцієнта тертя спеченої сталі ШХ15 (рис. 1, а). Однак коефіцієнт тертя матеріалу ШХ15 – мідь – графіт менший за коефіцієнт тертя спеченої сталі ШХ15 при однакових тисках, внаслідок наявності графіту і цементиту в структурі композиту. Саме наявність цих структурних складових підвищує зносостійкість композиту порівняно із зносостійкістю сталі ШХ15 (рис. 1, б).

Зношування при тиску до 5 МПа не є катастрофічним (рис. 2, б). Підвищення зносостійкості і відсутність катастрофічного зношування, порівняно із спеченою сталлю ШХ15, зумовлені також зменшенням пористості, яка може регулюватися і тиском пресування.

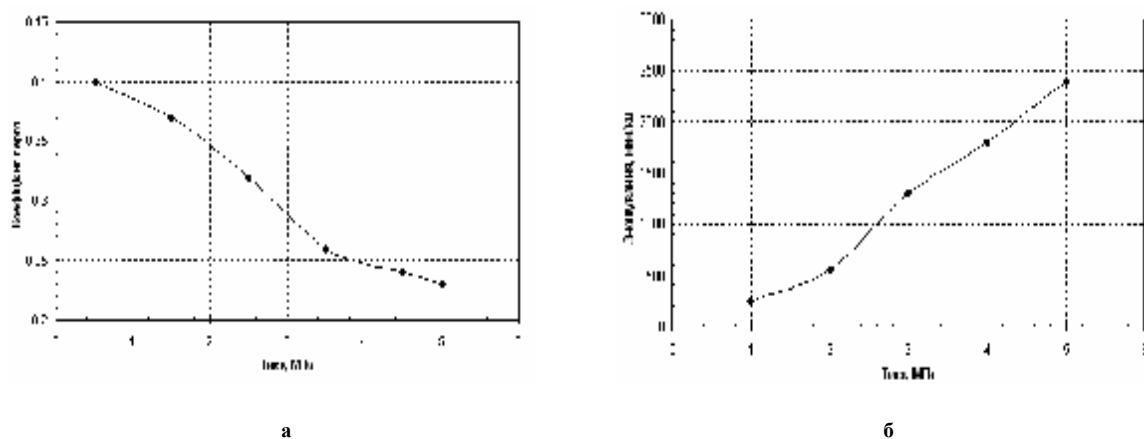


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта тертя (а) і зношування (б) композиту ШХ15 – 2 (мас.%) С – 4 (мас.%) Си від тиску

Досліджувався вплив тиску пресування на тертя композитів, що вивчаються. Дослідження на тертя проводили при тиску 4,5 МПа. Встановлено, що коефіцієнт тертя майже не залежить від тиску пресування (рис. 3), а інтенсивність зношування послідовно зменшується. Більш висока температура спікання дещо збільшила зносостійкість і практично не вплинула на коефіцієнт тертя.

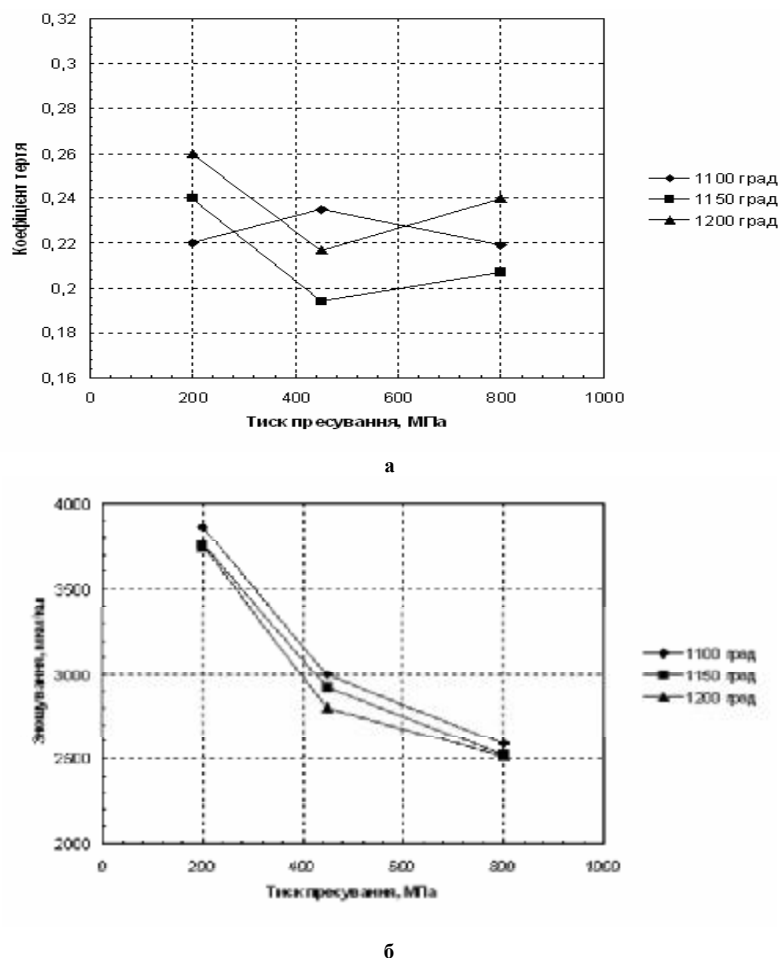


Рис. 3 – Вплив тиску пресування і температури спікання на коефіцієнт тертя (а) і зношування (б) композиту ШХ15– 2 (мас.)% С – 4 (мас.)% Сu

Розробка порошкового композиту, забезпечує високі характеристики міцності та зносостійкість, є одним із методів підвищення надійності високонавантажених вузлів тертя. Тому в роботі досліджувалась можливість розробки матеріалу на основі раціонального поєднання структурних складових композиту для вирішення цієї задачі.

Для дослідження були вибрані втулки направляючі гальмівної важільної передачі залізнодорожного рухомого складу, що виготовляються із спеченого матеріалу ЖГР1, ПА–ЖГРДК ТУ РБ 05893818.263–97.

Встановлено, що катастрофічні зміни геометричних розмірів втулки зумовлені двома факторами:

1 – високою пластичною деформацією спеченого малолегованого заліза високої пористості. Це підтверджується характером деформації при стиску зразків даного матеріалу, зокрема при напруженні тиску 600 МПа лінійні розміри змінюються на 10 % (рис. 4);

2 – підвищене зношування внаслідок тяжких умов експлуатації (попадання в зазор абразивних частинок і висока температура в плямі контакту).

Також ці два фактори негативно впливають на змащування спряження, оскільки схлопування пор чинить опір доступу змазки в зону тертя.

Для підвищення пружних характеристик спечених матеріалів необхідно зменшити деформування і абразивне зношування. Отримані пористі композиційні матеріали на основі порошку ШХ15 з вмістом 3 - 8 (мас.) % міді та 1 (мас.) % графіту задовольняють ці вимоги (рис. 4). При малих степенях деформації ( $\approx 3$  %) напруження лінійно залежить від деформації і досягає величини  $\approx 600$  МПа. Подальше збільшення навантаження супроводжується інтенсивним пластичним деформуванням. Найбільшу границю міцності при стисканні  $\approx 3000$  МПа має композиційний матеріал із вмістом порошку ШХ15 – 94 (мас.) %, міді – 5 (мас.) %, графіту – 1 (мас.) %.

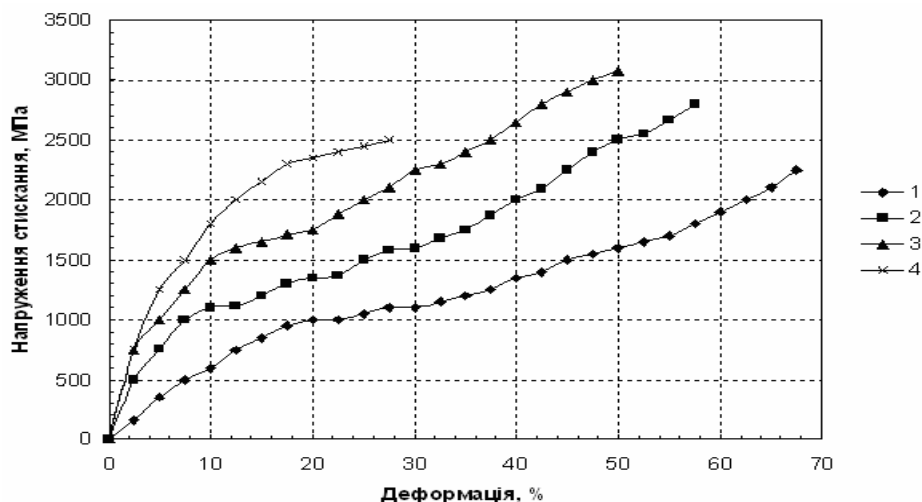


Рис. 4 – Залежність напруження стиснення від деформації:

1 – зразок, виготовлений із стандартного матеріалу ЖГ рД;

2 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 96 % порошок сталі ШХ15, 1 % графіту, 3 % міді;

3 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 94 % порошок сталі ШХ15, 1 % графіту, 5 % міді;

4 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 91 % порошок сталі ШХ15, 1 % графіту, 8 % міді

Для композиційного матеріалу із збільшеним вмістом вуглецю – 2 (мас.) % та вмістом порошку ШХ15 – 93 (мас.) %, міді – 5 (мас.) % збільшується лінійна ділянка залежності напруження від деформації (рис. 5). Як видно з рисунка, при деформації 8 % напруження складає 1200 - 1400 МПа. Це дає можливість прогнозувати більш високі експлуатаційні властивості виробів виготовлених із матеріалу такого складу. Подальше збільшення вмісту графіту до 3 (мас.) % в композиції не покращують досягнутих характеристик – межа пружності різко зменшилась, а ступінь допустимої деформації знизився.

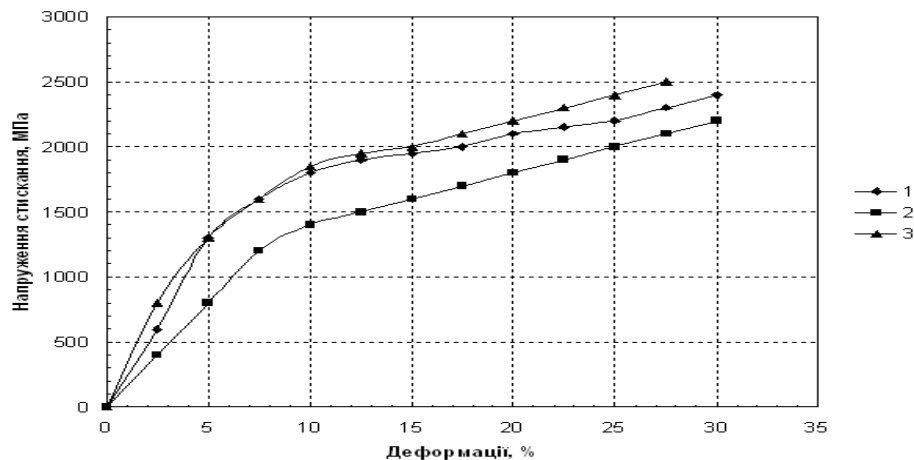


Рис. 5 – Залежність напруження стиснення від деформації:

1 – зразок виготовлений із композиційного матеріалу – 95 (мас.) % порошок сталі ШХ15, 2 (мас.)% графіту, 3 (мас.)% міді;

2 – зразок виготовлений із композиційного матеріалу – 93 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 2 (мас.)% графіту, 5 (мас.) % міді;

3 – зразок виготовлений із композиційного матеріалу – 90 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 2 (мас.)% графіту, 8 (мас.)% міді

Таке зниження властивостей міцності викликане:

- утворенням крупних пор, які сформувалися в наслідок рідкої фази евтектичного складу під час спікання;

- наявністю розшарування внаслідок великої кількості вільного графіту, частинки якого знижують міцність металічного каркаса, подібно порам [7].

Структура спечених матеріалів, що містять 1 - 3 (мас.) графіту і 3 - 8 (мас.) % міді, є композицією із феритно-перлітною матрицею, структурно-вільним графітом і включеннями міді (рис. 6).

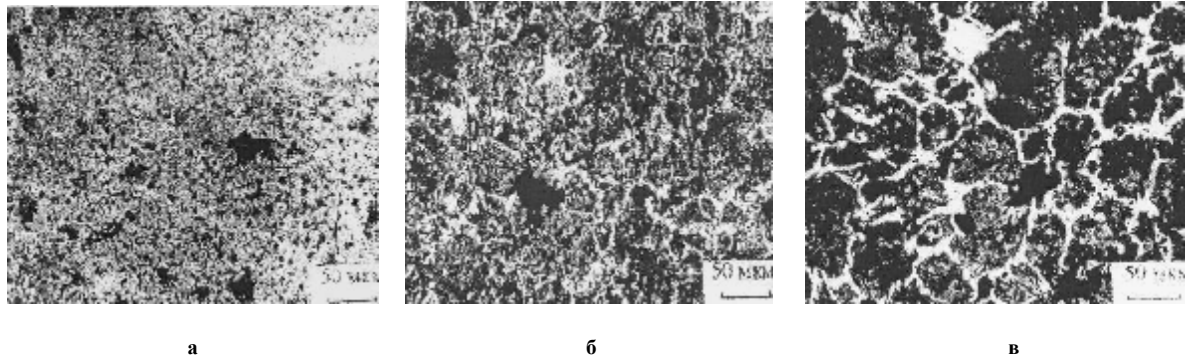


Рис. 6 – Композити, спечені у водні:

а – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 91 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 1 (мас.)% графіту, 8 (мас.)% міді;  
 б – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 90 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 2(мас.)% графіту, 8 (мас.)% міді;  
 в – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 89 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 3(мас.)% графіту, 8 (мас.)% міді

Структура зразків із вмістом 1 (мас.)% графіту складається із зерен фериту і перліту, частинок міді та графіту (рис. 6, а). Твердість після спікання складала  $HV \approx 1800 - 2200$  МПа. Підвищення вмісту графіту до 2 (мас.)% насичує матеріал вуглецем, і структура матриці стає перлітною. Надлишок вуглецю утворює карбідну фазу, що розміщується у вигляді сітки по межі перлітних зерен (рис. 6, б). Твердість після спікання складала  $HV \approx 2100 - 2300$  МПа. У разі збільшення вмісту графіту в початковій шихті до 3 (мас.)% структура матриці залишається перлітною, проте збільшується кількість карбідної фази порівняно із шихтою з 2 (мас.)% вуглецю. По межі зерен видно карбідну сітку і ділянки, на яких карбіди коагулюються у великі скупчення (рис. 6, в). Наявність на границях зерен карбідної сітки не є прийнятною із-за крихкості карбідної складової. Твердість після спікання складала  $HV \approx 2600$  МПа.

Зміна вмісту міді не суттєво впливає на структуру спечених зразків. Розподіл пор, графіту, наявність цементитної сітки та характер зміни структури матеріалів із вмістом 3 - 8 (мас.)% міді аналогічні.

Як відомо, водень зв'язує адсорбовані речовини на поверхні порошкових частинок і сприяє десорбції газів з поверхні графіту, це покращує розчинення графіту в залізі і сприяє утворенню цементиту. Тому спікання у водні збільшило швидкість насичення заліза вуглецем, а це призвело до утворення цементиту з більш високим його вмістом у композиті, ніж під час спікання в інших атмосферах.

Триботехнічні характеристики отриманих композитів досліджувалися на зразках, просочених маслом И-40 А. Швидкість ковзання – 5 м/с, тиск – 10 МПа. Невисокий тиск вибрали із-за зношування спечених матеріалів залежно від фазового складу. При більш високому тиску зношування зазвичай супроводжується крихким викришуванням частинок композиту, особливо при великому вмісті графіту. Критерієм зношування є зміна об'єму зразка залежно від шляху тертя. Об'єм вимірювали через рівні проміжки часу. Результати вимірювань зносостійкості наведено на рис. 7.

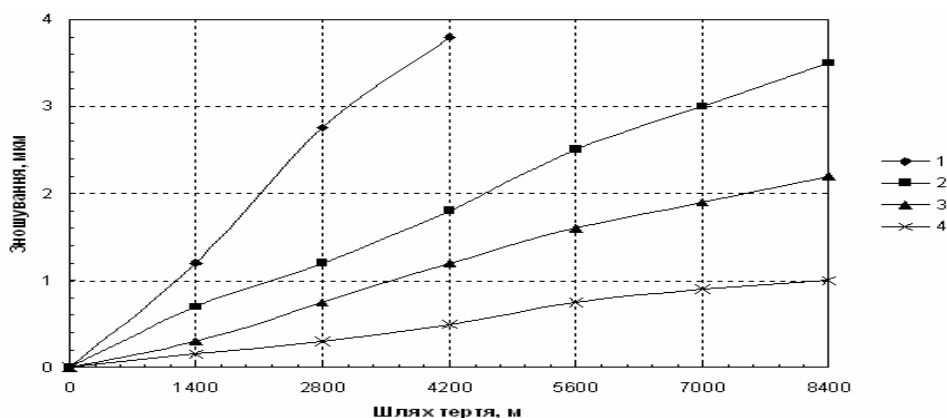


Рис. 7 – Залежність зношування композиційних матеріалів від шляху тертя:

1 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 94(мас.)% порошок сталі ШХ15, 1 (мас.)% графіту, 5(мас.)% міді;  
 2 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 93 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 2 (мас.)% графіту, 5 (мас.)% міді;  
 3 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 95 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 2 (мас.)% графіту, 3(мас.)% міді;  
 4 – зразок, виготовлений із композиційного матеріалу – 89 (мас.)% порошок сталі ШХ15, 3 (мас.)% графіту, 8 (мас.)% міді

Більш високу зносостійкість має композит із вмістом графіту 3 (мас.)%. Це зумовлено високою твердістю спеченого матеріалу і наявністю карбідної сітки по межах зерен. Цей композит має і най-

менший коефіцієнт тертя, який в середньому становить 0,09. В інших композитах, що досліджувалися, коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування вищі. Отримані експлуатаційні характеристики пов'язані з твердістю спечених зразків (табл. 1).

Таблиця 1

### Результати досліджень спечених композитів ШХ15–Сi–С на тертя

Вміст міді в початковій шихті, (мас.) %	Вміст вуглецю в початковій шихті, (мас.) %	Твердість за Віккерсом, МПа	Коефіцієнт тертя	Об'ємне зношування, мкм <sup>3</sup> /м
5	1	1900	0,25	$2 \times 10^5$
5	2	2150	0,15	$0,43 \times 10^5$
3	2	2100	0,13	$0,28 \times 10^5$
8	3	2300	0,09	$0,12 \times 10^5$

Металографічне вивчення поверхні тертя після дослідження показало, що ефект полірування поверхні відсутній, а зношування має в основному абразивний характер, що зумовлено наявністю великої кількості частинок зношування. Пори під час тертя замазувалися в наслідок попадання в них частинок зношування, а також із-за пластичного деформування приповерхневого шару. Низький тиск і наявність графіту на поверхні тертя виключають явище схоплювання поверхонь, яке спостерігається в процесі адгезійного зношування. Під час підвищення тиску адгезійного схоплювання також не спостерігалось.

### Висновки

Розробка порошкового композиту, забезпечує високі характеристики міцності та зносостійкість, є одним із методів підвищення надійності високонавантажених вузлів тертя. Триботехнічні характеристики спечених порошкових матеріалів на основі порошку сталі ШХ15 для умов середніх навантажень в основному залежать від твердості композиції. Перевірено експериментально, що більш високу зносостійкість і найменший коефіцієнт тертя, який в середньому становить 0,09 має композит із вмістом графіту 3(мас.) % та міді 8 (мас.)% при швидкості ковзання – 5 м/с, тиску – 10 МПа. Це зумовлено високою твердістю спеченого матеріалу  $HV \approx 2300$  МПа і наявністю карбідної сітки по межах зерен. Композиційний матеріал на основі порошку сталі ШХ15, отриманий за технологією Луцького НТУ, має задовільні триботехнічні властивості, що не поступається спеченому матеріалу залізо-графіт і більш високі характеристики міцності. Може використовуватися в якості антифрикційного для умов сухого тертя при помірних навантаженнях або у навантажених вузлах тертя, що працюють із змащенням, а також служити прототипом для розробки матеріалів різного конструкційного призначення.

### Література

1. Федорченко И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. – К.: Наукова думка, 1980. – 404 с.
2. Зозуля В.Д. Применение шлифовальных металлоабразивных отходов в порошковой металлургии / В.Д. Зозуля // Порошковая металлургия. – 1988. – № 3. – С. 95–99.
3. Разработка технологии получения композиционного порошка из шламовых отходов подшипникового производства / Б. И. Бондаренко, В.П. Якубовский, Д.Н. Федоров [и др.] // Экотехнологии и ресурсо-сбережение. – 2002. – № 4. – С. 32-35.
4. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва: Патент на винахід 63558 А. Україна. МКИ 7 B22 F 3 / 04 / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, Повстяной О.Ю. – № 2003054065; Заявл. 06.05.03; Опубл. 15. 01. 04. Бюл. № 1. – 3 с.
5. Рудь В.Д. Теорія простих процесів стосовно структурно-неоднорідних матеріалів / В.Д. Рудь, Л.М. Клепач, Т.Н. Гальчук // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом „Інженерна механіка”). – 2006. – Випуск 18. – С. 322-330.
6. Гальчук Т.Н. Властивості композицій на основі порошку сталі ШХ15, отриманого із шламових відходів підшипникового виробництва / Т.Н. Гальчук, В.Д. Рудь // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за галузями знань „Машинобудування та металообробка”, „Інженерна механіка”, „Металургія та матеріалознавство”). – 2011. – Випуск 32. – С. 69-73.
7. S. Baneryee, P. Mukunda. Mechanism of carbon adsorption by iron during sintering of iron – graphite / S. Baneryee, P. Mukunda // Power Metallurgy – 1984. – V. 27, № 8.– P. 93–96.

Надійшла 04.07.2012