

# Інструмент, порошки, пасти

---

УДК 621.9: 621.923

**В. І. Лавріненко**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*lavrinenko@ism.kiev.ua*

## **Пористість і водопоглинання композитів інструментального призначення як чинники підвищення зносостійкості шліфувальних кругів з НТМ. Повідомлення 1. Абразивні композити з НТМ**

*Вперше визначено умови використання пористості абразивних композитів з надтвердих матеріалів у процесі водопоглинання. Показано, як змінюються фізико-механічні властивості (твердість, показники міцності, електропровідність) композитів під впливом водопоглинання, визначено час дії такого ефекту та досліджено умови підвищення їх зносостійкості в шліфувальному інструменті.*

**Ключові слова:** абразивні композити з НТМ, ефект водопоглинання, пористість, властивості композитів, зносостійкість.

Дослідженнями автора [1] доведено, що спрямоване формування структурозміненого поверхневого шару контактних поверхонь круга з надтвердих матеріалів (НТМ) і оброблюваного виробу, що відбувається за рахунок перерозподілу елементного складу матеріалу при тепловому і плазмовому впливах, дозволяє винайти умови підвищення зносостійкості цих контактних поверхонь. У значній мірі це пов'язане з наявністю пористості ріжучого шару кругів.

Круги з НТМ використовують здебільшого для шліфування із застосуванням різних технологічних рідин на водяній основі. Абразивовмісний робочий шар, що має певну пористість, може поглинути деяку кількість рідини. Цю проблему у науковій літературі майже не досліджували, хоча наявність води може змінити, наприклад, електропровідність робочого шару при електрошліфуванні кругами з НТМ [2] або вплинути на стан контактних поверхонь [3]. Як було показано автором в [2], для досягнення ефекту зміни стану контактних поверхонь за рахунок нетрадиційних засобів, наприклад неявної поляризації, необхідно забезпечити наявність води у зоні обробки. У ряді випадків, наприклад при шлі-

фуванні без охолодження, цього зробити неможливо. Проте відомо [4], що ріжучий шар круга має певну пористість, яку практично не використовують для підвищення ефективності шліфування (рис. 1). Наявність пористості є характерною ознакою для багатьох матеріалів [5]. Водночас відомі [6, 7] ефекти заповнення рідиною пористих матеріалів (природних дисперсних систем, продуктів хімічної технології), але їх зовсім не вивчали для композитів з НТМ.

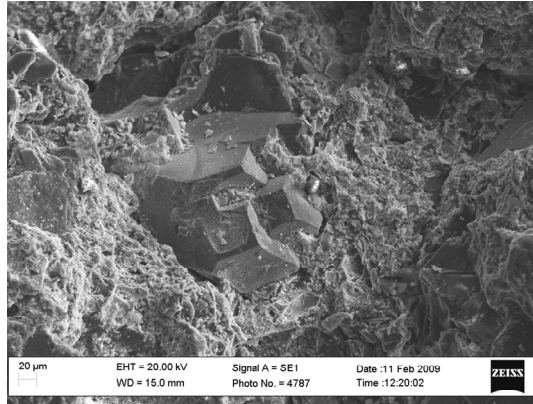


Рис. 1. Злам робочого шару круга на полімерній зв'язці В2-08 з наявністю пористості.

Метою даної роботи було дослідження особливостей попереднього поглинання абразивовмісним шаром круга з НТМ певної кількості води, зміни внаслідок цього властивостей всього робочого шару круга. Розглянуто вплив імпрегнаторів (у даному випадку це вода) на процес шліфування безпосередньо через зміну контактних процесів і опосередковано через зміну фізико-механічних властивостей [8].

### ВОДОПОГЛИНАННЯ АБРАЗИВОВІСНИМИ КОМПОЗИТАМИ

Метод визначення водопоглинання, згідно ГОСТ 473.3–81, базується на визначенні відношення маси води, яку поглинув зразок, до маси сухого зразка. У якості зразків використовували абразивовмісні та безабразивні композити на металічних і полімерних зв'язках розміром  $5 \times 5 \times 35$  мм. Зразки перед дослідженнями очищували від забруднення, висушували у сушильному шафі до стабілізації маси і охолоджували у вакуумному ексікаторі. Їх зважували і надалі витримували у воді при температурі її кипіння протягом 1 год і охолоджували у проточній воді не менше 5 хв. Після видалення надлишку води з поверхні зразків їх знову зважували. На рис. 2 представлено залежність водопоглинанням композитів від їх пористості.

Зі зростанням пористості пропорційно збільшується водопоглинання, що є закономірним для поглинання рідини речовинами [6]. Робочий шар кругів на керамічних і полімерних зв'язках має більшу поруватість, а на

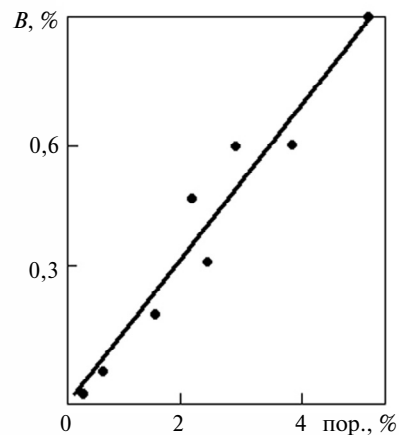


Рис. 2. Залежність водопоглинання абразивовмісних композитів від їх пористості.

металічних – найменшу. Дослідженнями автора виявлено також деякі тенденції, властиві для впливу характеристик алмазовмісних композитів на водопоглинання. Так, зі зростанням міцності зерен і наявності на них покриття водопоглинання підвищується, а зі зростанням зернистості шліфпорошків – знижується.

### ЗМІНА ЗНОСОСТІЙКОСТІ КРУГІВ З НТМ ПІД ВПЛИВОМ ВОДОПОГЛИННЯ

Було досліджено експлуатаційні показники шліфувальних кругів 12A2-45° 150×10×3×32 на полімерній зв'язці АС4МА 100/80 В1-13 100 та металічних зв'язках АС4 100/80 М1-04 100 і АС6 125/100 М020-2 100 у вихідному стані і після водопоглинання протягом 1 год при шліфуванні з продуктивністю 1200 мм<sup>3</sup>/хв кераміки В0К71. Реєстрували наступні показники:  $q_p$  – відносні витрати алмазних порошків в кругах при шліфуванні, мг/г;  $Ra$  – параметр шорсткості поверхні, що піддавали обробці, мкм;  $N_{\text{еф}}$  – ефективну потужність шліфування, кВт. Результати досліджень (табл. 1) показали, що покращення експлуатаційних показників не відбулося, а для зв'язки М1-04 зносостійкість круга навіть погіршилася. Тому дослідження впливу водопоглинання на експлуатаційні показники продовжували для значно більшого (до 150 год) часу водопоглинання і значно більшої кількості кругів з різними характеристиками. Всього було досліджено десять кругів на металічних (М1-10, М2-12Е, М020-2), керамічних (К17, ПК, ПК-01) і полімерних (В1-11П, В1-13) зв'язках різних виробників (фірми “Гльіч”, Росія, і “Winter”, Німеччина). Результати досліджень впливу ефекту водопоглинання на зносостійкість кругів з різними характеристиками наведено в табл. 2.

**Таблиця 1. Вплив водопоглинання (протягом 1 год) робочим шаром кругів з НТМ на показники процесу шліфування з охолодженням кераміки В0К71**

Робочий шар круга	Показник процесу шліфування	Значення показника процесу шліфування круга	
		вихідного	після водопоглинання
АС4 100/80 МА В1-13 100	$q_p$ , мг/г	0,98	1,00
	$Ra$ , мкм	0,49	0,57
	$N_{\text{еф}}$ , кВт	0,70	0,70
АС4 100/80 М1-10 100	$q_p$ , мг/г	0,25	0,39
	$Ra$ , мкм	0,44	0,41
	$N_{\text{еф}}$ , кВт	0,60	0,60
АС6 125/100 М020-2 100	$q_p$ , мг/г	0,39	0,39
	$Ra$ , мкм	0,31	0,28
	$N_{\text{еф}}$ , кВт	0,70	0,70

Залежність зносу  $K$  робочого шару кругів від часу їхньої витримки у воді наведено на рис. 3. Видно, що при збільшенні часу витримки від 19 до 150 год виникають умови для зниження зносу кругів. Обробка сукупності даних при  $K < 1,0$  (див. рис. 3) виявила, що частину кривої можна описати (з похибкою 12 %) функцією

$$K(t) = 0,88 + 2,32 \cdot 10^{-2} t - 2,5 \cdot 10^{-3} t^2 + 6,45 \cdot 10^{-5} t^3 - 7,18 \cdot 10^{-7} t^4 + 3,69 \cdot 10^{-9} t^5 - 7,19 \cdot 10^{-12} t^6,$$

де  $K$  – знос робочого шару круга, відносні одиниці;  $t$  – час витримки у воді, год.

**Таблиця 2. Вплив водопоглинання робочим шаром кругів з НТМ на їх зносостійкість при шліфуванні**

Характеристика круга	Оброблюваний матеріал	Час водопоглинання, год	Витрати НТМ круга, мг/г	
			вихідного	після водопоглинання
12А2-20° 125×3×3×20 В151 V120 (“Winter”)	Р6М5	24	2,47	0,64
		44		0,93
12А2-45° 125×10×5×32 ЛКВ 100/80 С10 (“Ильич”)	Р6М5	24	1,43	0,69
		58		0,30
12А2-45° 125×5×3×32 ЛКВ 100/80 К17 75	Р9М4К8	48	16,2	9,76
		16	31,4	25,4
12А2-45° 150×10×3×32 АС4 100/80 МА В1-1 100	ВК6ОМ	40	4,3	1,85
		40	1,52	0,58
12А2-45° 150×10×3×32 АС4 100/80 М1-04 100	Р6М5	26	0,55	0,34
		69		0,22
12А2-45° 150×10×3×32 АС 463/50 МА В1-11П 125	УБ316 (кераміка)	66	2,1	1,06
		65	5,7	3,6
12А2-45° 150×10×3×32 ЛКВм 10 М2-12Е 100	Р6М5	24	0,57	0,30
		41		0,20

Функція  $K(t)$  має мінімальне значення при  $t = 49$  год, тобто для підвищення зносостійкості кругів оптимальним є час витримки у воді 49 год, коли водопоглинання робочого шару кругів дозволяє знизити їх знос у 2,0–2,5 рази.

На кривій залежності  $K(t)$  (рис. 3) можна виділити чотири зони впливу ефекту водопоглинання робочим шаром кругів на їх зносостійкість.

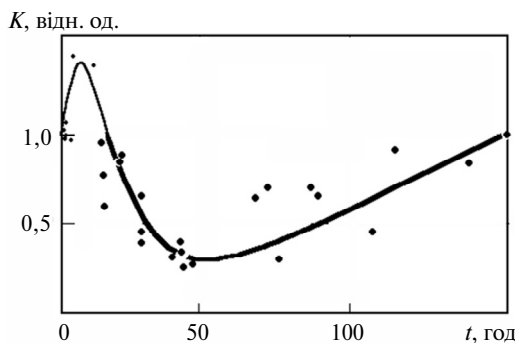


Рис. 3. Сукупна залежність зносу робочого шару кругів з НТМ від часу їх витримки у воді.

Перша зона (від 0 до 8 год) є зоною, де водопоглинання діє негативно і тільки збільшує знос кругів. Це означає, що просочення водою робочого шару кругів навіть протягом однієї робочої зміни не збільшує зносостійкість, а

тим більше протягом 1 год (див. табл. 1). Тобто, не варто розраховувати, що охолодження рідиною робочого шару кругів з НТМ в процесі оброблення може дати позитивний ефект при поглинанні цієї рідини.

Друга зона (від 8 до 19 год) є зоною, де водопоглинання впливає на зносостійкість, але фактично відбувається повернення до вихідних даних зносостійкості. Тобто, час водопоглинання робочим шаром круга повинен бути не менш однієї доби.

Третя зона (від 19 до 49 год) – зона сталого збільшення впливу водопоглинання робочим шаром круга на зносостійкість. Дослідження свідчать, що найбільший ефект від водопоглинання досягається при витримці круга у воді протягом двох діб.

Четверта зона (від 50 до 150 год) є зоною, де подальша витримка робочого шару круга у воді починає зменшувати ефект водопоглинання і, якщо залишити круг у воді на тиждень, ефект водопоглинання зникає. Звичайно, є залежність водопоглинання і від зв'язуючого робочого шару, але загалом доцільно витримувати круг з НТМ в воді в межах двох діб.

### ЧАС ДІЇ ЕФЕКТУ ВОДОПОГЛИНАННЯ

Для того, щоби оцінити час дії ефекту водопоглинання, з допомогою мікровагів приладу “Дериватограф Q-1500” вивчали зміну маси просочених водою зразків алмазовмісних композитів з різними характеристиками при їх просушуванні. Динаміку втрати маси наведено на рис. 4. Видно, що тільки після приблизно 100 год просушування при кімнатній температурі процес стабілізується і втрати маси не зростає.

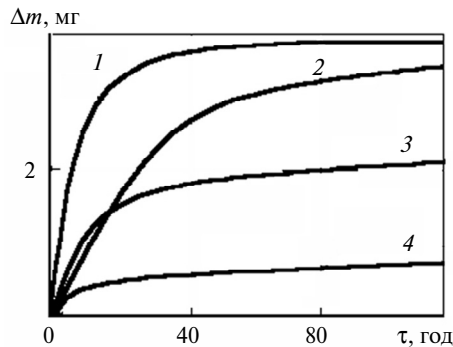


Рис. 4. Залежність втрати маси просочених водою зразків алмазовмісних композитів АС4 100/80 100 на зв'язках В2-01 (1), ВСЕ (2), МО20-2 (3), М2-01 (4) від часу їх просушування.

Аналогічні дослідження було проведено автором і по зносу кругів. Для дослідження було вибрано круги зі зв'язками, що найбільш різняться за поруватістю (керамічна ПК-01 і металічна МО20-2), а також умовами обробки: без охолодження (ПК-01) і з охолодженням (МО20-2). Кругом 12А2-45° 150×10×3×32 КР 100/80 ПК-01 100 шліфували зразки зі сталі Р6М5 без охолодження за продуктивністю 400 мм<sup>3</sup>/хв. У вихідному (сухому) стані круга відносні витрати КНБ склали 0,55 мг/г, а після 26 год витримки у воді витрати КНБ при шліфуванні зменшилися до 0,34 мг/г. Далі, після 26 год природного просушування в лабораторних умовах (кімнатна температура 20 °С) відносні витрати КНБ в крузі повернулися у вихідний стан – 0,55 мг/г. Кругом 12А2-45° 150×10×3×32 АС6 125/100 МО20-2 100 шліфували твердий сплав Т15К6 з охолодженням за продуктивністю 875 мм<sup>3</sup>/хв. У вихідному

(сухому) стані круга відносні витрати алмазного порошку склали 0,57 мг/г, а після 41 год витримки у воді витрати алмазного порошку в крузі при шліфуванні зменшилися до 0,20 мг/г. Надалі, після 114 год природного просушування в лабораторних умовах (кімнатна температура 20 °С) відносні витрати алмазного порошку в крузі при шліфуванні підвищилися (до 0,40 мг/г), хоча навіть при такому часі просушування ще не повернулися у вихідний стан. З наведеного можна зробити наступний висновок: проміжок часу від закінчення процесу водопоглинання до початку процесу шліфування не повинен перевищувати добу для більш пористих (керамічних і полімерних зв'язок) і п'яти діб для менш пористих (металічних) зв'язок, інакше вода, що знаходиться у порах, випаровується і ефект водопоглинання зникає.

Фізична сутність ефекту водопоглинання, що приводить до підвищення зносостійкості кругів, на думку автора, полягає у наступному. Водопоглинання композитом з НТМ заповнює пори зв'язки і приводить до зміни його фазового складу. Наявність води в порах створює потрійний позитивний ефект: по-перше, збільшується демпфувальна здатність зв'язки за рахунок заповнення пористого простору композитів; по-друге, вода з пор під впливом стискаючого зусилля при контактних навантаженнях вичавлюється у зону різання, що спричиняє певне охолодження при шліфуванні без охолоджувальної рідини; по-третє, вода в порах має збільшену кількість поверхневих ОН-груп [6], здатних до утворення зв'язків С–О–Н з ювенільною поверхнею алмазних зерен при різанні, в результаті чого зменшується зчеплення алмазного зерна з матеріалом, що обробляють, і зменшується знос робочого шару шліфувального круга. Але найбільше значення має наявність у порах абразивомісного шару круга нової фази – води, що приводить до збільшення твердості робочого шару (за рахунок заповнення дефектних шпар та пустот рідиною) і підсилення демпфувальної здатності зв'язки.

## ЗМІНА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ ПІД ВПЛИВОМ ПРОЦЕСУ ВОДОПОГЛИННЯ

### Твердість робочого шару круга

Заповнення пористого простору речовинами приводить до підвищення твердості композита [2], що підтверджено експериментально для робочого шару кругів з різними характеристиками (рис. 5). Спочатку показник твердості підвищується зі зростанням часу водопоглинання до 24 год, потім спостерігається його стабілізація при 48 год і далі він залишається стабільним. В цілому це дозволяє досягти підвищення твердості робочого шару кругів на металевих зв'язках на 6–17 од. *HRB*, а на полімерних на 9–15 од. *HRB*.

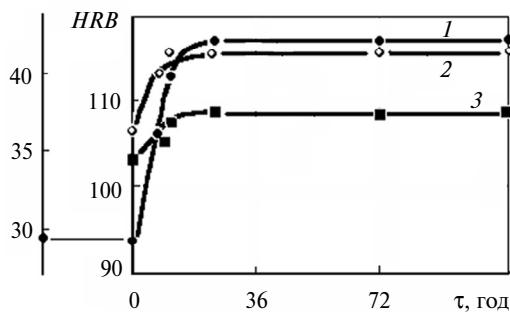


Рис. 5. Залежність твердості робочого шару кругів від часу водопоглинання: 1 – АС4 100/80 О1 100; 2 – (КРС 100/80 70 + АС4С 100/80 30) М2-12Е; 3 – АС6 125/100 МО20-2 100.

### Границя міцності під час стиску

Дослідження, проведені на зразках розміром 5×5×5 мм з робочим шаром АС6 100/80 ВСЕ 100, АС4 100/80 МО20-2 100 і АС4 100/80 В2-01 100 (табл. 3), свідчать, що водопоглинання мало впливає на міцність під час стиску, хоча спостерігається певна тенденція до її зменшення.

**Таблиця 3. Міцність композитів під час стиску при водопоглинні (42 год)**

Характеристика композита	Міцність композита під час стиску, МПа	
	вихідного	після водопоглинання
АС6 100/80 ВСЕ 100	156	146
АС4 100/80 МО20-2 100	338	283
АС4 100/80 В2-01 100	213	205

### Границя міцності під час розтягування

Дослідження провадили на спеціальних зразках, для виготовлення яких було розроблено оригінальну прес-форму. Водопоглинання мало впливає на міцність, хоча є тенденції до її зменшення для чистих зв'язок і до збільшення для композита (табл. 4). Але зробити однозначні висновки важко внаслідок великого розкиду даних досліджень.

**Таблиця 4. Міцність композитів на під час розтягування при водопоглинанні (40 год)**

Характеристика композита і зв'язок	Міцність композита під час розтягування, МПа	
	вихідного	після водопоглинання
АС6 100/80 МО20-2 100	4,09±0,21	4,65±1,18
М1-10	3,98±0,80	3,42±0,80
МО20-2	4,92±2,48	4,75±0,80

### Питомий електроопір

Абразивовмісні композити працюють в умовах постійної присутності технологічних рідин на водяній основі, наприклад при електрошліфуванні, тому можливе поглинання ними води і, у зв'язку з цим, зміна електропровідності.

У табл. 5 наведено узагальнені дані водопоглинання композитами з різними зв'язками і їх питомий електроопір у сухому і зволоженому станах. Аналіз зміни електроопору свідчить, що після витримки у воді композита він дещо зменшується для композитів на полімерних зв'язках і на металічній на основі кобальту, а для композитів на інших зв'язках навіть трохи зростає.

На рис. 6 наведено узагальнені криві впливу водопоглинання на зміну питомого електроопору композита. Для абразивовмісних композитів на метало-полімерних і металічних зв'язках на основі Cu–Sn і Cu–Sn–Sb (див. рис. 6, крива 1) зі зростанням показника водопоглинання збільшується і електроопір, але на зв'язках на основі Cu–Al–Zn спостерігається зворотня залежність (див. рис. 6, крива 2). Частина кривої 1 на рис. 6, що пов'язана зі збільшенням опору ( $\Delta\rho > 0$ ), відноситься до метало-полімерних композитів, струмопровідність яких забезпечується наповнювачем Cu. Потрапивши в пори композита вода сприяє посиленню окислювальної активності Cu і опір зростає. Для композита на металічних зв'язках на основі Cu–Sn та Cu–Sn–Sb, пористість яких ме-

нше, ніж металополімерних, водопоглинання є обмеженим, а наявність на поверхні плівки води знижує поверхневі ефекти розтікання струму, і тому електроопір композитів на таких зв'язках не змінюється або навіть дещо знижується (див. рис. 6, крива 1). Зміна електроопору композитів на зв'язках з основою Cu–Al–Zn (див. рис. 6, крива 2) при водопоглинанні відрізняється від інших, що пояснюється виникненням при витримці у воді ефекту електрохімічної гетерогенності поверхні зв'язки [2].

**Таблиця 5. Вплив основи зв'язок композитів на їх водопоглинання та питомий електроопір**

Основа зв'язки	Водопоглинання, %	Питомий електроопір композита, $10^{-6}$ Ом·м	
		вихідного	після водопоглинання
Cu–Sn	0,028±0,014	0,040±0,003	0,041±0,009
Cu–Sn–Sb	0,077±0,022	0,113±0,004	0,138±0,018
Cu–Al–Zn	0,741±0,224	0,072±0,004	0,091±0,010
Кобальт	0,050±0,005	0,030±0,002	0,023±0,004
Полімерна	0,407±0,103	$1,82 \cdot 10^{11}$	$1,80 \cdot 10^9$
Метало-полімерна	0,275±0,063	0,450±0,030	0,564±0,098

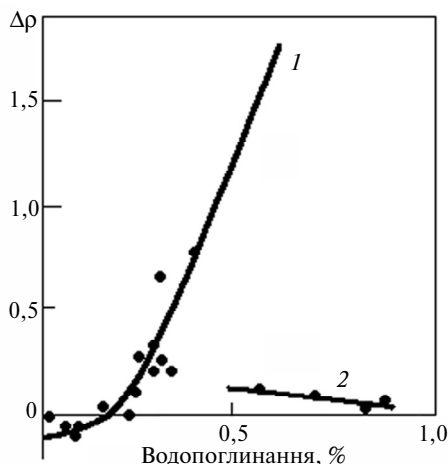


Рис. 6. Залежність приросту питомого електроопору від водопоглинання абразивовмісних композитів: 1 – на металополімерних і металічних зв'язках з основами Cu–Sn і Cu–Sn–Sb; 2 – на металічних зв'язках з основою Cu–Al–Zn.

## ВИСНОВКИ

Вперше досліджено процес водопоглинання абразивовмісними композитами і показано, що для підвищення зносостійкості кругів з НТМ час водопоглинання його робочим шаром повинен бути не меншим доби, а найбільше підвищення зносостійкості спостерігається при водопоглинанні протягом двох діб.

Після закінчення водопоглинання позитивний ефект триває не менше доби для композитів на керамічних і полімерних зв'язках і не менше п'яти діб – на металічних.

При водопоглинанні твердість абразивовмісного композита з НТМ зростає.



Водопоглинання практично не впливає на показники міцності під час стиску та розтягування композитів з НТМ, а питомий електроопір при цьому дещо зростає.

*Впервые определены условия использования пористости абразивных композитов из сверхтвердых материалов в процессе водопоглощения. Показано, как изменяются физико-механические свойства (твердость, показатели прочности, электропроводность) композитов под влиянием водопоглощения, определено время действия такого эффекта и исследованы условия повышения их износостойкости в шлифовальном инструменте.*

**Ключевые слова:** абразивсодержащие композиты из СТМ, эффект водопоглощения, пористое пространство, свойства композитов, износостойкость.

*The conditions for making use of porosity of superabrasive composites in the process of water absorption have been defined for the first time. It is shown how physical-mechanical properties (hardness, strength, conductivity) of the composites vary under the influence of water absorption, the duration of this effect has been determined, and the conditions for increasing wear resistance of the composites in grinding tools have been clarified.*

**Keywords:** abrasive composites with SHM, the effect of water absorption, porous space, properties of the composites, wear resistance.

1. Лаврінченко В.І. Структурно-змінений поверхневий шар контактних поверхонь круга з НТМ та виробу, що піддається обробці, як чинник підвищення їх зносостійкості (зміна елементного складу). *Сверхтв. материалы*. 2013. № 2. С. 75–85.
2. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / за заг. ред. М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
3. Zheng H.W., Cai G.Q., Wang S.L., Yuan S.X. An experimental study on mechanism of cermet grinding. *Annals of the CIRP*. 1989. Vol. 38, no. 1. P. 335–338.
4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6 т. / под общей ред. Н.В. Новикова. Т. 3. Композиционные инструментальные материалы / отв. ред. А.Ю. Шило. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ “АЛКОН” НАН Украины, 2005. 280 с.
5. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Пилинович Л.П. Пористые порошковые материалы: вчера, сегодня, завтра. Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе. *Материалы докл. 3-го Междунар. Симпозиума, 21–22 окт. 2008 г.* Нац. акад. наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии, Ин-т порошковой металлургии. Минск, 2008. С. 43–67 с.
6. Вода в дисперсных системах /под ред. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. и др. Москва: Химия, 1989. 288 с.
7. Федоренко Ю.Г., Розко А.Н., Туренок О.Ч., Дяченко Е.В. Водопоглощение каолинит-полимерными композитами. *Мінерал. журн.* 2010. Т. 32, № 1. С. 45–49.
8. Островский В.И., Братчиков А.Я. Смазочное и поверхностно-активное воздействие технологических сред при шлифовании импрегнированным абразивным инструментом. Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием. Сборник 1. Горький: ГПИ, 1975. Р. 106–110.

Надійшла 13.06.18

Після доопрацювання 13.06.18

Прийнята до опублікування 19.12.18