

20. Bogatyreva, G. P., Ishchenko, E. V., Marinich, M. A. (2000). Kataliticheskie svoistva Pd, Pd-Ag, Ag, nanesennyh naalmaznye submikroporoshki [The catalytic properties of Pd, Pd-Ag, and Ag deposited on diamond submicron powders]. *Sverhtviordye materialy – Superhard materials*, 2, 72–76 [in Russian].
21. Bogatyreva, G. P., Marinich, M. A., & Bazalii, G. A. Metod opredeleniia elektrokineticheskogo potentsiala nanoporoshkov STM [Method for determining the electrokinetic potential of nano-powders of SHM]. М 28.5-277:2008. (2008). Kiev: V.Bakul ISM of NAS of Ukraine [in Russian].
22. Nikitin, Yu. I., Uman, S. M., Kobernichenko, L. V., Martynova, L. M. (1992). *Poroshki i pasty iz sinteticheskikhalmazov [Powders and pastes of synthetic diamonds]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].

УДК 621.921.34-419.002:544.02:622.24.05:621.922

Н. О. Олійник, канд. техн. наук¹, **Г.А. Базалій** наук. співроб.,
Г. Д. Ільницька, канд. техн. наук, **М. А. Марініч**, канд. хім. наук¹,
О. М. Сизоненко, д-р техн. наук²

¹*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна, e-mail: oleunik_nopna@ukr.net*

²*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
Богоявленський (Жовтневий) проспект, 43а, 54018, Миколаїв, Україна*

МОДИФІКОВАНІ ПОРОШКИ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Наведено результати дослідження впливу модифікування порошку вуглецевих нанотрубок – послідовного застосування імпульсної обробки високовольтними електричними розрядами, седиментації, хімічної та електрохімічної обробок – на їхні фізико-хімічні характеристики, розподіл частинок порошку та однорідність за розмірами. Розроблено нову технологію модифікування порошку, застосування якої дає змогу отримати тонкодисперсний, однорідний за розмірами, з низьким вмістом домішок, з гідрофобною енергетично активною поверхнею порошок нової марки МУНТ-ПХО. Застосування порошку для виготовлення композиційного покриття алмазу дало змогу отримати регулярну скелетну структуру покриття з розвиненою площею його поверхні, що сприяє підвищенню зносостійкості шліфувальних кругів.

Ключові слова: порошки вуглецевих нанотрубок, модифікування порошку, фізико-хімічні характеристики, композиційні покриття

Підвищення зносостійкості алмазно-абразивного інструменту можливе за рахунок створення композиційних покриттів абразивного складника та підвищення алмазоутримання [1].

Висока міцність 2,0–3,5 ГПа, модуль пружності 220–700 ГПа [2], розвинута питома площа поверхні створюють перспективу застосування порошків вуглецевих нанотрубок як наповнювачів композиційних матеріалів [3].

Відомо, що модифікування порошку змінює хімічний та енергетичний стан його поверхні та впливає на фізико-хімічні характеристики порошку [4]. Для введення порошків

вуглецевих нанотрубок до складу композиційного матеріалу порошок має бути тонкодисперсним, однорідним за розмірами та з певним енергетичним станом поверхні [1].

В Україні для застосування в композиційних матеріалах рекомендовано порошок марки МУНТ-А (ТУ У 24.1- 05417377-321:2017) з характеристиками, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1. Основні фізико-хімічні характеристики порошку багат шарових вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А

Показники	Порошок марки МУНТ-А
Питома площа поверхні, м ² /г	110–200
Сумарний об'єм пор, мл/г	0,2–0,4
Середній радіус пор, Å	60–100
Масова частка домішок, %, не більше	1,5
Масова частка розчинних (Ni, Mg, Fe) домішок, %, не більше	0,70
Вміст домішок аморфного вуглецю, мас.%, не більше	0,50
Питомий електроопір, Ом·м, не менше	0,0006
Питома магнітна сприйнятливність, 10 ⁻⁸ ·м ³ /кг, не більше	100,0

З табл. 1 виходить, що показники фізико-хімічних характеристик порошку марки МУНТ-А варіюються в широкому діапазоні та не відображають діапазон розмірів частинок порошку, його однорідність за розмірами та енергетичний стан поверхні. Тому для ефективного застосування порошку потрібно його розширене дослідження та модифікування для створення порошку тонкодисперсного, однорідного за розмірами, з певними гарантованими характеристиками поверхні.

Відомо, що кожна фізична або хімічна дія на порошок вуглецевих нанотрубок впливає на розміри частинок порошку, вміст домішок, змінює питому площу поверхні, адсорбційну спроможність, гідрофільно-гідрофобний баланс [5, 6]. Але ще не вивчено сумарний вплив способів оброблення та модифікування на характеристики порошку.

Мета роботи – дослідження впливу модифікування порошків вуглецевих нанотрубок на їхні фізико-хімічні характеристики та розподіл за розмірами; створення порошку для виготовлення якісного композиційного покриття алмазу та розробка технології отримання порошку.

Методика. Роботу проведено в два етапи на зразку порошку нанотрубок марки МУНТ А, виготовленого в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України з продукту піролізу CVD-синтезу багат шарових вуглецевих нанотрубок фірми «АЛІТ» (м. Житомир, Україна), який виготовляють за схемою (рис. 1).

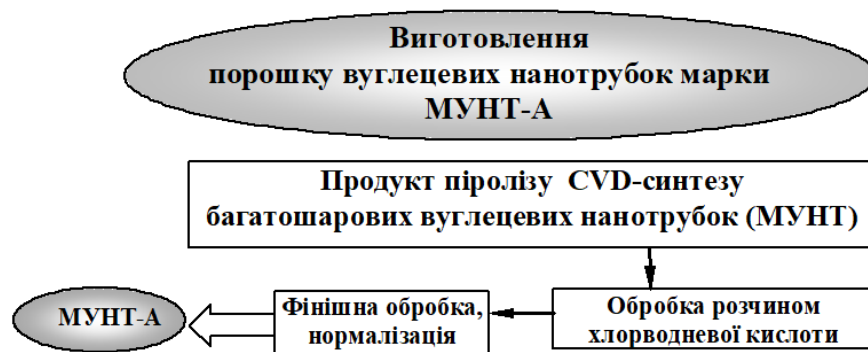


Рис. 1. Принципова схема виготовлення порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А

На першому етапі роботи досліджували розподіл та однорідність за розмірами, фізико-хімічні характеристики порошків марки МУНТ-А до та після модифікування, яке виконували у три стадії із послідовним застосуванням імпульсної обробки високовольтними електричними розрядами (ВЕР-обробка), седиментації, хімічної та електрохімічної обробок (рис. 2).

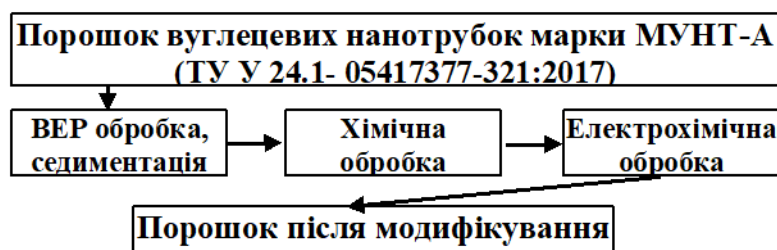


Рис.2. Принципова схема модифікування порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А

ВЕР-обробку зразків проводили в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв). Параметри обробки: інтегральна енергія – 0,6 МДж за напруги 50 кВ, індуктивність розрядного контуру 0,6 мГ, концентрація твердої фази в рідині (дистильованій воді) 1:50.

Після ВЕР-обробки здійснювали седиментаційний поділ порошку у вигляді суспензії впродовж 48 годин на три фракції. Подальше дослідження і обробку проводили на порошок середньої фракції (з виходом 60,0 мас.%).

Хімічну обробку порошку виконували сумішшю концентрованих сірчаної та азотної кислот за температури кипіння реагуючих мас.

Катодну електрохімічну обробку здійснювали у комірці з платиновими сітчастими електродами та мембраною в електроліті (0,1н розчину сірчаної кислоти). Струм поляризації становив 0,5 А.

Зразки порошку досліджували за допомогою комплексу відомих експериментальних методів. Встановлювали масову частку домішок, кількість розчинних домішок за методиками ДСТУ 3292-95, питому магнітну сприйнятливості [7], вільну енергію насичення поверхні парою води [8], питомий електроопір [9]. Електрокінетичний потенціал визначали методом електрофорезу за допомогою приладу «Dzeta-potential-analyzer» фірми «Mikromeritics» [10]. Адсорбційно-структурні характеристики порошку (питома площа поверхні, питомий об'єм пор, середній радіус пор) визначали методом адсорбційно-

структурного аналізу (АСА) за допомогою газоадсорбційного аналізатора «NOVA 2200» (Quantachrome, США) [11, 12].

Розподіл частинок порошку за розмірами та однорідність порошку визначали за коефіцієнтами рівняння Розіна-Раммлера, отриманими за допомогою приладу «SEISHIN LMS-30» (Японія).

Дослідження процесу адсорбції водню на поверхні порошку проводили за допомогою потенціостату П-5848 в розчині 0,1 н сірчаної кислоти [13].

За отриманими результатами було проведено порівняльний аналіз характеристик порошку до та після модифікування.

На другому етапі роботи було розроблено технологію модифікування порошку, виготовлено зразок модифікованого порошку та проведено його опробування як дисперсної компоненти композиційного покриття алмазу для застосування в абразивному інструменті.

Композиційне покриття виготовляли в кілька стадій. Проводили металізацію порошку алмазу марки АС-20 зернистістю 100/80 методом хімічного відновлення нікелю (25 мас.%) з додаванням модифікованого порошку вуглецевих нанотрубок (2 мас.%) з подальшою обкаткою порошком алюмінію марки АСД (крупністю –40 мкм) з вмістом спеціальної зв'язки. Потім термічно обробляли зразки за температури 850 °С. Ступінь металізації алмазу з композиційним покриттям становив 70–75 мас.%.

Результати дослідження та їх обговорення

На рис. 3 наведено розподіл за розмірами частинок вихідного порошку (крива 1) та порошку після модифікування (крива 2).

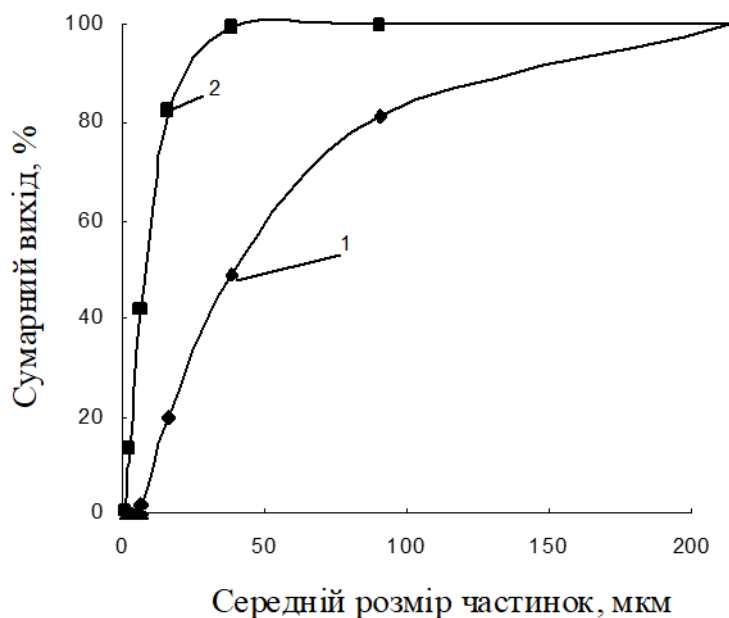


Рис. 3. Розподіл за розмірами частинок порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А (1) та порошку після модифікування (2)

Як бачимо з рис. 3, модифікування порошку істотно змінює розподіл частинок порошку за розмірами. Вихідний порошок складається з частинок розмірами 5,03–213,51 мкм, середнім діаметром 40,19 мкм. Після модифікування порошку його частинки мають розміри 1,29–38,86 мкм з середнім діаметром 8,41 мкм. Проведено математичний опис розподілу частинок за розмірами рівнянням Розіна-Раммлера $R=100\exp(-bx^n)$, де R , % – сумарний вихід матеріалу, крупніший за певний розмір x , мкм; коефіцієнти b і n – постійні величини, характерні для цього матеріалу [14]. Достовірність опису розподілу частинок за розмірами

рівнянням Розіна-Раммлера в діапазоні розмірів, за яких досягається сумарний вихід частинок

порошку від 10 до 90%, становить 0,90–0,98. Інтервал апроксимації розподілу для порошку МУНТ-А становить 11,79–128,07 мкм, для порошку після модифікування – 2,55–19,66 мкм. Коефіцієнти рівняння для розподілу частинок порошку МУНТ-А дорівнюють $n=1,74$; $b=0,012$; порошку після модифікування $n=1,83$; $b=0,013$.

У координатах $\lg (\lg (100 / R)) - \lg x$ рівняння Розіна-Рамплера має вигляд прямої, де коефіцієнт n – тангенс кута нахилу прямої; $\lg (b \lg e)$ – відрізок, що відсікається на осі ординат. Чим вище коефіцієнт « n », тим в більш вузькому діапазоні розмірів сконцентровано матеріал – тобто матеріал більш однорідний за розміром. Судячи з цього, однорідність порошку після модифікування підвищується.

Метою хімічного оброблення порошку, яке здійснювали після ВЕР-обробки та седиментації, було видалення домішок різного походження. Для створення хімічно однорідної гідрофобної поверхні порошку було вивчено кінетику електрохімічних процесів адсорбції водню.

На рис. 4 наведено потенціодинамічні поляризаційні криві процесів адсорбції та виділення водню з 0,1н розчину H_2SO_4 на поверхні порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А та на різних стадіях після його модифікування.

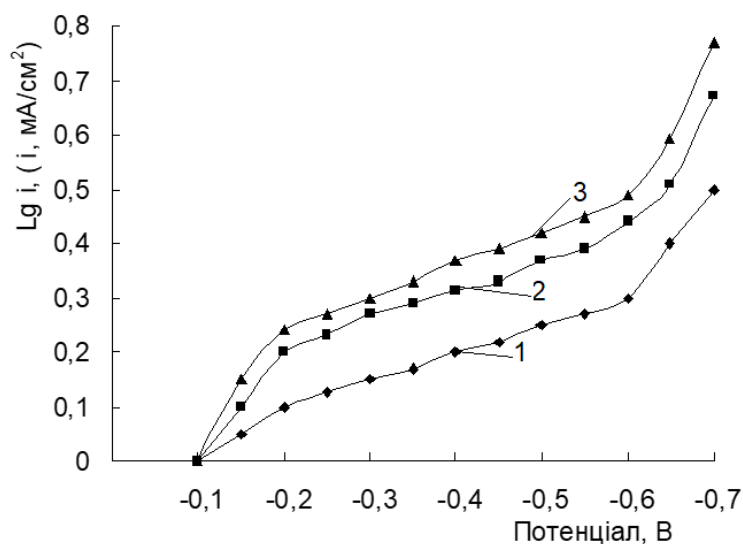


Рис. 4. Потенціодинамічні катодні поляризаційні криві процесу адсорбції та виділення водню з 0,1н розчину H_2SO_4 на поверхні порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А (1) та послідовного оброблення: ВЕР-обробки та седиментації (2) та після повного циклу модифікування (3)

Як видно з рис. 4, в інтервалі від'ємних потенціалів 0,1–0,6 В відбувається адсорбція водню на поверхні порошку, надалі – його виділення. За потенціалу $-0,6$ В процес адсорбції водню переходить у процес його виділення. За такого потенціалу щільність струму адсорбції водню на поверхні вихідного порошку МУНТ-А (крива 1) становить 2 mA/cm^2 , що значно нижче, ніж після хімічної обробки – $2,8 \text{ mA/cm}^2$ (крива 2), та після всього циклу модифікування – $3,0 \text{ mA/cm}^2$ (крива 3). Швидкість адсорбції водню на поверхні модифікованого порошку значно більша (на

46,4 %), ніж на поверхні вихідного.

Імовірно, підвищення швидкості адсорбції водню на поверхні модифікованого порошку та щільності струму за потенціалу $-0,6$ В відбувається за рахунок очищення вуглецевих нанотрубок від домішок, що узгоджується з показниками фізико-хімічних характеристик порошку вихідного та модифікованого (табл. 2).

Таблиця 2. Фізико-хімічні характеристики порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А вихідного та після модифікування

Показники	Порошок вуглецевих нанотрубок	
	МУНТ-А після модифікування	МУНТ-А
Середній діаметр частинок, мкм	8,409	40,18
Питома площа поверхні, м ² /г	156,7	113,6
Сумарний об'єм пор, мл/г	0,462	0,363
Середній радіус пор, Å	87,0	84,0
Масова частка домішок, %	0,4	1,5
Масова частка розчинних (Ni, Mg, Fe) домішок, %	0,1	0,70
Питомий електроопір, Ом·м	0,0008	0,0006
Питома магнітна сприйнятливості, $\times 10^{-8}$, м ³ /кг	20,0	103,7
Електрокінетичний потенціал, мВ	0,105	-0,817
Вільна енергія насичення поверхні парами води, Дж/моль·г	35,7	40,5

За результатами, наведеними у табл. 2, робимо висновок, що модифікування поверхні порошку привело до зниження вмісту домішок, вільної енергії насичення поверхні парами води, питомої магнітної сприйнятливості, електрокінетичного потенціалу та до підвищення питомої площі поверхні, об'єму пор, питомого електроопору.

Отже, дослідженнями вихідного та модифікованого порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-А із послідовним застосуванням імпульсної обробки високовольтними електричними розрядами, седиментації, хімічної та електрохімічної обробок встановлено, що модифікування сприяє:

- однорідному розподілу частинок порошку. Інтервал розподілу частинок порошку за розмірами звужується в 5,6 разу, середній діаметр частинок зменшується в 5 разів;
- очищенню порошку від домішок та зміні характеристик порошку. Зменшуються масова частка домішок в 3,7 разу, масова частка розчинних домішок – у 7 разів, питома магнітна сприйнятливості – у 5,2 разу, електрокінетичний потенціал – у 7,8 разу. Відбувається зростання питомого електроопору в 1,3 разу;
- зміні адсорбційно-структурних характеристик порошку. Підвищується питома площа поверхні порошку в 1,4 разу, вільна енергія насичення поверхні парою води знижується на 11,9%, тобто поверхня стає більш гідрофобною. Відбувається зростання швидкості адсорбції водню на поверхні порошку на 46,0% та підвищення щільності струму на 50,0% за потенціалу -0,6 В.

З урахуванням результатів дослідження було розроблено технологію, яка складається з трьох стадій оброблення порошку МУНТ-А (послідовного застосування імпульсної обробки високовольтними електричними розрядами та седиментації, хімічної та електрохімічної обробки), які формують характеристики порошку. Оформлено технологічну документацію для застосування технології та отримання порошку марки МУНТ-ПХО (ТІ 25000.00835, ТУ У 24.1-05417377-330:2018). Виготовлено зразок порошку. Із його

використанням створено композиційне покриття поверхні порошку алмазу марки АС20 100/80 зі скелетною структурою та збільшеною питомою площею поверхні, що підвищує зносостійкість шліфувальних кругів [15].

Висновки

1. Розроблено метод модифікування порошку вуглецевих нанотрубок, який дає змогу отримати порошок тонкодисперсний, однорідний за розмірами, з низьким вмістом домішок, з гідрофобною енергетично активною поверхнею. Застосування порошку під час виготовлення композиційного покриття алмазу дало змогу отримати регулярну скелетну структуру покриття з розвиненою площею поверхні.

2. Розроблено технологію та оформлено технологічну документацію для виготовлення порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-ПХО (ТІ 25000.00835, ТУ У 24.1-05417377-330:2018.).

Представлены результаты исследования влияния модифицирования порошка углеродных нанотрубок – последовательного применения импульсной обработки высоковольтными электрическими разрядами, седиментации, химической и электрохимической обработок – на их физико-химические характеристики, распределение частиц порошка и однородность по размерам. Разработана новая технология модифицирования порошка, применение которой позволяет получить мелкозернистый, однородный по размерам, с низким содержанием примесей, с гидрофобной, энергетически активной поверхностью порошок новой марки МУНТ-ПХО. Применение порошка при изготовлении композиционного покрытия алмаза позволило получить регулярную скелетную структуру покрытия с развитой площадью его поверхности, что способствует повышению износостойкости шлифовальных кругов.

Ключевые слова: порошки углеродных нанотрубок, модифицирование порошка, физико-химические характеристики, композиционные покрытия.

N. Oliinyk, G. Bazalii, G. Ilnitska, M. Marinich, O. Sizonenko

MODIFIED POWDERS OF CARBON NANOTRUBS FOR ABRASIVE TOOLS

The results of the investigation of the influence of the modification of carbon nanotube powder: successive application of pulsed processing by high-voltage electrical discharges, sedimentation, chemical and electrochemical treatments on their physical and chemical characteristics, the distribution of powder particles and uniformity in size are presented. A new technology of powder modification is developed, the application of which allows to obtain finely dispersed, uniformity in size, with low content of impurities, with a hydrophobic, energetically active surface of a powder of the new brand MWCNT-PCO. The use of powder in the manufacture of composite coating of diamond allowed to obtain a regular skeletal structure of the coating with a developed area of its surface, which contributes to increasing the wear resistance of the grinding wheels.

Key words: carbon nanotube powders, powder modification, physicochemical characteristics, composite coatings

Література

1. Сверхтвердые материалы. получение и применение. Монография в 6 томах / Под общей ред. Н. В. Новикова. Том 3: Композиционные инструментальные материалы / Под ред. А. Е. Шило. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 280 с.

2. Влияние концентрации углеродных волокон на механические свойства керамики на основе карбида бора полученной методом инфльтрации / М. Я. Втерковский, С. В. Солодкий, Ю. И. Богомол и др. // Материаловедение тугоплавких соединений: материалы VI Междунар. конф. к 100-летию Г. В. Самсонова (22 – 24 мая 2018 г.) . – Киев, Украина. – С. 86.
3. Ткачев А. Г., Золотухин И. В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур. – М.: Машиностроение, 2007. – 316 с.
4. Исследование адсорбционно-структурных и электрофизических характеристик модифицированных углеродных нанотрубок / Г. А. Базалий, Г. Д. Ильницкая, Н. А. Олейник и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології: щокварт. зб. наук. пр. – К.: Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 2014. – Т. 18. – Вип. 3. – С. 485–493.
5. Исследование влияния химических обработок на физико-химические свойства углеродных нанотрубок / Г. П. Богатырёва, М. А. Маринич, Г. А. Базалий и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С. 326–331.
6. Вплив високовольтних електричних розрядів на фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики нанотрубок / Г. П. Богатирьова, О. М. Сизоненко, Н. О. Олійник та ін. // Наукові нотатки: міжвуз. зб. наук. пр. – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2011. – Вип. 35. – С. 23–28.
7. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). М88 Украины 90.256–2004. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2004. – 9 с.
8. Методические рекомендации по изучению физико-химических свойств сверхтвердых материалов (СТМ) / Под ред. Г. П. Богатыревой. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 1992. – 40 с.
9. Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных порошков сверхтвердых материалов. М 23.9–303:2014. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2014. – 7 с.
10. Метод определения электрокинетического потенциала нанопорошков алмаза детонационного синтеза. М 28.5–277:2008. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 10 с.
11. Вячеславов А. С., Померанцева Е. А. Измерение площади поверхности и пористости методом капиллярной конденсации азота. Методическая разработка. – М.: Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, 2006. – 55 с.
12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / Пер. с англ. под ред. К. В. Чмутова. – М.: Мир, 1970. – 407 с.
13. Методика оценки степени химической неоднородности поверхности дисперсных алмазных нанопорошков. М 28.5–292:2010. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – 7 с.
14. Андреев С. В., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
15. Влияние металлизированных композиционных покрытий с добавками углеродных нанотрубок на эксплуатационные характеристики шлифовального инструмента /

В. И. Лавриненко, Г. Д. Ильницкая, В. В. Шатохин и др. // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 18-го Международного научно-технического семинара (10–16 февраля 2018 г., г. Брно, Чешская Республика). – Киев: АТМ Украины, 2018. – С. 137–140.

Надійшла 07.06.18

References

1. Shylo, A. E. (Eds.). (2005). *Kompozitsionnye instrumentalnye materialy [Composite Tool Materials]. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie [Superhard materials. production and use]*. N.V. Novikov (Ed.); Kiev ISM im. V. N. Bakulya, IPC «ALKON» NANU. (Vols. 1–6; Vol. 3). [in Russian].
2. Vterkovskii, M. Ia., Solodkii, E. V., Bohomol, Yu. I., et al. (2018). Vliyanie kontsentratsii ughlerodnykh volokon na mekhanicheskie svoystva keramiki na osnove karbida bora poluchennoyi metodom infiltratsii [Influence of the concentration of carbon fibers on the mechanical properties of ceramics based on boron carbide obtained by the infiltration method]. *Proceedings from Material science of refractory compounds '18: VI Mezhdunarodnaia nauchnaia konferentsiia (22–24 maia 2018 hoda). – 6nd International Scientific Conference.* (p. 86). Kiev. [in Russian].
3. Tkachov, A. H., & Zolotukhin, I. V. (2007). *Apparatura i metody sinteza tverdotelnykh nanostruktur [Equipment and methods for the synthesis of solid-state nanostructures]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
4. Bazaliy, G. A., Ilnitskaya, G. D., Oleinik, N. A., et al. (2014). Issledovanie adsorbtsionno-strukturnykh i elektrofizicheskikh kharakteristik modifitsirovannykh ughlerodnykh nanotrubok [Investigation of adsorption-structural and electrophysical characteristics of modified carbon nanotubes]. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii [Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology]*, 18, 3, 485–493. [in Russian].
5. Bogatyreva, G. P., Marinich, M. A., Bazaliy, G. A., et al. (2010). Issledovanie vliyaniya khimicheskikh obrabotok na fiziko-khemicheskie svoystva ughlerodnykh nanotrubok [Investigation of the influence of chemical treatments on the physicochemical properties of carbon nanotubes]. *Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnolohiya ego izhotovleniya [Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications]*, 13, 326–331. [in Russian].
6. Bogatyreva, G. P., Sizonenko, O. M., Oliinyk, N. O., et al. (2011). Vplyv vysokovoltnykh elektryshnykh rozryadiv na fiziko-khemichni ta fiziko-mechanichni kharakterystyky nanotrubok [Influence of high-voltage electrical discharges on physical-chemical and physical-mechanical characteristics of nanotubes]. *Naukovi notatky: zb. nauk. pr. LNTU [Scientific Notes: Interuniversity Collection of Scientific Papers LNTU]*, 35, 23–28. [in Ukrainian].
7. Metodika opredeleniia udelnoi magnitnoi vospriimchivosti poroshkov sverhtverdykh materialov (STM) [Method for determining the specific magnetic susceptibility of powders of superhard materials (SHM)]: M88 Ukrainy 90.256–2004. (2004). Kiev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy. [in Russian].
8. Bogatyreva, G. P. (Eds.). (1992). *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu fiziko-khemicheskikh svoystv sverhtverdykh materialov (STM) [Methodological*

- recommendations for studying the physico-chemical properties of superhard materials (SHM)*]. Kiev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy. [in Russian].
9. Metodika opredeleniya udelnogo ehlektricheskogo soprotivleniya dispersnykh poroshkov sverhtverdykh materialov [Method for determining the specific electrical resistance of dispersed powders of superhard materials]: М 23.9–303:2014. (2014). Kiev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy. [in Russian].
 10. Metod opredeleniya ehlektrokineticheskogo potentsiala nanoporoshkov almazov detonatsionnogo sinteza [Method for determining the electrokinetic potential of diamond nanopowders in detonation synthesis]: М 28.5–277:2008. (2008). Kiev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy. [in Russian].
 11. Vyacheslavov, A. S., & Pomerantseva, E. A. (2006). *Izmerenie ploshchadi poverkhnosti i poristosti metodom kapillyarnoy kondensatsii azota. Metodicheskaya razrabotka* [Measurement of surface area and porosity by capillary nitrogen condensation. Methodological working out]. Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova. [in Russian].
 12. Greg, S., Sing, K. (1970). Adsorptsiya, udelnaya poverkhnost, poristost. (K. Chmutova, Trans). Moskow: Mir. [in Russian].
 13. Metodika otsenki stepeni khimicheskoi neodnorodnosti poverkhnosti dispersnykh almaznykh nanoporoshkov Method for assessing the degree of chemical heterogeneity of the surface of dispersed diamond nanopowders]: М 28.5–292:2010. (2010). Kiev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy. [in Russian].
 14. Andreev, S. V., Petrov, & V. A., Zverevich, V. V. (1980). *Droblenie, izmelchenie, grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and sifting of minerals]. Moscow: Nedra. [in Russian].
 15. Lavrinenko, V. I., Ilitskaya, G. D., Shatokhin, V. V., et al. (2018). Vliyanie metalizirovannykh kompozitsionnykh pokrytiy na ekspluatatsionnye kharakteristiki instrumenta. Proceedings from Modern issues of production and repair in industry and transport '18: XVIII Mezhdunarodniy nauchno-tekhnicheskii seminar (10–16 fevralya 2018 hoda, Brno) – 18th International Scientific and Technical Seminar. (pp. 137–140). – Kiev: ATM Ukrainy. [in Russian].