

УДК 621.921.34-492.2:666.233:539.89

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-217-227

**О. О. Бочечка**, д-р техн. наук; **Л. О. Романко**, канд. техн. наук; **В. І. Куш**, **В. М. Ткач**,  
доктори фіз.-мат. наук; **О. І. Черніснко**, **В. С. Гаврилова**, кандидати техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074 м. Київ, Україна, e-mail: bochchka@ism.kiev.ua*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРОШКІВ АЛМАЗУ

*Описано дослідження впливу на значення питомого електричного опору алмазних порошків зернистості 63/50 зменшення пористості системи внаслідок ущільнення порошку через дію тиску та збільшення площі контактів між частинками. Проведено порівняння одержаних значень опору з опором окремих частинок, визначених за допомогою растрового електронного мікроскопа. Встановлено, що залежність провідності алмазного порошку від тиску в вимірювальній комірці описується степеневою функцією. Запропоновано модель, яка відображає зміну ефективного питомого опору системи алмазних частинок під час їхнього навантаження у вимірювальній комірці.*

***Ключові слова:** питомий електричний опір, електропровідність, алмазні порошки, вимірювальна комірка, тиск, растровий електронний мікроскоп.*

### Вступ

Синтез алмазних порошків, монокристалічні частинки яких мають напівпровідникові властивості, відкриває перспективи їхнього використання в нетрадиційних областях, а також застосування нових методів створення інструменту.

Як відомо, алмаз є широкозонним діелектриком. Ширина його забороненої зони складає 5,5 еВ [1]. Основними домішками заміщення в монокристалах алмазу є найближчі сусіди карбону по періодичній системі – бор і азот. Величина провідності алмазу визначається різницею між концентраціями акцепторів і донорів [1], тобто кількістю бору і азоту в його ґратці. В залежності від способу і параметрів синтезу розмір частинок в продукті синтезу становить від одиниць до сотень мікрометрів. Вимірювання провідності окремих частинок таких розмірів досить трудомістке, крім того, для повноти інформації про систему в цілому необхідно досліджувати їх значну кількість.

В ІНМ ім. В.М. Бакуля розроблено методику вимірювання електричної провідності порошків надтвердих матеріалів в спеціальній вимірювальній комірці, в якій відбувається ущільнення досліджуваного порошку під дією тиску [2]. Методика дозволяє оцінити характер зміни провідності алмазних порошків внаслідок введення легувальних елементів в систему синтезу, проте питання впливу пористості системи, величини контактів, які формуються внаслідок дії тиску, рівня провідності окремих частинок на провідність порошку в цілому залишається недослідженим.

Для одержання алмазних полікристалів способом спікання та проведення тонкого шліфування використовують алмазні мікропорошки, розмір частинок яких становить менше 60 мкм. Із шліфпорошків, які з продукту синтезу виділяють за допомогою системи сит, найбільш близькими до мікропорошків за розмірами частинок є порошки зернистістю 63/50 та 50/40. Для дослідження електрофізичних властивостей використали виділені з продукту синтезу алмазні порошки зернистістю 63/50.

В даній роботі описано вплив на електрофізичні властивості алмазних порошків зернистості 63/50 зменшення пористості системи внаслідок ущільнення порошку через дію тиску та збільшення площі контактів між частинками, проведено порівняння одержаних значень провідності з провідністю окремих частинок, визначених за допомогою сканувального

електронного мікроскопа, запропоновано модель, яка відображає зміну ефективного питомого опору системи алмазних частинок під час їхнього навантаження у вимірювальній комірці.

### Методика експерименту

Дослідження електрофізичних властивостей зразків проводили на стенді на базі електрометра Agilent 4339В (А), розробленому для вимірювання електропровідності порошків надтвердих матеріалів в широкому інтервалі напруг.

Визначення опору порошків проводилось методом вимірювання вольтамперних характеристик (ВАХ) на постійному струмі за кімнатної температури. Досліджуваний порошок засипався в вимірювальну комірку, яка має форму циліндру, нижня і верхня основа якого виготовлені з міцного електропровідного матеріалу, а бокова поверхня являє собою роздільне кільце з діелектрика. Вимірювальні електроди мають форму плоских поверхонь, між якими затискається вимірювальна комірка за допомогою гідравлічного пристрою, що дає можливість проводити вимірювання електропровідності за максимально щільної упаковки зерен та чітко фіксованого значення тиску. Монтаж вимірювальної електричної схеми здійснений з використанням високоякісних діелектричних матеріалів, які задовольняють вимогам електричних вимірювань в високоомних електричних колах. Використання електрометра В7-49 забезпечує діапазон вимірюваних опорів  $R \sim 10^{-6} - 10^{13}$  Ом.

Досліджуваний порошок засипали в комірку і на вимірювальному стенді проводили пресування порошку за допомогою малогабаритного гідравлічного преса. Після досягнення фіксованого тиску в гідросистемі преса знімали ВАХ. Величина опору зразків визначалася на омічній ділянці ВАХ. Питомий опір розраховувався з врахуванням геометричних розмірів зразків за формулою:

$$\rho = \frac{U S}{I h},$$

де  $S$  – площа перерізу зразка,  $h$  – товщина зразка,  $U$  – прикладена напруга,  $I$  – сила струму, який протікає через зразок.

Для визначення електрофізичних параметрів частинок розмірами в десятки мікрометрів в напівпровідниковій промисловості, де виміри виконуються на поверхнях малих розмірів складної конфігурації, застосовується зонд растрового електронного мікроскопа (РЕМ) [3]. Як вихідний параметр використовують або наведений у зразку струм [3], або вимірюють електричний потенціал у зоні взаємодії зонда з поверхнею [4]. В растровому електронному мікроскопі прискорений енергією 1–50 кВ пучок електронів фокусується на поверхні зразка в область діаметром порядку 10 нм. Таким чином, на відміну від традиційних методів вимірювання опору [5, 6], при використанні зонда РЕМ немає необхідності створювати на вимірюваній поверхні омічні контакти з механічним притиском. Беручи до уваги малі розміри зони взаємодії електронного пучка з поверхнею зразка, зонд РЕМ можна вважати ідеальним інструментом для вимірювання питомого опору гомогенного матеріалу [3].

Для дослідження електричного опору окремих частинок алмазу використали спосіб, запропонований авторами [7] для визначення електричного питомого опору структурних складових різальної пластини. Для кількісного визначення параметрів взаємодії прискореного пучка електронів із зразком та калібрування приладу використали значення електричного питомого опору алмазного кристала з відомим питомим електричним опором та теоретичні розрахунки на основі співвідношень, отриманих у роботі [4]. Вказані дослідження, а також вивчення структури частинок алмазних порошків проведено на растровому електронному мікроскопі ZEISSEVO 50XVP.

## Результати дослідження та їх обговорення

Результати досліджень подані на рис. 1. Проведено кілька циклів навантаження вимірювальної комірки без перерви і без зміни умов вимірювання. Перший цикл проводився

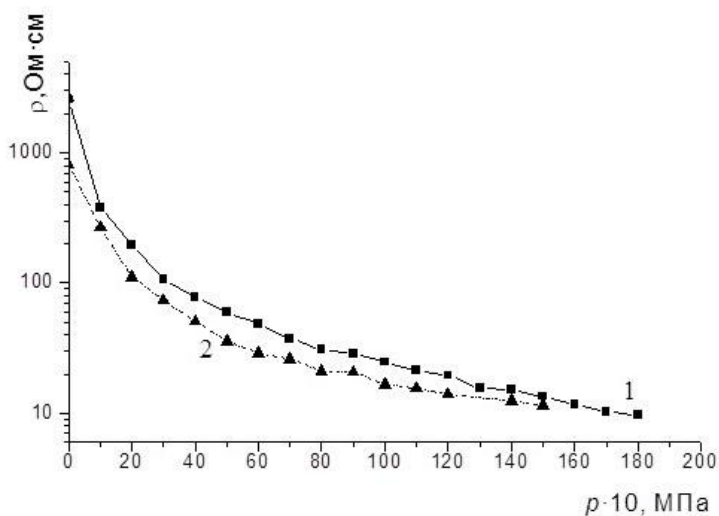


Рис. 1. Залежність від тиску в гідросистемі преса питомого опору алмазного порошку зернистості 63/50, синтезованого в системі Mg–Zn–B–C: вимірювання за постійного значення прикладеної напруги при зміні зусилля стиснення (1) та вимірювання ВАХ за постійного тиску (2)

при першій засипці порошку. Наступні – при повному розвантаженні системи без висипання порошку (рис. 2).

Проведено кілька циклів вимірювання питомого опору в залежності від тиску в вимірювальній комірці за різного інтервалу часу між наступною зміною величини зусилля стиснення без висипання порошку. Встановлено, що після зняття тиску питомий опір порошку в межах експериментальних похибок відновлюється практично до початкового рівня, тобто стану, який

мав порошок перед першим навантаженням після засипання в вимірювальну комірку. З одного боку, це свідчить про те, що зменшення опору викликано здебільшого збільшенням площі контактів внаслідок стиснення частинок порошку, з іншого – дія тиску, який досягається у

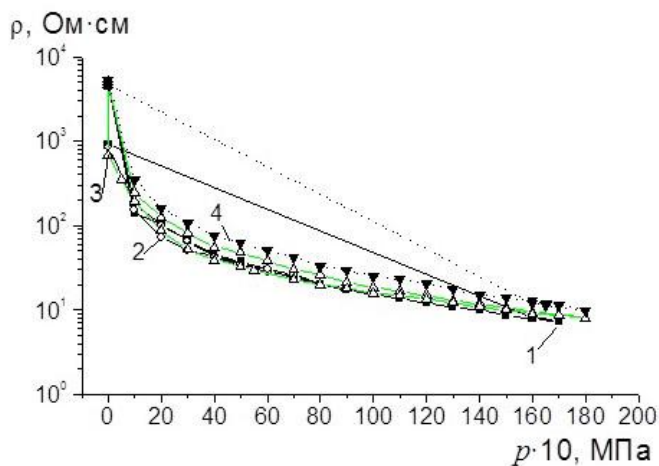


Рис. 2. Залежність від тиску в гідросистемі преса питомого опору алмазного порошку зернистості 63/50, синтезованого в системі Mg–Zn–B–C, при повторних навантаженнях (1–4 – порядкові номери навантажень)

вимірювальній комірці, практично не призводить до дроблення частинок порошку. Важливим є також те, що при досягненні тиску в комірці біля 117 МПа (18 МПа в гідросистемі преса) питомий опір порошку досягає практично однієї і тієї ж величини незалежно від кількості навантажень вимірювальної комірки та часових інтервалів між ними.

Виходячи з даних, наведених на рис. 1, було обчислено питому провідність  $\sigma$  алмазного порошку зернистості 63/50, синтезованого в системі Mg–Zn–B–C, за формулою  $\sigma=1/\rho$  ( $\rho$  виражено в Ом·м). На рис. 3 показано залежність  $\ln(\sigma-\sigma_0)$  від  $\ln p$ , де  $\sigma_0$  – питома провідність

порошку без навантаження комірки,  $p$  – тиск у вимірювальній комірці в Па.

Як видно з рис. 3, вказана залежність у межах похибок експерименту описується лінійною функцією виду  $y=a+bx$ . Методом найменших квадратів було знайдено:  $a = -$

21,93728,  $b = 1,30247$ . Переходячи від логарифмів  $\ln(\sigma - \sigma_0)$ ,  $\ln p$  до величин провідності і тиску, одержимо

$$\sigma = \sigma_0 + Kp^\alpha,$$

де  $\sigma_0 = 3,81 \cdot 10^{-2} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ,  $K = 2,97 \cdot 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} \cdot (\text{Па}^{-1,3})$ ,  $\alpha = 1,30$ .

Аналіз дослідних даних з електропровідності порошкових систем (в т.ч. легованого бором алмазу) свідчить, що їх провідність суттєво зростає під час навантаження. Має місце степенева залежність питомої провідності  $\sigma$  від тиску  $p$  вигляду  $\sigma = Kp^\alpha$ , при цьому визначений

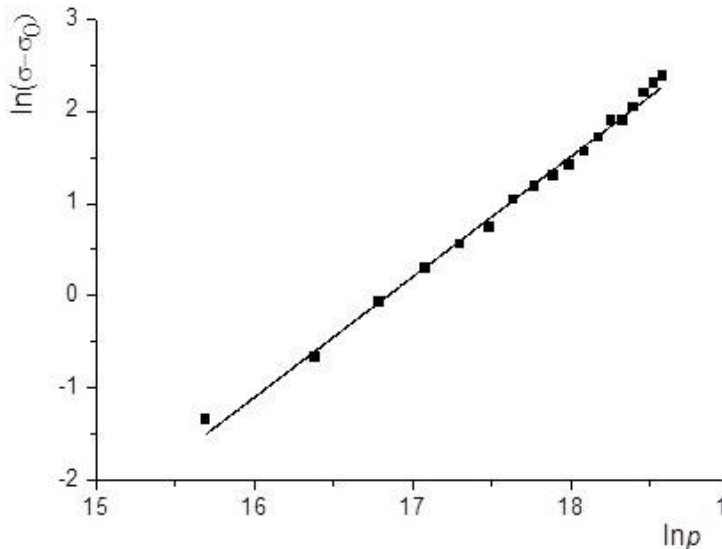


Рис. 3. Залежність провідності алмазного порошку зернистості 63/50, синтезованого в системі Mg–Zn–B–C, від тиску в вимірjuвальній комірку в координатах  $\ln(\sigma - \sigma_0) - \ln p$

апроксимацією дослідних даних показник степеню  $\alpha$  лежить в межах від 0,9 до 1,4. Цей факт не узгоджується з жодною з відомих у літературі теоретичних моделей провідності порошкового матеріалу, які зазвичай базуються на припущенні, що частинки є сферичними і однаковими, а пружна взаємодія між ними відповідає моделі Герца. В припущенні, що провідність порошку пропорційна площі міжчастинкових контактів, вказані моделі також передбачають степеневу залежність провідності від тиску, але з показником  $\alpha = 1/3$ , що суперечить дослідним даним.

У запропонованій структурній моделі порошкового матеріалу враховано реальну форму алмазних кристалів. В такій системі переважним (найбільш імовірним) є контакт плоскої грані одного кристалу з вершиною іншого. Для опису їх пружної взаємодії пірамідальну вершину апроксимовано еквівалентним конусом [8], що дозволило використати розв'язок Снеддона [9], а також враховано залежність контактної опору від тиску та ефект «стягування» ліній струму до зони контакту згідно рівняння Хольма [10]. Одержаний на підставі вказаної моделі показник степеню  $\alpha$  (він залежить від морфології порошку – форми кристалів, варіації розміру і т.д) лежить в межах від 1,0 до 1,5, що цілком узгоджується з експериментом. Значення множника  $K$  залежить від вмісту бору в ґратці алмазу і не може бути визначене з суто модельних уявлень, для його кількісної оцінки потрібно провести серію «калібрувальних» дослідів.

Для вивчення впливу добавок на електрофізичні властивості алмазних порошоків було проведено їх синтез в ростовій системі Ni–C з введенням добавок бору і титану. В табл. 1 наведено склад шихти для одержання сплаву-розчинника вуглецю для синтезу алмазу, на рис. 4–6 показано структуру частинок синтезованих порошоків.

Таблиця 1. Склад шихти для одержання сплаву-розчинника вуглецю для синтезу алмазу методом спонтанної кристалізації

№	Вміст компонентів, % (за масою)		
	Ni	B	Ti
1	100	–	–
2	98	1	1
3	94	5	1

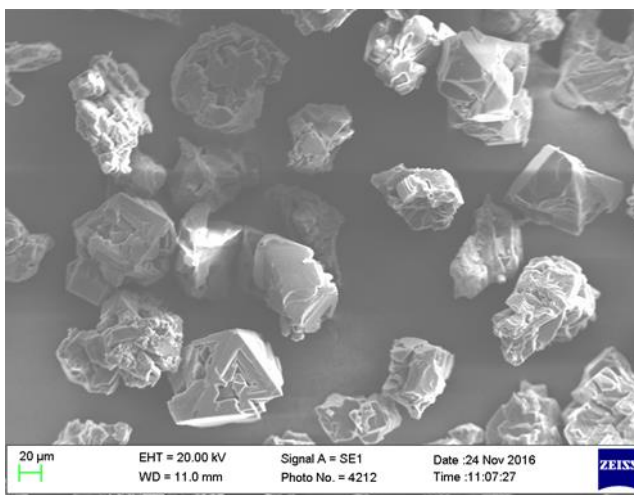


Рис. 4. Структура частинок алмазного порошку, синтезованого в системі Ni–C без добавок (№ 1 в табл. 1)

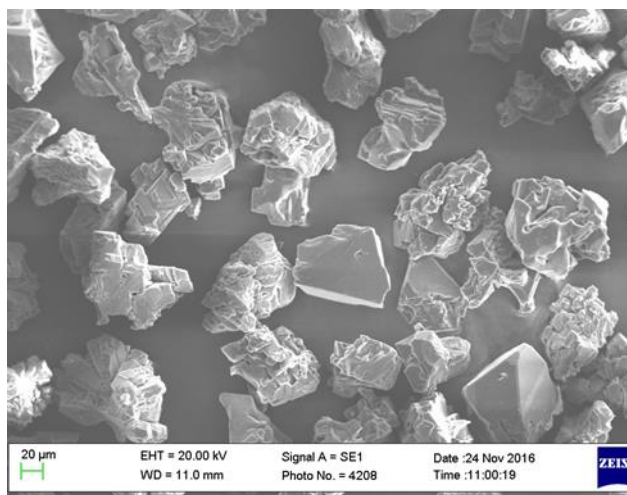


Рис. 5. Структура частинок алмазного порошку, синтезованого в системі Ni–C з добавками 1 % бору і 1 % титану (№ 2 в табл. 1)

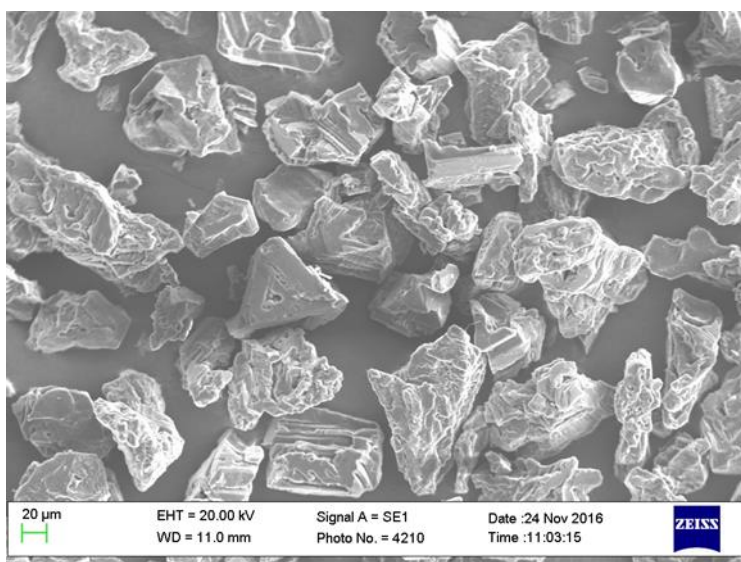


Рис. 6. Структура частинок алмазного порошку, синтезованого в системі Ni–C з добавками 5 % бору і 1 % титану (№ 3 в табл. 1)

Як видно з рисунків, в структурі частинок виділяються грані (111), проте внаслідок високої швидкості росту під час спонтанної кристалізації частинки являють собою полікристалічні утворення неправильної форми із значною кількістю гострих кромки. Із зростанням кількості бору в вихідній шихті синтезовані частинки алмазу стають більш видовженими.

На растровому електронному мікроскопі ZEISSEVO 50XVP було проведено визначення вище описаним способом питомого електроопору частинок синтезованих алмазних порошків (табл. 2).

Таблиця 2. Питомий електроопір частинок порошків, синтезованих в системі Ni–B–Ti–C

Характеристика об'єкта	ρ, Ом·см		
	Ni (№ 1)	Ni–B–Ti (№ 2)	Ni–B–Ti (№ 3)
Сплав-розчинник (№ в табл. 3.1)			
№ частинки			
1	6,90E+10	2,12E+10	4,51E+09
2	4,42E+10	2,91E+10	5,39E+09
3	5,66E+10	1,78E+10	5,52E+09
4	5,81E+10	7,36E+09	4,42E+09
5	8,49E+10	4,80E+10	5,52E+09
6	5,81E+10	1,21E+10	4,60E+09
7	4,42E+10	8,83E+09	5,14E+09
8	5,52E+11	5,02E+09	4,70E+09
9	2,76E+11	1,20E+10	4,42E+09
Середнє значення	$(1,4 \pm 1,3) \cdot 10^{11}$	$(1,8 \pm 1,0) \cdot 10^{10}$	$(4,9 \pm 0,5) \cdot 10^9$
Порошок в цілому (при 98 МПа в вим. ком.)	$1,6 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,7 \cdot 10^9$

Усереднення здійснювалося для 9 об'єктів, довірчі інтервали наведено для довірчої імовірності 0,95.

В таблиці також наведено значення питомого опору порошків, визначені в описаній вище вимірювальній комірці за тиску 98 МПа. Тенденцію збільшення провідності із збільшенням кількості бору в шихті відображають обидва способи вимірювання, проте різниця між значеннями питомого опору, отриманими різними способами вимірювання, відрізняється на 2 порядки для порошку, синтезованого без введення бору, і знаходиться в межах одного порядку для порошку, кристалізованого при введенні 5 % бору в шихту.

Однією з причин такої тенденції може бути збільшення однорідності частинок порошку за провідністю при збільшенні входження бору в ґратку алмазу як домішки заміщення, про що свідчить зменшення довірчих інтервалів у визначенні питомого опору  $\Delta\rho/\rho$  від 93 до 10 %. Іншою причиною також може бути збільшення площі контактів між частинками внаслідок появи більшого числа частинок видовженої форми. Ще однією причиною може бути зменшення пористості внаслідок більш щільного укладання видовжених частинок алмазу під дією тиску в вимірювальній комірці.

Залежність питомого опору системи частинок від пористості та площі контакту добре ілюструє наступна модель. Уявімо алмазний порошок, який складається з частинок кубічного та кубооктаедричного габітусу (рис. 7), розміщених так, що частинка кубооктаедричного габітусу оточена шістьма частинками кубічного габітусу – і навпаки. Таке розміщення можливе лише за умови рівності розміру частинки кубічного габітусу довжині ребра куба, сформованого продовженням площин (100) кубооктаедра (рис. 8).

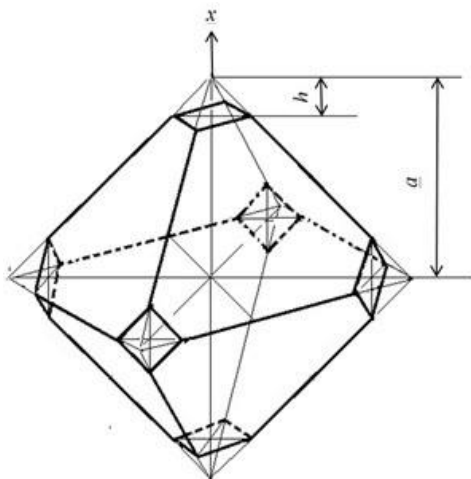


Рис. 7. Зображення кристала алмазу кубооктаедричного габітусу

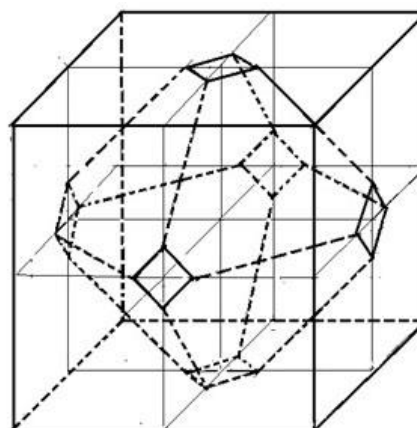


Рис. 8. Зображення умови рівності розмірів кристалів алмазу кубічного та кубооктаедричного габітусів

Питомий опір такої системи дорівнює питомому опорі двох послідовно з'єднаних частинок – кубічного і кубооктаедричного габітусу за рахунок контакту між гранями (100).

Кубооктаедр можна подати як дві піраміди із зрізаними вершинами. Основою такої піраміди є грань (100), бічні поверхні – грані (111). Нехай піраміда має висоту  $a$ , а висота її зрізаної частини становить  $h$  (див. рис. 7). Вісь  $x$  направлена від центра піраміди перпендикулярно до її основи.

Якщо питомий опір матеріалу піраміди складає  $\rho_0$ , то електричний опір її нижнього шару, розміщеного між основою і паралельною їй площиною висотою  $h$ , має величину

$$R_H = \int_0^h \rho_0 \frac{dx}{2(a-x)^2 - 4(h-x)^2} = \rho_0 \frac{1}{4\sqrt{2}(a-h)} \ln \frac{(a-x) - \sqrt{2}(h-x)}{(a-x) + \sqrt{2}(h-x)} \Big|_0^h = \rho_0 \frac{1}{4\sqrt{2}(a-h)} \ln \frac{a + \sqrt{2}h}{a - \sqrt{2}h}. \quad (1)$$

Опір верхньої частини піраміди складає

$$R_B = \int_h^{a-h} \rho_0 \frac{dx}{2(a-x)^2} = \rho_0 \frac{1}{2(a-x)} \Big|_h^{a-h} = \rho_0 \frac{1}{2} \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{a-h} \right). \quad (2)$$

Опір куба зі стороною  $2(a-h)$  має величину:

$$R_K = \rho_0 \frac{1}{2(a-h)} \quad (3)$$

Загальний опір послідовно з'єднаних за рахунок контакту між гранями (100) куба і кубооктаедра становить:

$$R = 2(R_H + R_B) + R_K$$

Вказаний опір можна подати як:

$$R = \rho_{\text{еф}} \frac{1}{a-h},$$

де  $\rho_{\text{еф}}$  – ефективний питомий опір системи. З двох останніх рівнянь випливає

$$\rho_{\text{еф}} = R(a-h) = (a-h)[2(R_H + R_B) + R_K]$$

Підставляючи значення  $R_H$ ,  $R_B$  і  $R_K$  із рівнянь (1, 2, 3) в останнє, одержимо:

$$\frac{\rho_{\text{еф}}}{\rho_0} = \frac{\sqrt{2}}{4} \ln \frac{a + \sqrt{2}h}{a - \sqrt{2}h} + \frac{a}{h} - 1. \quad (4)$$



Об'єм пор визначається різницею між об'ємом куба  $V_k$  та об'ємом кубооктаедра  $V_{ko}$ . Пористість системи  $\theta$  виражається співвідношенням

$$\theta = \frac{V_k - V_{ko}}{2V_k},$$

Очевидно:

$$\begin{aligned} V_k &= 8(a - h)^3 \\ V_{ko} &= \frac{4}{3}a^3 - 4h^3. \end{aligned}$$

Тому

$$\theta = \frac{1}{2} - \frac{a^3 - 3h^3}{12(a-h)^3}. \quad (5)$$

Таким чином, як питомий електричний опір модельної системи, так і пористість визначаються співвідношенням між величинами  $a$  та  $h$ , які характеризують геометричні розміри кубооктаедра. Якщо ввести коефіцієнт  $k = \frac{h}{a}$ , який характеризує ступінь розвинення граней (100) кубооктаедра, то формули (4) і (5) можна виразити через  $k$  наступним чином:

$$\frac{\rho_{ef}}{\rho_0} = \frac{\sqrt{2}}{4} \ln \frac{1+\sqrt{2}k}{1-\sqrt{2}k} + \frac{1}{k} - 1, \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} - \frac{1-3k^3}{12(1-k)^3}. \quad (7)$$

На рис. 9 наведено описані рівняннями (6) та (7) залежності відношення ефективного питомого опору системи до питомого опору суцільного матеріалу та пористості системи від коефіцієнта  $k$ .

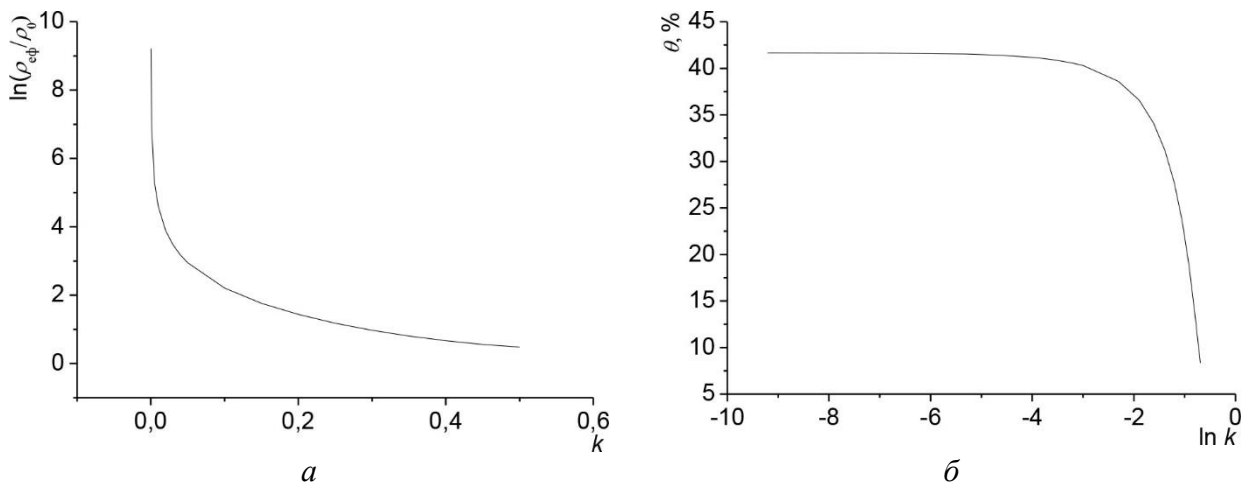


Рис. 9. Залежність логарифма відносного питомого електричного опору модельної системи (а) та її пористості (б) від коефіцієнта  $k$



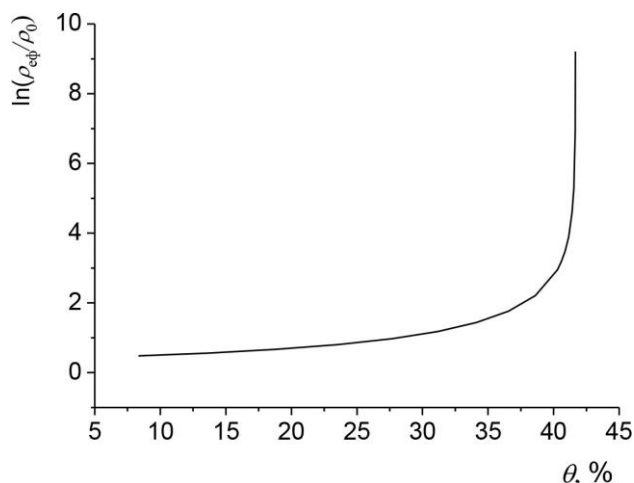


Рис. 10. Залежність логарифма відносного питомого електричного опору модельної системи від її пористості

Таким чином, запропонована модель досить добре відображає особливості зміни ефективного питомого опору системи алмазних частинок під час їхнього навантаження до тиску біля 100 МПа у вимірювальній комірці.

### Висновки

1. Проведено кілька циклів вимірювання питомого опору в залежності від тиску в вимірювальній комірці при різному інтервалі часу між наступною зміною величини зусилля стиснення без висипання порошку. Встановлено, що при знятті тиску питомий опір порошку в межах експериментальних похибок відновлюється практично до початкового рівня, тобто стану, який мав порошок перед першим навантаженням після засипання в вимірювальну комірку.

2. За методикою, що базується на використанні зонда растрового електронного мікроскопу, проведено визначення питомого електроопору окремих частинок алмазних порошоків, синтезованих в системі Ni–B–Ti–C, а також питомого опору вказаних порошоків в цілому, визначеного в вимірювальній комірці за тиску 15 МПа. Тенденцію збільшення провідності із збільшенням кількості бору в шихті відображають обидва способи вимірювання, проте різниця між значеннями питомого опору, отриманими різними способами вимірювання, відрізняється на 2 порядки для порошку, синтезованого без введення бору, і знаходиться в межах одного порядку для порошку, кристалізованого при введенні 5 % бору в шихту.

3. Залежність провідності  $\sigma$  алмазного порошку від тиску  $p$  в вимірювальній комірці описується рівнянням  $\sigma = \sigma_0 + Kp^\alpha$ , де  $\sigma_0$  – провідність без навантаження,  $K$ ,  $\alpha$  – константи. Це пов'язано з тим, що при ущільненні алмазного порошку під дією тиску за кімнатної температури переважним (найбільш імовірним) є контакт плоскої грані одного кристалу з вершиною іншого. Для опису їх пружної взаємодії пірамідальну вершину апроксимовано еквівалентним конусом, що дозволило використати розв'язок Снеддона, а також враховано залежність контактного опору від тиску та ефект "стягування" ліній струму до зони контакту згідно рівняння Хольма. Одержаний на підставі вказаної моделі показник степеню  $\alpha$  лежить в межах від 1,0 до 1,5, що цілком узгоджується з експериментом.

4. Запропоновано модель, яка відображає залежність ефективного питомого опору системи алмазних частинок від пористості системи та величини контакту під час їхнього навантаження до тиску біля 100 МПа у вимірювальній комірці. Ця модель подає алмазний порошок як такий, що складається з частинок кубічного та кубооктаедричного габітусу одного розміру, розмішених так, що частинка кубооктаедричного габітусу оточена шістьма частинками кубічного габітусу – і навпаки.

**O. O. Bochechka, L. O. Romanko, V.I. Kushch, V. M. Tkach,  
O. I. Chernienko, V. S. Havrylova**

*V. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine*

## **RESEARCH OF THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DIAMOND POWDERS**

*A study of the effect on the value of the electrical resistivity of diamond powders with a grain size of 63/50 of a decrease in the porosity of the system due to powder compaction during pressing and increasing the area of contacts between particles is described. The obtained values of resistivity are compared with the resistivity of individual particles determined using a scanning electron microscope. It was found that the dependence of the conductivity of diamond powder on pressure in the measuring cell is described by a power-law function. A model that reflects a change in the effective resistivity of a system of diamond particles during their loading in a measuring cell is proposed.*

**Key words:** *electrical resistivity, electrical conductivity, diamond powders, measuring cell, pressure, scanning electron microscope.*

**А.А. Бочечка, Л.А. Романко, В.И. Куш, В.Н. Ткач, А.И. Черниенко, В.С. Гаврилова**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ АЛМАЗА**

*Описано исследование влияния на значение удельного электрического сопротивления алмазных порошков зернистости 63/50 уменьшения пористости системы вследствие уплотнения порошка из-за действия давления и увеличения площади контактов между частицами. Проведено сравнение полученных значений сопротивления с сопротивлением отдельных частиц, определенных с помощью растрового электронного микроскопа. Установлено, что зависимость проводимости алмазного порошка от давления в измерительной ячейке описывается степенной функцией. Предложена модель, которая отражает изменение эффективного удельного сопротивления системы алмазных частиц во время их нагружения в измерительной ячейке.*

**Ключевые слова:** *удельное электрическое сопротивление, электропроводность, алмазные порошки, измерительная ячейка, давление, растровый электронный микроскоп.*

### **Література**

1. Физические свойства алмаза: Справочник. Под ред. Н.В. Новикова. – К.: Наукова думка, 1987. – 192 с.
2. Зміна електроопору алмазних порошків, синтезованих в системі Mg–Zn–B–C, при пресуванні / К. А. Свирид, Г. А. Петасюк, Л. О. Романко, В. С. Гаврилова, О. О. Бочечка // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Вып. 12. – К.: ИСМ НАН Украины, 2009. – С. 370–374.
3. Конников С.Г., Сидоров А.Ф. Электронно-зондовые методы исследования полупроводниковых материалов и приборов. – М.: Энергия, 1978. – 134 с.
4. Патент 2050326 РФ, МПК G01R 31/28. Способ измерения поверхностных потенциалов /А. В. Суворинов, С. В.Титов, Т. С. Филипчук, С. Ю. Шахбазов. Приоритет изобретения 20.11.1991. Оpubл. 20.12.1995; Бюл. № 35.
5. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высшая школа, 1975: – 206 с.
6. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. Методы исследования полупроводников. – К.: Вища школа, 1988. – 232 с.

7. Determination of specific electrical resistance of a two-layer cutting blank based on cBN using numerical methods of scanning electron microscopy / S. V. Tkach, E. F. Kuzmenko, V. N. Tkach, A. G. Gontar, and A. A. Shulzhenko // *Journal of Superhard Materials*. – 2004. – N 2. P. 28–34.
8. Johnson K.L. *Contact mechanics*. – Cambridge: Univ. Press, 1985. – 462 p.
9. Sneddon I.N., Berry D.S. *The classical theory of elasticity*. – Berlin: Springer Verlag, 1958. – 642 p.
10. Holm R. *Electric contacts*. – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 279 p.

Надійшла 10.07.20

### References

1. Novikov, N. V. (ed.) (1987) *Fizicheskie svoistva almaza. Spravochnik*. [Physical Properties of Diamond. A Handbook.]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
2. Svyryd, K. A., Petasiuk, G. A., Romanko, L. O. et al. (2009). Zmina elektrooporu almaznykh poroshkiv, syntezovanykh v systemi Mg–Zn–B–C, pry presuvanni [Change in electrical resistance of diamond powders synthesized in the Mg-Zn-B-C system during pressing]. *Porodorazrushiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia*. – *Rock cutting and metalworking tools - technique and technology of its production and application*, 12, 370–374 [in Ukrainian].
3. Konnikov, S. G., & Sidorov, A. F. (1978). *Elektronno-zondovye metody issledovaniia poluprovodnikovyykh materialov i priborov* [Electron probe methods for the study of semiconductor materials and devices]. M.: Energiia [in Russian].
4. Suvorinov, A. V., Titov, S. V., Filipchuk T. S., & Shakhbazov S. Yu. (1995). Patent of Russian Federation 2050326.
5. Pavlov, L. P. (1975). *Metody opredeleniia osnovnykh parametrov poluprovodnikovyykh materialov* [Methods for determining the basic parameters of semiconductor materials]. M.: Vysshaya shkola [in Russian].
6. Vorobiov, Yu. V., Dobrovolskii, V. N., & Strikha, V. I. (1988). *Metody issledovaniia poluprovodnikov* [Semiconductor Research Methods]. Kiev: Vyshcha shkola [in Russian].
7. Tkach, S. V., Kuzmenko, E. F., Tkach, V. N. et al. (2004). Determination of specific electrical resistance of a two-layer cutting blank based on cBN using numerical methods of scanning electron microscopy. *Journal of Superhard Materials*, 2, 28–34.
8. Johnson K.L. (1985). *Contact mechanics*. Cambridge: Univ. Press.
9. Sneddon I.N., Berry D.S. (1958) *The classical theory of elasticity*. Berlin: Springer Verlag.
10. Holm R. (2000). *Electric contacts*. Berlin: Springer Verlag.