

9. Petasyuk G. A. A discrete-geometrical method of measuring the specific surface of powders of superhard materials, *Measurement Techniques*, 2008, Vol. 51, 1, p. 94–101.
10. Zvit za naukovu-doslidnoyu temoyu „Doslidzhennya fizyko-khimichnykh protsesiv nanesennya pokryttiv na poroshky NTM z metoyu stvorennya heterohennykh struktur metalo-almaznykh kompozytiv” [Report on the research topic "Investigation of the physico-chemical processes of applying coatings to SHM powders for the purpose of creating heterogeneous structure-tour of metal-diamond composites"] *Institut nadtverdykh materialiv im. V.M. Bakulya Natsionalnoyi akademiyi nauk Ukrayiny. Nomer derzh. Rehistratsiyi 0108U000011.– Arkh № 7277. – Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Sciences of Ukraine. State number. Registration 0108U000011.- Archive number 7277* [in Ukrainian].
11. DiaInspect/DiaInspect. OSM operating manual. (n.d.). *vdiamant.de*. Retrieved from <http://www.vdiamant.de/English/download.htm>

УДК 621.922.079

**О. І. Чернієнко**, канд. техн. наук; **О. О. Бочечка**, д-р техн. наук;  
**Е. М. Луцак**; **А. С. Бєляєв**; **Л. О. Романко**, канд. техн. наук;  
**О. Ю. Клепко**, канд. фіз.-мат. наук; **С. О. Лисовенко**, канд. хім. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,  
04074 м. Київ, E-mail: o.cherniyenko@gmail.com*

## **ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ І ЕЛЕКТРООПІР АЛМАЗНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ ТА КОМПОЗИТІВ АЛМАЗ-МІДЬ, АЛМАЗ-МІДЬ-ТИТАН**

*Досліджено залежність питомого електроопору алмазних композитів та полікристалів від тривалості спікання та вплив зв'язки на теплопровідність алмазних матеріалів. Найменше значення питомого електроопору має композит алмаз-мідь, а найвище – алмазні полікристали, що не містять добавок. Показано, що при збільшенні тривалості спікання електроопір зразків зменшується, а густина збільшується. Теплопровідність полікристалів визначається, в основному, фонною компонентою. Введення міді підвищує теплопровідність композитів, а введення зв'язки мідь-титан її зменшує.*

**Ключові слова:** алмазний композит, алмазний полікристал, теплопровідність, електроопір.

### **Вступ**

Надтверді композиційні матеріали на основі алмазу широко застосовуються в різальному і буровому інструментах, а також мають потенціал для використання в електроніці.

Створення таких матеріалів здійснюється шляхом спікання алмазного порошку під дією високої температури та високого тиску.

Отримання алмазного композиційного матеріалу (АКМ) є динамічним процесом. Одночасно відбуваються пластична деформація, ущільнення та графітизація зерен алмазного порошку. Для поліпшення спікання алмазних нанопорошків в них вводять активуючі добавки,

які при спіканні сприяють ущільненню порошку чи утворюють хімічні сполуки з карбоном і таким чином зв'язують алмазні частинки. На сьогодні накопичено значний досвід в створенні таких матеріалів, проте вплив на поведінку наноструктурованих матеріалів границь зерен та поділу фаз, градієнтів фізичних полів та інших суттєвих на нанорівні факторів, досліджено недостатньо.

Теоретичне прогнозування та експериментальна перевірка впливу границь зерен та поділу фаз, градієнтів фізичних полів на електричні, теплофізичні і пружні властивості наноструктурованих алмазних полікристалів дозволить зробити подальші кроки для покращення властивостей робочих елементів приладів і пристроїв різного функціонального призначення.

Врахування вказаних, притаманних нанорівню фізичних явищ і механізмів в моделях нанокompозиту забезпечить адекватне прогнозування основних фізико-механічних властивостей одно- та багатofазних наноструктурованих матеріалів, що дасть змогу визначення умов формування полікристалів і композитів для тепловідводів, для реєстрації іонізуючого випромінювання, як робочих елементів різального інструменту

Для теоретичного моделювання властивостей АКМ потрібно провести модельний експеримент з отримання АКМ шляхом спікання порошку алмазу без добавок та з добавками, які змочують та не змочують алмаз.

#### Методика експерименту

Алмазні композити (АК) алмаз-мідь та алмаз-мідь-титан отримували спіканням суміші порошків алмазу з міддю, та алмазу з міддю і гідридом титану відповідно, при температурі 1600 °С та тиску 8 ГПа в апараті високого тиску (АВТ) типу тороїд. Алмазні полікристали отримували спіканням алмазного порошку без добавок при тих самих температурі і тиску. Тривалість спікання змінювали від 5 до 20 секунд. Для створення композитів і полікристалів використовували алмазні порошки зернистістю 40/28 мкм. Вміст Сu в АК алмаз-мідь складає 12 % за об'ємом. Вміст міді в АК алмаз-мідь-титан становить 8, а титану – 4% за об'ємом.

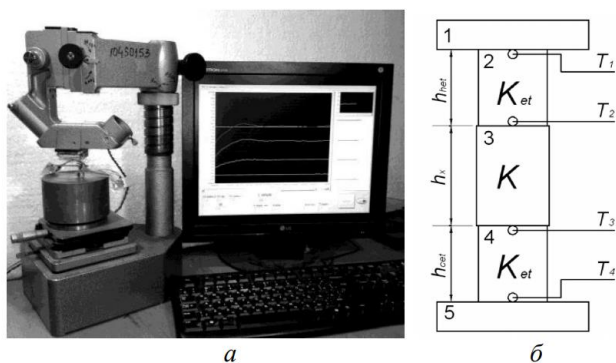


Рис. 1. Загальний вигляд установки для вимірювання теплопровідності (а) і схема вимірювання (б): 1 – нагрівач; 2 – гарячий еталон; 3 – зразок; 4 – холодний еталон; 5 – холодильник

Значення питомого опору  $\rho$  зразків визначали на омичній ділянці ВАХ. Питомий опір визначали з врахуванням геометричних розмірів зразків за формулою:

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

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

Для виключення впливу зовнішніх факторів вимірювання електричного опору зразків, виготовлених з цих порошків, та їхніх температурних залежностей

проводили в малоінерційному вакуумному кріостаті (тиск залишкових газів  $p \cong 10^{-3}$  Па) в інтервалі температур 300–600К в режимі стабілізації температури.

Для вимірювання коефіцієнту теплопровідності зразків АКМ використали комп'ютеризовану установку [1], загальний вигляд та схема якої показані на рис. 1. Для вимірювань використали метод еталону, в процесі вимірювання застосовували два еталони: холодний та гарячий. Як еталон використали армоко залізо, коефіцієнт теплопровідності якого складає 60 Вт/(м·К). Холодний еталон контактує з охолоджувачем, яким є масивний мідний циліндр. Гарячий еталон знаходиться в контактi з джерелом тепла потужністю 30 Вт. Для мінімізації контактного опору на всі поверхні еталонів та зразка нанесено спеціальний термоінтерфейс (металевий сплав), який за нормальних умов знаходиться у рідкому стані і змочує контактні поверхні. Коефіцієнт теплопровідності термоінтерфейсу складає 80 Вт/(м·К). При визначенні теплопровідності зразків температура нагрівача не перевищувала 30 °С, різниця середніх температур на еталонах та зразку складала близько 6 °С.

Формула для коефіцієнту теплопровідності  $K_x$  зразка висотою  $h_x$  і площею поперечного перерізу  $S_x$  враховує наявність обох еталонів і покази терморпар  $T_i$ :

$$K_x = \frac{K_{et} S_{et} h_x}{2 S_x (T_2 - T_3)} \left( \frac{T_1 - T_2}{h_{he}} - \frac{T_3 - T_4}{h_{ce}} \right)$$

де  $h_{he}$  і  $h_{ce}$  – висота відповідно гарячого і холодного еталонів;  $S_{et}$  – площа їхнього поперечного перерізу;  $K_{et}$  — коефіцієнт теплопровідності матеріалу еталона. Визначення коефіцієнта теплопровідності зразка відбувається після виходу вимірювальної системи на стаціонарний режим.

Рентгенівські спектри зразків знімали з використанням установки типу ДРОН, на якій випромінювання фокусується за Брегом-Брентано. Ширина щілин складає 0,5 мм – на коліматорі, 1 мм – на детекторі, ширина горизонтальної щілини – 6 мм. Напряга живлення трубки з мідним антикатодом становить 26 кВ, сила струму живлення – 6 мА. Реєстрація рентгенівського випромінювання здійснювалась з використанням сцинтиляційного блоку детектування БДС-6-05.

### Результати дослідження та їх обговорення

Питомий електроопір алмазного порошку, який використовували для досліджень, складає  $\sim 3 \cdot 10^{10}$  Ом·см. Значення питомого електроопору алмазних полікристалів, отриманих спіканням під тиском такого алмазного порошку без введення спеціальних добавок, залежить від тривалості спікання. Цю залежність показано на рис. 2.

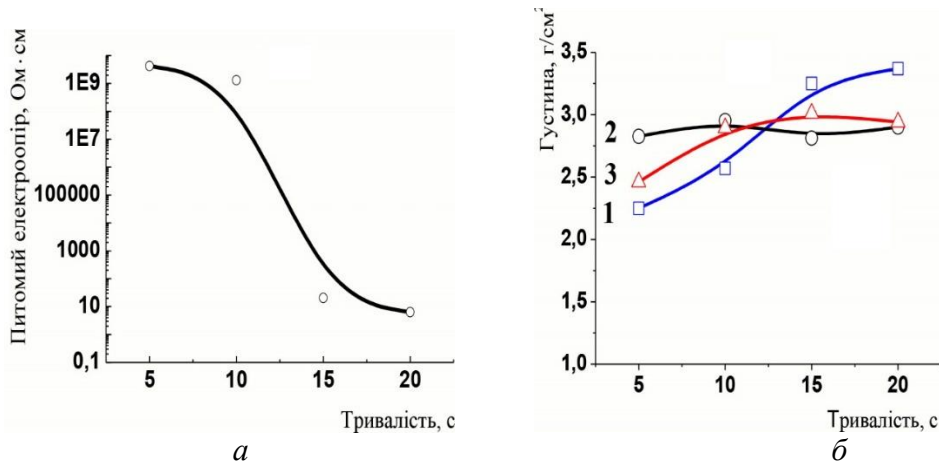


Рис. 2. Залежність від тривалості спікання під тиском: а) питомого електроопору алмазних полікристалів; б) густини: 1 – алмазних полікристалів; 2 – композитів алмаз-мідь; 3 – композитів алмаз-мідь-титан

Полікристали, що спікаються впродовж 5 та 10 с, є ізоляторами зі значенням питомого електроопору понад  $10^9$  Ом·см, що практично лишається на рівні питомого електроопору вихідних алмазних порошоків. При спіканні цих полікристалів тривалістю 15 та 20 с питомий електроопір різко падає до десяти Ом·см. Такий характер залежності питомого електроопору полікристалів від тривалості є оберненим до часової залежності густини цих матеріалів [2], тобто коли густина зростає, електроопір матеріалів знижується. Густина полікристалів, отриманих спіканням тривалістю до 10 секунд, має низьке значення (до 73 % від теоретичного), тоді як при спіканні тривалістю 15 і 20 с густина зростає до 92 % та 96 % відповідно. Вказане падіння електроопору полікристалів можна було б пояснити утворенням графіту чи якоїсь іншої неалмазної фази вуглецю, оскільки питомий електроопір графіту становить  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Ом·см [3], а деяких інших форм вуглецю, наприклад сажі, не перевищує 1 Ом·см [4]. Проте на рентгенівських спектрах зразків, отриманих за тривалості спікання 15 та 20 с, чітких піків, що відповідають спектру графіту не спостерігається (рис. 3). Лише при значенні кута  $2\theta = 26,7^\circ$  присутній незначний імпульс на рівні фону, який відповідає найінтенсивнішому піку графіту. Це може вказувати на те, що електропровідність виникає за рахунок утворення електропровідних рентгеноаморфних вуглецевих фаз, або графіту, кількість якого не перевищує кількох відсотків.

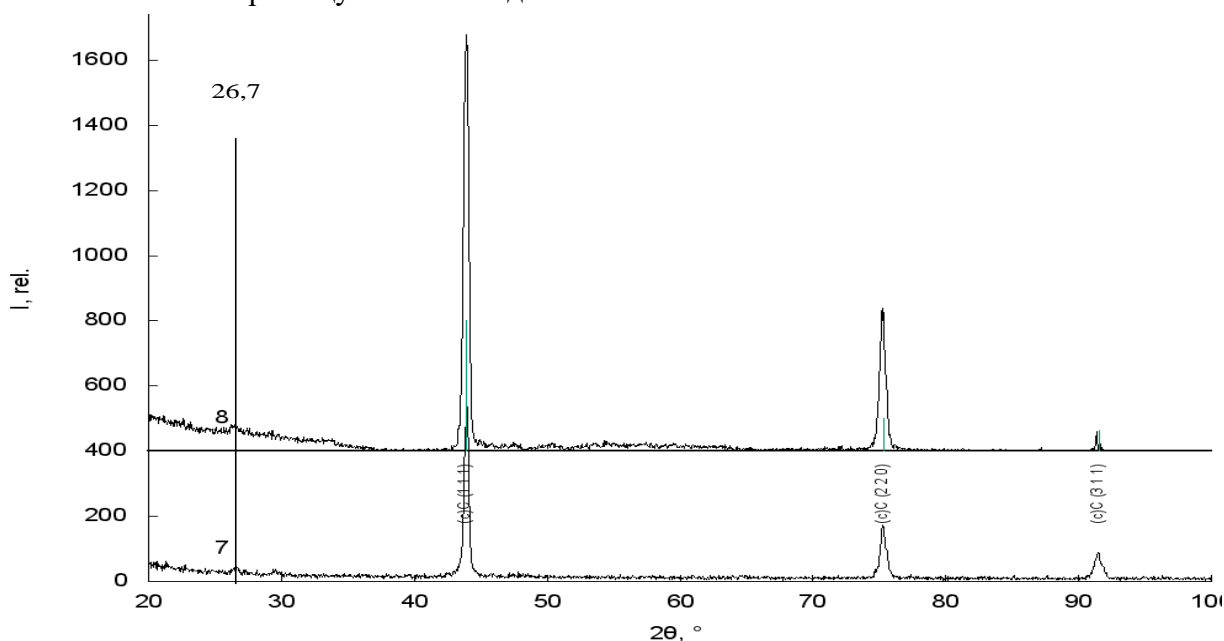


Рис. 3. Рентгенограма алмазного полікристалу, отриманого спіканням під тиском 8 ГПа: 7 – при температурі 1600 °С тривалістю 20 с.; 8 – при температурі 1700 °С тривалістю 15 с

Ще однією причиною падіння електроопору полікристалів може бути виникнення електричної провідності по границях алмазних зерен.

Такі результати вказують на те, що при спіканні в інтервалі часу від 10 до 15 с в полікристалах відбуваються структурні та фазові зміни, в результаті чого полікристал містить електропровідну складову та стає більш ущільненим. Ущільнення здійснюється за рахунок часткового руйнування, пластичного деформування та проковзування алмазних зерен між собою.

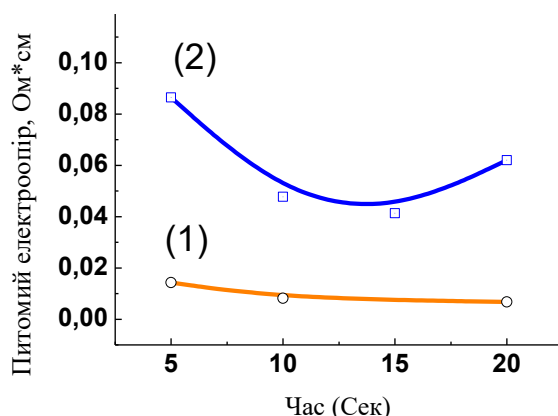


Рис. 4. Залежність питомого електроопору від часу спікання під тиском: 1 – композитів алмаз-мідь; 2 – композитів алмаз-мідь-титан

Введення 12 % (по об'єму) міді до складу АК алмаз-мідь приводить до того, що електрична провідність таких композитів здійснюється за рахунок наявності електропровідної компоненти – міді, а питомий електроопір майже не змінюється від часу спікання і знаходиться в межах 0,007 – 0,014 Ом·см (рис. 4 (1)). При цьому ущільнення композиту проходить упродовж перших 5 с спікання, та припиняється впродовж подальшого спікання до 20 с (рис. 2, б) [1]. Максимальна густина алмазного каркасу в таких АК становить 96 % від теоретичної густини.

Мідь є інертною по відношенні до вуглецю, тому ніяких фазових змін з вуглецем вона не ініціює і не запобігає

таким перетворенням. На рентгено-фазовому спектрі зразку алмаз-мідь (рис. 5) присутні піки, які свідчать, що в такому АК наявний оксид міді  $\text{Cu}_2\text{O}$  у незначній кількості. Це свідчить про те, що мідь взаємодіє з присутнім в порах киснем, який може бути ініціатором перетворення алмазу в неалмазні форми вуглецю.

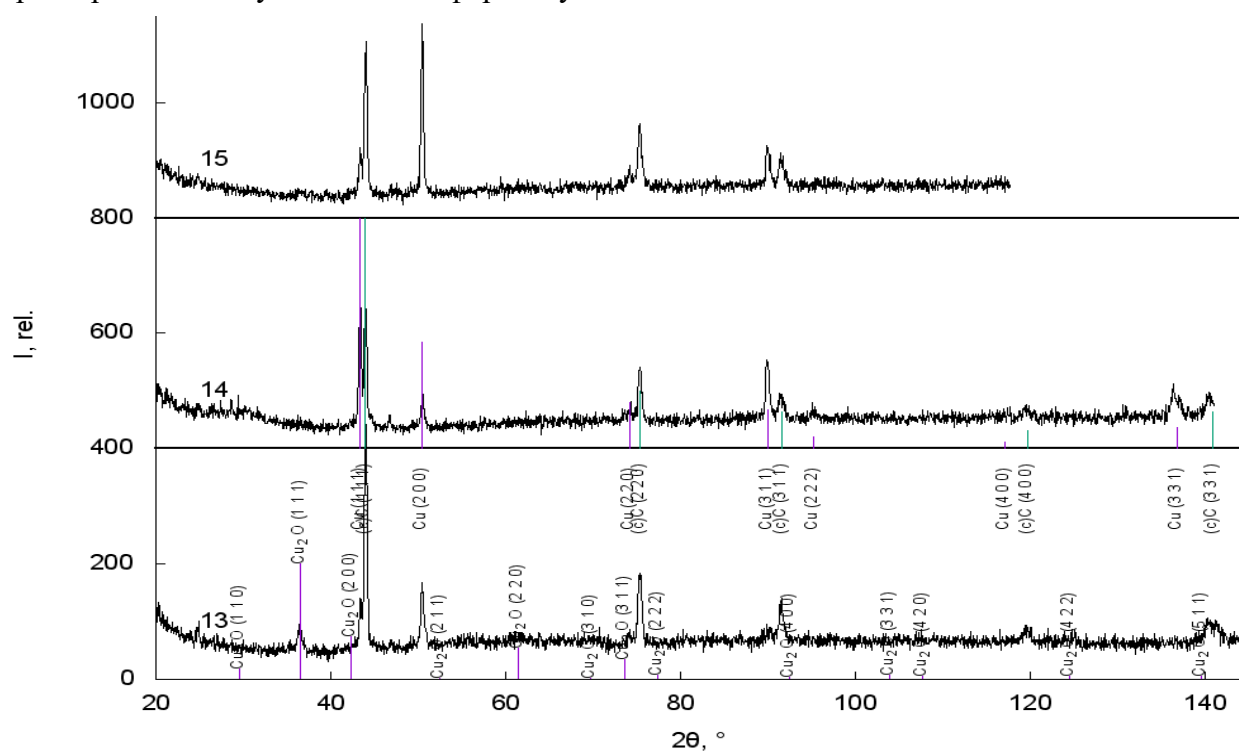


Рис. 5. Рентгенограма алмазних композитів алмаз-мідь, отриманих спіканням під тиском 8 ГПа: 13 – при температурі 1800 °С тривалістю 15 с.; 14 – при температурі 1600 °С тривалістю 15 с.; 15 – при температурі 1700 °С тривалістю 15 с

Таким чином, введення 12 % (за об'ємом) міді до складу АК прискорює процес ущільнення і запобігає руйнуванню алмазних зерен на стадії створення робочого тиску при кімнатній температурі та зв'язує кисень, присутній в порах.

Для дослідження впливу змочування алмазу зв'язкою на процес спікання АК в склад зв'язки до міді добавляли титан, внаслідок чого змочуваність алмазу розплавом мідь-титан підвищується [6].

Електричний струм в таких АК проходить через металеву зв'язку. Значення питомого електроопору АК алмаз-мідь-титан є вищим за питомий електроопір АК алмаз-мідь і складаєх  $8,6 \cdot 10^{-2} - 4,1 \cdot 10^{-2}$  Ом·см (рис. 3 (2)). Така різниця пов'язана з тим, що питомий електроопір сплавів мідь-титан має тенденцію до підвищення зі збільшенням вмісту титану, та для сплаву, який є близьким за співвідношенням до сплаву у нашому експерименті (Cu – 4,5 % Ti) питомий електроопір становить  $15,76 \cdot 10^{-6}$  Ом·см [5]. Питомий електроопір композиту зменшується упродовж 15 с, що відповідає зростанню густини, яка досягає максимуму за 15 секунд спікання [2]. Густина алмазного каркасу в АК алмаз-мідь-титан, отриманого спіканням тривалістю 5 с, становить 82 % від теоретичного значення та зростає з продовженням спікання і при тривалості спікання 15 с становить майже 98 % від теоретичного значення. Це максимальне значення густини алмазного каркасу серед досліджених матеріалів.

Титан в складі алмазного композиту здатний взаємодіяти з вуглецем та утворювати карбід титану TiC, також утворювати оксид титану, а при кристалізації з міддю утворювати ряд інтерметалідів. Проте на рентгенограмі для АК алмаз-мідь-титан, отриманих упродовж 15 та 20 с спікання, не спостерігаються фази з титаном (рис. 6). Імовірно, це пов'язано з тим, що він утворює твердий розчин в міді, а вміст можливих фаз є нижчим порогу чутливості рентгенівського апарату.

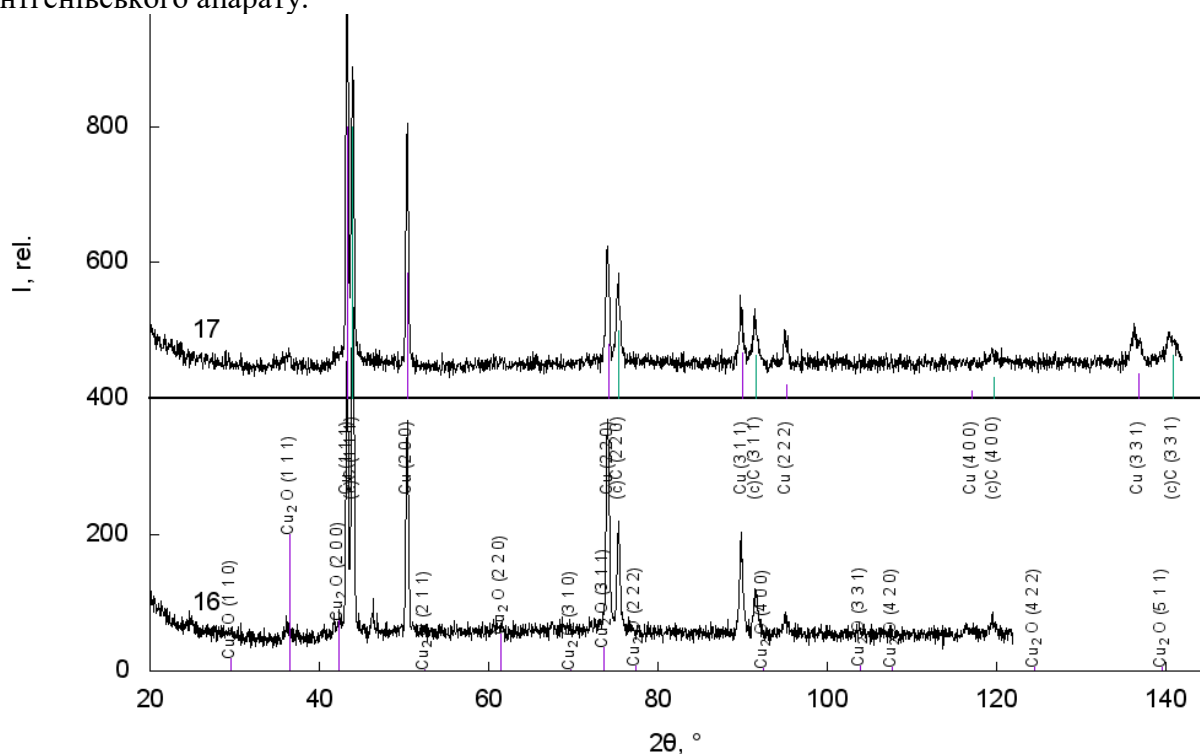


Рис. 6. Рентгенограма алмазних композитів алмаз-мідь-титан отриманих спіканням під тиском 8 ГПа: 16 – при температурі 1600 °С тривалістю 20 с.; 17 – при температурі 1500 °С тривалістю 15 с

Структурно-чутливою характеристикою стану границь зерен композиційного матеріалу є теплопровідність. Вона залежить від теплопровідності складових, стану та кількості границь, розміру компонент та інших характеристик структури композиту [8]. Теплопровідність алмазних полікристалів, отриманих спіканням алмазних порошків зернистістю 40/28 під тиском без введення добавок, змінюється в межах 56–80 Вт/(м·К). АК алмаз-мідь з вмістом міді 12 % (за об'ємом) має значення теплопровідності в межах 87–95 Вт/(м·К), а АК алмаз-мідь-титан з вмістом зв'язки 12 % (за об'ємом) – 23–32 Вт/(м·К).

Як відомо, теплопровідність матеріалів формується двома механізмами: поширенням коливань ґратки (фононна компонента), та рухом вільних електронів у провідниках (електронна компонента). В алмазі теплопровідність виключно фононна, і для чистого монокристалу становить 1200 Вт/(м·К) [7]. Для міді загальна теплопровідність складає 399 Вт/(м·К), з якої фононна компонента становить 7,5 Вт/(м·К), а для сплаву мідь-титан (скористаємось літературними даними для близького сплаву Cu-4,5Ti), який має значенням теплопровідності 48,2 Вт/(м·К), фононна складова становить ~ 1,75 Вт/(м·К) [5]. Отже основна теплопровідність міді та сплаву мідь-титан здійснюється електронною компонентою. Вирахувана електронна складова теплопередачі досліджуваних матеріалів за їх електропровідністю у відповідності з формулою Відемана–Франца–Лоренца [5] складає: полікристал без добавок –  $7,35 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К), АК алмаз-мідь – 0,1047 Вт/(м·К), АК алмаз-мідь-титан –  $9,1610^{-3}$  Вт/(м·К). Це означає, що електронна компонента теплопровідності складає мізерну частину, а отже теплопровідність у досліджених композиційних матеріалах та полікристалах здійснюється фононним механізмом.

Це пов'язано з тим, що в АК алмаз-мідь за рахунок поганого змочування алмазу, мідь не просочується між контактами зерен алмазу та не перешкоджає провідності тепла по контактах алмаз-алмаз. А за рахунок того, що зерна зберігаються цілими – теплопровідність такого АК підвищується у порівнянні з полікристалом без введення добавок, який в процесі спікання ущільнюється внаслідок руйнування зерен, при цьому розмір частинок зменшується, зростає площа контактів, на яких відбувається зменшення теплопровідності [8]. У випадку підвищення змочування алмазу зв'язкою мідь-титан відбувається зменшення теплопровідності за рахунок того, що сплав глибше проникає у контакти і ізолює зерна одне від одного, внаслідок чого замість одного теплопровідного контакту алма-алмаз між зернами можуть утворитися два контакти алмаз-сплав, між якими знаходиться шар сплаву з відносно низькою теплопровідністю.

### **Висновки**

За експериментальними результатами дослідження теплопровідності, електропровідності у поєднанні з дослідженням густини алмазних полікристалів та алмазних композитів залежно від тривалості спікання можна зробити наступні висновки:

1. Питомий електроопір алмазних композитів та полікристалів має зв'язок з густиною цих матеріалів: з підвищенням густини електроопір знижується.

2. При спіканні алмазних полікристалів при тиску 8 ГПа і температурі 1600 °С в інтервалі часу від 10 до 15 секунд в алмазних полікристалах відбуваються структурні та фазові зміни, в результаті чого різко зростає густина та формується електропровідна складова полікристалу.

3. Введення 12 % (за об'ємом) міді до складу АК алмаз-мідь прискорює процес ущільнення, який відбувається упродовж перших 5 секунд, і запобігає руйнуванню алмазних зерен на стадії створення тиску при кімнатній температурі та зв'язує кисень, присутній в порах.

4. Густина алмазного каркасу в АК алмаз-мідь-титан, отриманого спіканням тривалістю 5 секунд, становить 82 % від теоретичного значення, та зростає з продовженням спікання і при тривалості спікання 15 секунд становить майже 98 % від теоретичного значення. Це максимальне значення густини алмазного каркасу серед досліджених матеріалів, що досягається за рахунок кращого змочування алмазу сплавом мідь-титан.

5. Теплопровідність у композиційних матеріалах та полікристалах здійснюється фононним механізмом.

6. Введення міді підвищує теплопровідність композитів за рахунок запобігання руйнуванню зерен алмазу в композиті, а введення зв'язки мідь-титан зменшує теплопровідність композитів за рахунок змочування алмазних зерен та ізоляції їх між собою, внаслідок чого на місці одного контакту алмаз-алмаз може виникнути два контакти алмаз-зв'язка з шаром між ними сплаву мідь-титан, який має відносно низьку теплопровідність.

*Исследованы зависимость удельного электросопротивления алмазных композитов и поликристаллов от продолжительности спекания и влияние связки на теплопроводность алмазных материалов. Наименьшее значение удельного электросопротивления имеет композит алмаз-медь, а самое высокое - алмазные поликристаллы, не содержащие добавок. Показано, что при увеличении продолжительности спекания электросопротивление образцов уменьшается, а плотность увеличивается. Теплопроводность поликристаллов определяется, в основном, фононной компонентой. Введение меди повышает теплопроводность композитов, а введение связки медь-титан ее уменьшает.*

**Ключевые слова:** алмазный композит, алмазный поликристалл, теплопроводность, электросопротивление.

**O. I. Chernienko, O. O. Bochechka, E. M. Lutsak, A. S. Beliaiev,  
L. O. Romanko, O. Yu. Klepko, S. O. Lysovenko**

#### **THERMAL CONDUCTIVITY AND ELECTRICAL RESISTANCE OF DIAMOND POLYCRYSTALS AND DIAMOND-COPPER, DIAMOND-COPPER-TITAN COMPOSITES**

*The dependence of the electrical resistivity of diamond composites and polycrystals on the sintering duration and the influence of the bond on the thermal conductivity of diamond materials have been studied. The lowest value of the resistivity is in the diamond-copper composite, and above – in the diamond polycrystals, which do not contain additives. It is shown that as the duration of sintering increases, the electrical resistivity of the samples decreases, and the density increases. The thermal conductivity of polycrystals is realized mainly through the phonon component. The introduction of copper bond increases the thermal conductivity of composites, and the introduction of a copper-titanium bond reduces it.*

**Key words:** diamond composite, diamond polycrystalline, thermal conductivity, electrical resistivity.

#### **Література**

1. Вплив контактної провідності міжфазної границі «алмаз – металева зв'язка» на теплопровідність алмазовмісних композитів / Р. С. Шмегера, Я. О. Подоба, В. І. Куц, А. С. Беляєв // Сверхтвердые материалы – 2015, – №4. – С. 39–52
2. Е. М. Луцак, О. І Чернієнко. Вплив добавки міді та сплаву мідь-титан на ущільнення алмазного порошку при спіканні за високого тиску і високої температури //



- Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения – 2017, – Вып. 20. – С. 392–394.
3. А.И. Лутков, Тепловые и электрические свойства углеродных материалов [Thermal and electrical properties of carbon materials] (Москва: Металлургия: 1990)
  4. А. И. Лутков, Е. Н. Люкшин, В. Н. Михайлов, Тепло- и электропроводность гранулированной сажи, ТВТ, 1978, том 16, выпуск 4, 876–877
  5. Nagarjuna, S. Thermal conductivity of Cu-4.5 Ti alloy. *Bulletin of Materials Science*, 2004, 27.1: 69–71.
  6. Вивчення взаємодії в системах Cu–Ti–алмаз і Co–W–алмаз при змочуванні алмазних полікристалів та просочуванні алмазного нанопорошку УДА в умовах високих тиску і температури / Е. М. Луцак, О. О. Бочечка, В. М. Ткач, Н. М. Білявина // Сверхтвердые материалы. – 2014. – № 1. – С. 33–39.
  7. Yamamoto, Y., et al. The measurement of thermal properties of diamond. *Diamond and Related Materials*, 1997, 6.8: 1057-1061.
  8. Вплив зернистості алмазного порошку на теплопровідність алмазовмісних композитів / А.С. Беляєв, В.С. Чернобай, Я.О. Подоба, Ю.В. Сирота // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2015. – Вып. 18. – С. 345–351.

Надійшла 20.07.18

## References

1. Shmehera, R. S., Podoba, Ya. O., Kushch, V. I., Beliaiev A. S. (2015). Vplyv kontaknoii providnosti mizhfaznoii hranytsi «almaz – metaleva zviazka» na teploprovidnist almazovmisnykh kompozytiv [Effect of the Contact Conductivity of the Diamond–Metal Binder Interface on the Thermal Conductivity of DiamondContaining Composites] *Sverkhтвердые материалы. – Journal of Superhard materials*, 4, 39-52 [in Ukrainian]
2. Lutsak, E. M., Cherniienko, O. I. (2017). Vplyv dobavky midi ta splavu mid–tytan na ushchilnennia almaznoho poroshku pry spikanni za vysokoho tysku i vysokoi temperatury [Influence of copper additives and copper-titanium alloy for consolidation diamond powder when sintered under high pressure and high temperature] *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument-tekhnika i tekhnolohiia eho izhotovleniia i primeneniia. – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 20, 392-394 [in Ukrainian]
3. Lutkov, A. Y. (1990). *Teplovyie i elektricheskie svoistva uhlerodnykh materialov [Thermal and electrical properties of carbon materials]*. Moskva: Metallurhiia [in Russian]
4. Lutkov, A. Y., Liukshyn, E. N., Mikhailov V. N. (1978) *Teplo- i elektroprovodnost hranulirovannoi sazhi [Thermal and electrical conductivity of granular soot]* TVT, vol 16, 4. [in Russian]
5. Nagarjuna, S. (2004). Thermal conductivity of Cu-4.5 Ti alloy. *Bulletin of Materials Science*, V. 27, 1, 69–71.
6. Lutsak, E. M., Bochechka, O. O., Tkach, V. M., Biliavina N. M. (2014) Vyvchennia vzayemodiii v systemakh Cu–Ti–almaz i Co–W–almaz pry zmochuvanni almaznykh polikrystaliv ta prosochuvanni almaznoho nanoporoshku UDA v umovakh vysokyykh

tysku i temperatury [Analysis of the interactions in the Cu–Ti–diamond and Co–W–diamond systems in wetting diamond polycrystals and infiltration of UDD diamond nanopowder at high pressure and temperature] *Sverkhтвердые материалы*. – *Journal of Superhard materials*, 1, 33–39 [in Ukrainian]

7. Yamamoto, Y., Imai, T., Tanabeet, K., et al. (1997). The measurement of thermal properties of diamond. *Diamond and Related Materials*, Vol. 6, 8, 1057–1061.
8. Beliaiev, A.S., Chernobai, V.S., Podoba, Ya.O., Syrota Yu.V. (2015) Vplyv zernystosti almaznoho poroshku na teploprovodnist' almazovmisnykh kompozytiv [The influence of granularity of a diamond powder on the thermal conductivity of diamond composites] *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnolohiia eho izhotovleniia i primeneniia*. – *Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 18, 345–351 [in Ukrainian]

УДК 669.018.25

**Ю. Ю. Румянцева**, асп.<sup>1</sup>; **В. Н. Бушля**, проф.<sup>2</sup>; **А. Ю. Ошовская**, студ.<sup>3</sup>;  
**В. З. Туркевич**, акад. НАН України<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт надтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины, вул. Автозаводська 2,  
04074 м. Київ, E-mail: yrumianceva@gmail.com

<sup>2</sup>Division of Production and Materials Engineering, Lund University, Paradisgatan 2 Box 188, 221  
00 Lund, Sweden, E-mail: volodymyr.bushlya@iprod.lth.se

<sup>3</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, E-mail: AnastasiaOshovskaya@gmail.com

## АРМУВАННЯ МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ МІКРОВОЛОКНАМИ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Надтверді матеріали – відома група матеріалів для різання металу. Ці матеріали є більш ефективними, енергозберігаючими та екологічними порівняно з традиційними інструментами. Надтверді матеріали мають не тільки найвищий рівень твердості (твердість алмазу – 80–100 ГПа, твердість cBN – 40 ГПа), а й відмінні механічні, термічні, оптичні, акустичні, електричні та хімічні властивості. На жаль, ці різальні матеріали мають і деякі недоліки: тенденцію до окислення, графітизації та незадовільний рівень тріщиностійкості. Одним із відомих способів підвищення в'язкості руйнування та довговічності інструменту є армування мікрОВОлокнами. Армування мікрОВОлокнами широко використовувалося для інших груп матеріалів для різання, але наразі в літературі немає інформації про армування мікрОВОлокнами матеріалів на основі cBN. Отже, у цій роботі було використано цей принцип зміцнення для створення нового надтвердого матеріалу на основі cBN, TaN та Al за рахунок додавання мікрОВОлокон з карбїду кремнію.

**Ключові слова:** cBN, мікрОВОлокна SiC, тріщиностійкість

### Вступ

Аналіз основних напрямів розвитку різального інструменту показує, що вдосконалення матеріалів йшло у напрямку покращення таких характеристик як твердість, теплостійкість та зносостійкість при одночасному зниженні тріщиностійкості, міцності на