

В. І. Часник^{1, *}, Д. В. Часник², О. М. Кайдаш³

¹Державне підприємство НДІ “Оріон”, м. Київ, Україна

²Український НДІ спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України, м. Київ, Україна

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

vassiliyiv@gmail.com

Вплив вмісту карбіду кремнію на об’ємний електричний опір вільноспечених композитів AlN–SiC

Повідомлено, що об’ємний електричний опір композитів AlN–SiC зменшується від $1,1 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^2$ Ом·см у разі збільшення в них вмісту карбіду кремнію з 20 до 55 % (за масою). В таких композитах за вмісту SiC менше 50 % пористість не перевищує 3 % і не має значного впливу на значення електричного опору. Залежність електричного опору від вмісту SiC є прямою лінією, розташованою під кутом до осі абсцис, якщо значення опору наведені у логарифмічному масштабі.

Ключові слова: вільне спікання, нітрид алюмінію, карбід кремнію, об’ємний електричний опір.

Наразі дослідженню композитів системи AlN–SiC приділяють значну увагу. Зростає кількість публікацій, присвячених їхнім фізико-механічним та електрофізичним характеристикам, таким як теплопровідність, теплоємність, твердість, діелектрична проникність та електричний опір. Керамічні композити AlN–SiC за своєю природою є типовими напівпровідниками з досить високим опором, який змінюється в значному інтервалі в залежності від добавок для покращення спікання та кількості SiC. Залежить питомий електричний опір і від способів одержання композитів, серед яких найбільш поширеними є технології вільного спікання та гарячого пресування. Це зумовлено тим, що вони значною мірою визначають пористість одержаних матеріалів. Проте даних про електричний опір композитів AlN–SiC у широкому інтервалі вмісту карбіду кремнію SiC відомо дуже мало [1–5].

Метою даної роботи було встановлення впливу зміни вмісту SiC від 20 до 55 %¹ на об’ємний електричний опір вільноспечених композитів AlN–SiC.

Кільця розміром $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,6$ мм було виготовлено з композитів системи AlN–SiC із вмістом SiC від 20 до 55 %. Композити одержали вільним спіканням у шахтній печі опору з вольфрамовими нагрівниками СШВ-1,25/25 за температури 1900 °С, витримки 1 год. в атмосфері азоту [6]. Відносна густина матеріалів на основі AlN досягла 98–99 % за вмісту SiC до 40 % і знизилася до 96,5 % у разі зростання вмісту до 50 %. Середній розмір частинок SiC у спеченому матеріалі дорівнював 0,8 мкм. Електричний опір кілець визнача-

¹ Тут і далі вміст композитів надано в % (за масою).

ли за допомогою приладу Л2-56 для дослідження характеристик напівпровідникових приладів, що вимірює струм від $1 \cdot 10^{-9}$ до 1 А та напругу від $1 \cdot 10^{-3}$ до 10^3 В. Похибка вимірювання опору становила $\sim 0,5\%$.

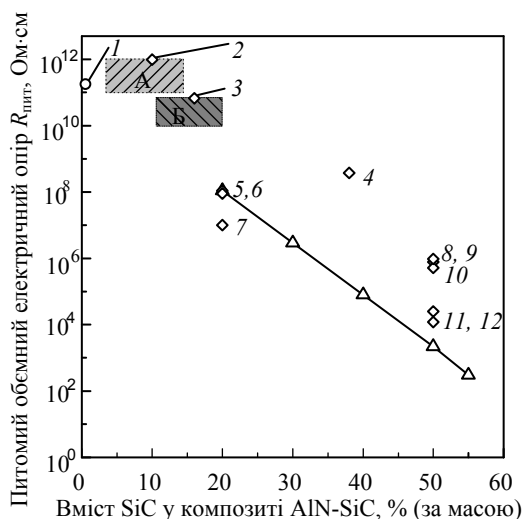
Найчастіше у публікаціях наведено значення питомого об'ємного електричного опору $R_{\text{пит}}$, Ом·см, яке обчислюють за відомим співвідношенням $R_{\text{пит}} = R S/h$, де R , Ом – об'ємний електричний опір, S , см² – поперечний переріз провідника завдовжки h , см. Для кільця розміром $\varnothing 16 \times \varnothing 6 \times 2,6$ мм значення $S/h = 6,65$ см, тому $R_{\text{пит}} = 6,65R$ (Ом·см). Результати вимірювання електричного опору R кілець досліджених композитів AlN–SiC з різним вмістом частинок SiC та значення їхнього питомого електричного опору $R_{\text{пит}}$ представлено в таблиці та на рисунку. Експериментальні точки для вмісту SiC 20, 30, 40, 50, та 55 % у композитах відповідають середнім значенням електричного опору для 3–4 кілець з кожної групи. Для порівняння показано опір AlN. Області А і Б на рисунку визначають можливі значення опору композитів з низьким вмістом SiC [3]. Відомі значення опору для композитів відповідного складу показано точками 2–12 [1–5]. Композити в [2, 4, 5] було одержано вільним спіканням, а в [1, 3] – гарячим пресуванням.

Склад композита AlN–SiC, його електричний опір R та питомий об'ємний електричний опір $R_{\text{пит}}$

Склад композита AlN–SiC, %	Об'ємний електричний опір R , Ом	Питомий об'ємний електричний опір $R_{\text{пит}}$, Ом·см
AlN	$2,70 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$
AlN–20SiC	$1,65 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^8$
AlN–30SiC	$4,36 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^6$
AlN–40SiC	$1,19 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^4$
AlN–50SiC	$3,30 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^3$
AlN–55SiC	4,50·10	$3,0 \cdot 10^2$

Як видно на рисунку, для всіх досліджених композитів AlN–SiC у разі збільшення вмісту SiC від 20 до 55 % відповідні значення питомого об'ємного електричного опору зменшуються. Ймовірно, це пов'язано з тим, що зі збільшенням вмісту SiC зростає кількість паралельних ланцюжків з SiC, які наскрізь пронизують кільця поглинача. Саме вони визначають опір таких композитів. Одержані дані знаходяться у хорошій відповідності з відомими значеннями опору аналогічних за складом композитів. Різниця у опорі для однакового складу може бути обумовлена різною величиною частинок SiC, так, наприклад, для композита AlN–20 %SiC вона складає 10^7 Ом·см для частинок розміром 0,5 мкм і зростає до 10^8 Ом·см для більшого розміру SiC, що становить 2 мкм [2].

Залежність електричного опору $R_{\text{пит}}$ від вмісту SiC в композиті AlN–SiC (див. рисунок) є прямою лінією, розташованої під кутом до осі абсцис (вміст SiC), якщо значення опору наведені у логарифмічному масштабі. Останньою експериментальною точкою на рисунку є значення $R_{\text{пит}}$ для вмісту SiC, що дорівнював 55 %. Це пов'язано з тим, що за вмісту SiC 50 % процес спікання композиту AlN–SiC починає ускладнюватися, а за вмісту 55 % спікання композита відбувається надзвичайно важко. За вищого вмісту SiC спікання взагалі стає проблематичним, бо значно зростає залишкова пористість.



Вплив вмісту SiC на питомий об'ємний електричний опір $R_{\text{пит}}$ вільноспечених композитів AlN-SiC: опір AlN – 1; можливі значення опору композитів з низьким вмістом SiC – 2 (А), 3 (Б); значення опору композитів з різних джерел – 2, 5, 8 [3]; 3, 10 [4]; 4, 9 [1]; 6, 7 [2]; 11, 12 [5].

Відомо, що у вільноспечених композитах AlN-SiC за вмісту SiC від 20 до 40 % пористість складає 1–2 %, за вмісту 50 % вона збільшується до 3,5 % [4], а за подальшого підвищення вмісту SiC пористість збільшується у декілька разів. Зрозуміло, що велика пористість, наприклад, більша 10 %, може впливати на електричний опір композита. Одночасно знижуються характеристики міцності такого композита. Отже, використовувати композити AlN-SiC з вмістом SiC вище 50 % потрібно вкрай обережно. Винятком може бути випадок, коли розробникам матеріалів потрібно мати опір композита, що не перевищує 1 КОм/см.

ВИСНОВКИ

У композитах AlN-SiC збільшення вмісту SiC від 20 до 55 % приводить до зменшення питомого об'ємного електричного опору з $1,1 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^2$ Ом·см.

Виявлена закономірність у залежності електричного опору від вмісту SiC зберігається, допоки пористість не перевищує 3 % і, отже, не має значного впливу на значення електричного опору.

Залежність електричного опору від вмісту SiC в композиті AlN-SiC є прямою лінією, розташованої під кутом до осі абсцис, якщо значення опору наведені у логарифмічному масштабі.

V. I. Chasnyk¹, D. V. Chasnyk², O. M. Kaidash³

¹ State Enterprise Scientific Research Institute ORION, Kyiv, Ukraine

² Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Effect of silicon carbide content on bulk electrical resistance of pressureless sintering AlN-SiC composites

It is reported that the bulk electrical resistance of AlN–SiC composites decreases from 1.1×10^8 до $3.0 \times 10^2 \Omega\text{-cm}$ when the content of silicon carbide increases from 20 to 55%. In such composites, with a SiC content less than 50 %, the porosity does not exceed 3 % and, therefore, does not have a significant effect on the value of electrical resistance. The detected dependence of the electrical resistance on the SiC content has the form of a straight line inclined to the abscissa axis, if the resistance values are given on a logarithmic scale.

Keywords: *pressureless sintering, aluminum nitride, silicon carbide, bulk electrical resistance*

1. Гетьман О.И., Коблянський Ю.В., Зависяк І.В., Хао Ван, Жун Ли, Лэй У., Кондратович Ю.Н., Быков А.И., Капитанчук Л.М. Электрофизические характеристики высокопоглощающей керамики на основе системы AlN–SiC. *Порошковая металлургия*. 2019. № 09/10, С. 24–35.
2. Lu Y., Zang X., Du B. Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN–SiC composite ceramic. *Mater. Chem. Phys.* 2021, Vol. 261, iss. 5, art. 124222.
3. Avrov D., Baklin A., Dorozhkin S., Rastegaev V., Tairov Y., Bilanov B., Safaraliev G., Shabanov S., Lebedev A. Electrical conductivity of ceramics of AlN–SiC, AlN–BeO, Al₂O₃ in the temperature range 300–1800 K. *High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference*. 1998. (Cat. No. 98EX132).
4. Сербенюк Т.Б., Пріхна Т.О., Ковиляєв В.В., Часник В.І., Карпець М.В., Свердун В.Б. Закономірності формування структури керамічного матеріалу на основі AlN–SiC з заданими функціональними властивостями електротехнічного та конструкційного призначення. *Тези доповідей VI-ї конф. молодих вчених та спеціалістів “Надтверді композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування”*. Київ, 2012. С. 76–77.
5. Часник В.І., Фесенко І.П., Кайдаш О.М. Дослідження електричного опору і поглинання мікрохвильового випромінювання в композитах AlN–SiC з високим вмістом карбиду кремнію. *Інструментальне матеріалознавство: Зб. наук. праць*. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, НАН України, 2022. Вип. 25. С. 322–330.
6. Chasnyk V. I., Kaidash O. M. Effect of the sintering temperature on the bulk electrical resistance and electromagnetic energy absorption of pressureless sintered AlN–SiC composites. *J Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 450–452.

Надійшла до редакції 08.11.22

Після доопрацювання 19.01.23

Прийнята до опублікування 23.01.23