

УДК 537



Монтассер С. Тахат

Монтассер С. Тахат

Університет прикладних наук Аль-Балка, Університетський коледж
Аль-Хусон, кафедра машинобудування, п/я 50, Аль-Хусон
21510, Ірбід, Йорданія

**МЕХАНІЧНІ Й ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
БАГАТОШАРОВОГО ГІБРИДНОГО КОМПОЗИТА $Cu/SiC/Gr$
З МЕТАЛЕВОЮ МАТРИЦЕЮ**

Комбінований ефект вмісту Gr й SiC у матриці Cu був вивчений при виготовленні багатошарових і одношарових композитів методами порошкової металургії. При одночасному введенні в чисту мідь рівних вагових часток 3, 6, 9 і 12 % SiC і часток Gr механічні властивості композитів поліпшуються, тоді як електропровідність погіршується. Багатошарові композити підвищують зносостійкість і поліпшують характеристики тертя. Коефіцієнт теплового розширення (КТР) може ефективно знижуватися завдяки якісному зв'язку між зміцнюючою фазою й металевою матрицею. З ростом вмісту графіту й SiC електропровідність знижується. Ці одношарові й багатошарові гібридні металеві композити будуть мати добру перспективу для застосування в електричних контактах, теплових і електронних упаковках, фрикційних матеріалах і гальмах.

Ключові слова: $Cu-Gr/SiC$, гібридні композити з металевою матрицею, багатошарові композити.

Combined effect of both graphite and SiC content into Cu matrix has been studied during fabrication of Cu -graphite- SiC multilayer and single-layer composites by powder metallurgy. Mechanical properties of the composites are enhanced by simultaneous addition of equal weight fraction of SiC and Gr particulates of 3, 6, 9, and 12% reinforcement into pure Cu , whereas electrical conductivity deteriorates. Multi-layer composites enhanced the wear resistance and improved the friction performance. The CTE could be decreased effectively through well bonding between reinforcement phase and metal matrix. Electrical conductivity decreases with increase in both graphite and SiC content. This single and multilayer hybrid metal composites will have promising future in electrical contacts, thermal and electronic packaging, friction and brakes materials applications.

Key words: $Cu-Gr/SiC$, HMMCs, multi-layer composites.

Вступ

З моменту відкриття термоелектричних матеріалів значні зусилля прикладалися для поліпшення їх ефективності й розробки пристроїв для реальних застосувань. В останні кілька десятиліть прогрес у цій області був прискорений завдяки зростаючому попиту на поновлювані джерела енергії. Відкриття й проектування сполук з низькою теплопровідністю, особливо сполук зі спеціальним характером зв'язку й стійкою кристалічною структурою, являє собою новий напрямок для розширення можливостей термоелектричних матеріалів [1].

Мідь широко застосовується в термоелектричному приладобудуванні в якості матеріалу для комутації термоелементів. Тому дослідження властивостей матеріалів на основі Cu , зокрема, мідних нанокompозитів, має важливе значення для термоелектрики.

Мідь активно використовується як промисловий і функціональний метал для різних теплових і електронних застосувань, тобто електронного упакування, електричних контактів і електродів для контактного зварювання. Діапазон пристроїв може бути значно розширений від датчиків температури до гнучких термоелектричних генераторів масового виробництва [2]. Це пояснюється доброю тепло- і електропровідністю міді, її високою пластичністю й відмінним опором до корозії й окислення. Проте, низька механічна міцність і неприйнятна зносостійкість міді обмежують її застосування [3 – 7].

Сприятливі теплові й механічні властивості можуть бути досягнуті при змішуванні відповідних металевих і керамічних фаз для одержання композиту. Включення зміцнюючих часток SiC у металеві композити на основі Cu поліпшують їхні механічні й трибологічні характеристики. Композити з металевою матрицею Cu/SiC , завдяки своїй відмінній електро- і теплопровідності, поліпшеним значенням твердості, протизношення і фрикційним властивостям стали предметом масштабних досліджень [8 – 10].

Характеристики металевих композитів на основі Cu , зміцнених м'якими частками Gr , який є твердим мастильним матеріалом, що володіють хорошою провідністю й протизадирними властивостями, наведені в [11 – 12].

Застосування одного типу зміцнення в міді іноді приводить до погіршення її фізичних властивостей. Тому перевіряється концепція використання двох різних типів зміцнення в мідній матриці. Для компенсації цих ефектів графіт як твердий мастильний матеріал, що володіє хорошою теплопровідністю, може бути диспергований у мідь поряд з SiC [13 – 15].

Однак, інформації про технологію й характеристики цих нових шаруватих гібридних композитів на основі міді недостатньо. Дане дослідження проведене з метою вивчення комбінованого ефекту графіту й SiC у матриці Cu при виготовленні багатошарового гібридного композита з металевою матрицею Cu – графіт – SiC шляхом пошарового ущільнення й спікання під тиском зі змінною рівною ваговою часткою 3, 6, 9 і 12 % SiC і часток Gr . Результати цього експериментального аналізу й випробування термофізичних властивостей багатошарових і одношарових композитів $Cu/SiC/Gr$ стануть корисними рекомендаціями для виробників.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Матеріали й одержання композитів

Для одержання композитів як сировина використовувалися технічно чисті порошки міді, олова, SiC , сульфату барію, графіту й стеарата цинку. У цьому дослідженні використовувалися частки карбиду кремнію середнього розміру 45 мкм і частки графіту середнього розміру 90 мкм.

Для одержання композита Cu – графіт – SiC порошки змішували в міксері протягом 30 хв. для рівномірного розподілу й однорідного перемішування порошоків міді, графіту й SiC . Суміші порошоків були піддані холодному пресуванню за допомогою одноосьового штампа, що пресує під тиском 500 МПа протягом 15 хв., а потім спіканню в трубчастій печі при 750 °C протягом 90 хв. в атмосфері аргону при збереженні однакових параметрів пресування й спікання. На даний момент ми одержали композити D і провели випробування зразків № 2.

Ці зразки зазнали циклу затвердіння, рекомендованого виробником. Добавка олова вносилося з метою полегшення спікання рідкої фази для поліпшення ущільнення. На даному

етапі ми обробили багатошарові гібридні композити (A , B і C) для випробування зразків № 1. Зразки мають однакову структуру, тобто матрицю Cu , фізичні розміри, і відрізняються тільки зміцненням SiC/Gr і укладанням шаруватого композита відповідно до таблиці.

Таблиця

вміст зміцнюючих і матричних матеріалів

Композит	Шари	Карбід кремнію (SiC), %	Графіт (Gr), %	Матриця
A	3	9	9	1 % Sn , 10 % $BaSO_4$ і 83 % Cu
B	3	6	6	1 % Sn , 10 % $BaSO_4$ і 77 % Cu
C	3	3	3	1 % Sn , 10 % $BaSO_4$ і 81 % Cu
D	1	9	9	1 % Sn , 10 % $BaSO_4$ і 81 % Cu

Методики випробування

Випробування зразків №1: одно- і багатошарові гібридні композити з металевою матрицею Cu

Були відлиті композити необхідного діаметра й довжини. Частки карбїду кремнію мали форму твердого кристала, а частки карбїду – форму пластівців.

Різні зразки були прецизійно зважені на електронних вагах з точністю до 0.1 мг. У цілому, експериментальні дані, отримані на трьох зразках, вирізаних з одного композита, були прийняті як середнє значення.

Характеристики зношування й тертя композитів були вивчені за допомогою керованого комп'ютером дискового лабораторного інерційного гальмового динамометра на повітрі при температурі навколишнього середовища (25 – 30 °C).

Випробування на стиск проводилися на універсальній випробувальній установці зі швидкістю деформації 0.001 м/с. Розміри зразка для стискування й теплового розширення становили 5 мм × 5 мм × 20 мм. Коефіцієнт теплового розширення зразків був випробуваний від 20 °C до 200 °C, зі швидкістю нагрівання 5 °C/хв, за допомогою платинового горизонтального дилатометра Linesis 75.

Випробування зразків № 2: Один шар, 10 % $BaSO_4$ і 78 % – 87 % Cu , змінний вміст SiC/Gr 3, 6, 9 і 12 %:

Вимірювання густини проводилися для визначення рівнів пористості зразків. Густина зразків вимірювалася по стандарту ISO 2738. Виміряна густина порівнювалася з величиною, отриманою з використанням правила адитивності, для того щоб визначити об'ємну частку пористості.

Для вимірювання електричного опору зразка застосовувався чотирьохзондовий вимірювальний прилад, де два зонди з'єднувалися з амперметром, а два інших – з вольтметром.

Результати й дискусія

Густина і пористість

На рис. 1 показана зміна відносної густини для одношарових гібридних композитів Cu – графіт – SiC , що містять 3, 6, 9 і 12 % SiC і 3, 6, 9 і 12 % графіту. Відсоток пористості в композитах зростає з ростом вмісту зміцнень, як показано далі на рис. 4. Графіт – це твердий мастильний матеріал, який полегшує рух і перегрупування матриці й зміцнюючих часток, що

приводить до підвищення густини. Помічено також, що величина відносної густини зростає зі збільшенням вмісту SiC. Густина композита залежить від об'ємної частки м'якої й твердої фази. При низькій частці SiC тверда частка добре диспергує, а м'які частки графіту й Cu можуть деформуватися й заповнювати пробіли, і залежно від вмісту графіту досягається величина густини близько 85 %. Об'ємна частка пористості, її розмір і розподіл у композиті з литою металевою матрицею відіграють важливу роль при контролі механічних властивостей матеріалу. Рівні пористості повинні бути зведені до мінімуму.

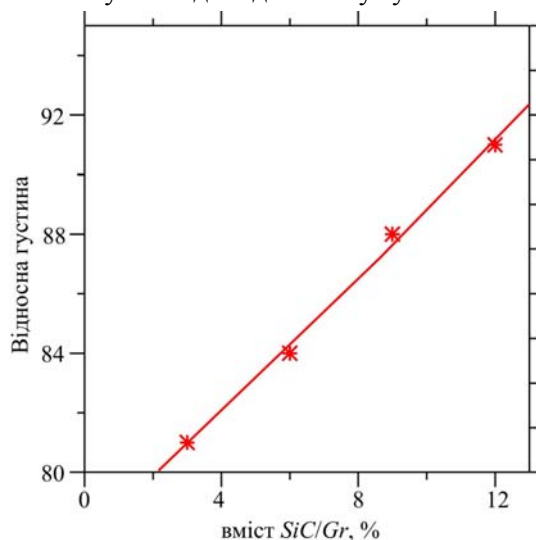


Рис. 1. Зміна густини зі збільшенням вмісту SiC/Gr.

Опір зношування

Як показано на рис. 2, зі збільшенням вмісту SiC/Gr і шарів, швидкість зношування гібридних композитів з металевою матрицею Cu/SiC/Gr зменшується.

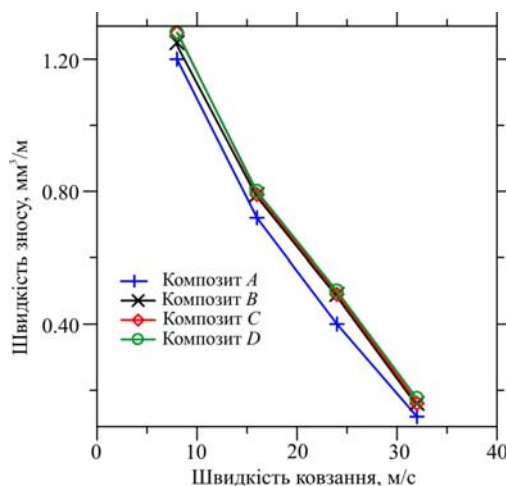


Рис. 2. Вплив добавки SiC/Gr на швидкість зношування матриці досліджених композитів.

Установлено, що кількість графіту, випущеного на поверхню зношування, утворює трибоплівку на контактних поверхнях. Це знижує швидкість зношування. Наявність графітового трибошару (або механічно змішаного шару) також підвищує стійкість від заклинювання й дозволяє працювати при змащенні тонким шаром без стирання. Збільшення виступу часток SiC приводить до утворення більш стійкої мастильної плівки на трибоповерхні гібридних композитів.

Ефективність гальмування

Як показано на рис. 3, кількість графіту, випущеного на поверхню зношування, утворює трибоплівку на контактних поверхнях. Це зменшує загальний коефіцієнт тертя. Крім того, композити *D* демонструють дуже високий коефіцієнт тертя 0.565 при 4 м/с. Це високе тертя не приводить до поліпшення ефективності гальмування або опору зношуванню. Утворення окалини, більша участь графіту в ковзанні, ослаблення адгезивних і абразивних фрикційних контактів зменшують сили тертя на границі розділу зі збільшенням швидкостей ковзання.

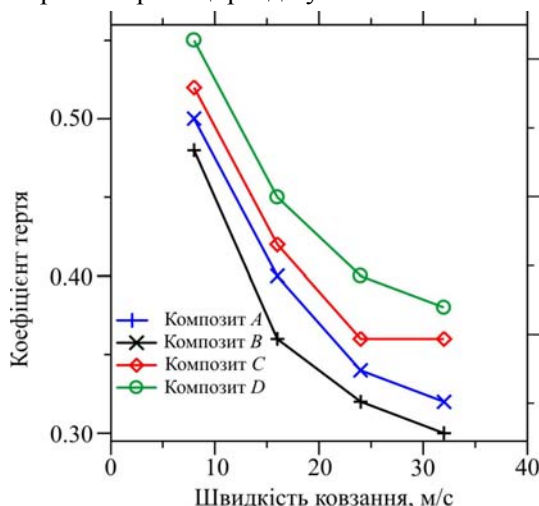


Рис. 3. Вплив швидкості ковзання на середній коефіцієнт тертя композитів.

Теплове розширення й пористість

З рис. 4 видно, що КТР шаруватого композиту нижче, чим в одношарового. По мірі збільшення об'ємної частки SiC/Gr, КТР виявляє тенденцію до лінійного зниження з ростом пористості.

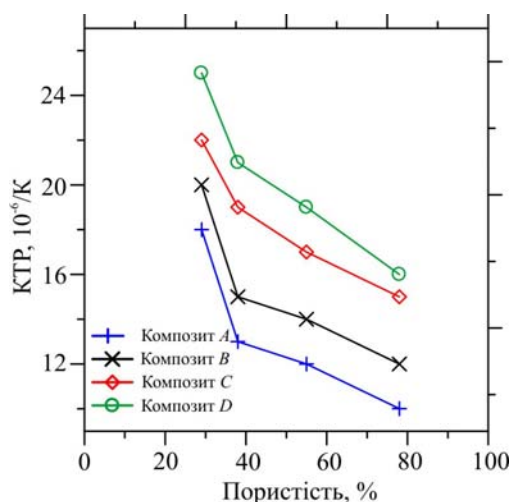


Рис. 4. Коливання КТР для різних композиційних матеріалів з порошковим наповнювачем (температура: 100 °C).

Пакувальні матеріали в мікроелектроніці повинні мати високу теплопровідність для розсіювання тепла й низький КТР для зниження невідповідності теплового розширення між пристроями. Із графіка на рис. 4 випливає, що КТР гібридних композитів Cu-SiC-Gr знижується зі збільшенням % зміцнення. Введення великої кількості графіту в матрицю сплаву Al-Si впливає на

стабільність розмірів. Результати показали, що частки графіту поглинають теплове розширення завдяки своїй шаруватій структурі.

Міцність на стискування

На рис. 5 наведена крива міцності на стискування – деформації для композитів Cu – графіт – SiC. Слід зазначити, що міцність на стискування шаруватого композита більша, чим в одношарового. Це пояснюється більш високою густиною й твердістю композитів. Помічено, що межа міцності при вигині тришарових композитів на основі Cu набагато вища, чим в одношарового, у зв'язку із залишковими стискаючими напругами в зовнішньому шарі.

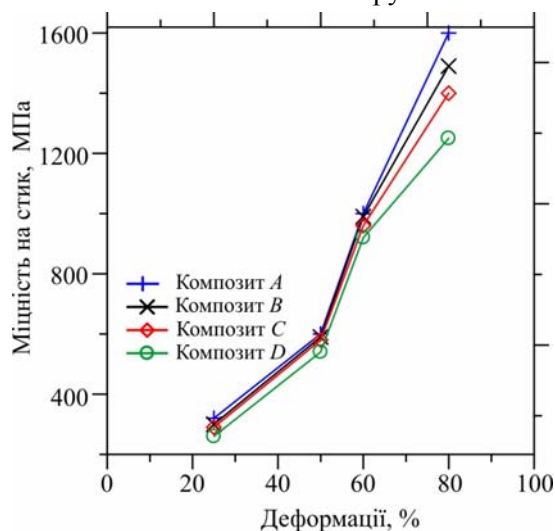


Рис. 5. Вплив об'ємної частки зміцнень на міцність на стискування.

Електропровідність

З рис. 6 видно, що електропровідність шаруватих гібридних композитів Cu, що містять 3, 6, 9 і 12 SiC і 3, 6, 9 і 12 % графіту виявляє тенденцію до лінійного зниження з ростом SiC/Gr. SiC на основі кераміки створює бар'єр для руху електронів міді, забезпечуючи електропровідність.

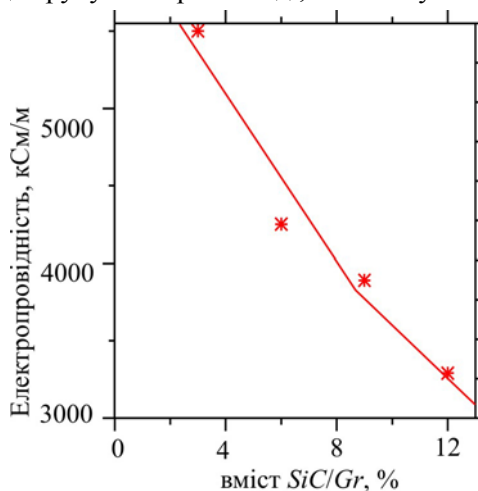


Рис. 6. Вплив об'ємної частки зміцнень на електропровідність.

Частки SiC, додані до чистої міді, подвоюють електричний опір шляхом викривлення структури, тому електропровідність композитів знижується зі збільшенням об'ємної частки SiC [13].

Композити з металевою матрицею на основі Cu з дуже низьким відсотком SiC/Gr (0–4 %) настійно рекомендуються для застосування в багатьох електричних контактах, теплових і електронних блоках, тому що мають високу електропровідність.

Висновки

Проведені випробування композитів дозволили зробити наступні висновки:

1. Гібридні композити Cu були успішно отримані шляхом пошарового ущільнення й спікання під тиском зі змінною дисперсією часток SiC і Gr. Нами вивчені термофізичні властивості гібридних композитів Cu/SiC/Gr у тришаровій і одношаровій конфігурації, що містять 3, 6, 9 і 12 % SiC і 3, 6, 9 і 12 % графіту.
2. Технологія, застосовувана в даній роботі, дозволить реалізувати електричні контакти, фрикційні матеріали, гальма, теплові й електронні блоки з гібридних композитів з металевою матрицею Cu-Gr/SiC.

Література

1. Baoli Du, Ruizhi Zhang, Kan Chen, Amit Mahajan, and Mike J. Reece, The Impact of Lone-Pair Electrons on the Lattice Thermal Conductivity of the Thermoelectric Compound $CuSbS_2$, *J. Mater. Chem. A* **5**(7), 3249 – 3259 (2017).
2. Virgil Andrei, Kevin Bethke, and Klaus Rademann, Adjusting the Thermoelectric Properties of Copper(I) Oxide – Graphite – Polymer Pastes and the Applications of Such Flexible Composites, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 10700 – 10707 (2016).
3. Lekka M., Koumoulis D., Kouloumbi N., and Bonora P.L., Mechanical and Anticorrosive Properties of Copper Matrix Micro- and Nano-Composite Coatings, *Electrochim Acta* **54**, 2009, P. 2540 – 2546.
4. Zhan Y., Zhang G. The Effect of Interfacial Modifying on the Mechanical and Wear Properties of SiCp/Cu Composites, *Mater Lett* **57**, 2003. P. 4583 – 4591.
5. Shu K.M., Tu G.C. The Microstructure and the Thermal Expansion Characteristics of Cu/SiCp Composites, *Mater Sci Eng A* **349**, 2003. P. 236 – 247.
6. Zhu J., Liu L., Zhao H., Shen B., and Hu W. Microstructure and Performance of Electroformed Cu/nano-SiC Composite, *Mater Des* **28**, 2007. P. 1958 – 1962.
7. Schubert Th., Trindade B., Weibgarber T., and Kieback B., Interfacial Design of Cu-based Composites Prepared by Powder Metallurgy for Heat Sink Applications, *Mater.Sci.Eng.A* **475**, 2008. P. 39 – 44.
8. Mohsen Barmouz, Mohammad Kazem Besharati Givi, and Javad Seyfi, On the Role of Processing Parameters in Producing Cu/SiC Metal Matrix Composites via Friction Stir Processing: Investigating Microstructure, Microhardness, Wear and Tensile Behavior, *Materials Characterization* **62**, 2011. P. 108 – 117.
9. Shu K.M., Tu G.C., Fabrication and Characterization of Cu-SiCp Composites for Electrical Discharge Machining Applications, *Mater Manuf Processes* **16**(4), 2001. P. 483 – 502.
10. Sapate S.G., Uttarwar A., Rathod R.C., and Paretkar R.K. Analyzing Dry Sliding Wear Behaviour of Copper Matrix Composites Reinforced with Pre-Coated SiCp Particles, *Mater Des* **30**, 2009. P. 376 – 386.
11. Zhan Y., Zhang G., The Role of Graphite Particles in the High-Temperature Wear of Copper Hybrid Composites against Steel, *Mater.Des.* **27**, 2006. P. 79 – 84.

12. Qin Y., Wu Y., Wang D., Li P., Huang X., and Zheng Y., Influence of SiC Particle Size on the Wear Properties of SiC/Cu Composites, *Adv.Mater.Res.*311 – 313, 2011. P. 635 – 639.
13. Prabhu T.Ram, Varma V.K., and Srikanth Vedantam, Tribological and Mechanical Behavior of Multilayer Cu/SiC/Gr Hybrid Composites for Brake Friction Material Applications, *Wear* 317, 2014. P. 201 – 212.
14. Ramesh C.S., Ahmed R.N., Mujeebub M.A., and Abdullah M.Z., Development and Performance Analysis of Novel Cast Coppe – SiC – Gr Hybrid Composites, *Mater. Des.* 30, 2009. P. 1957 – 1965.
15. Meher A.& Chaira D. Effect of Graphite and SiC Addition into Cu and SiC Particle Size Effect on Fabrication of Cu – Graphite – SiC MMC by Powder Metallurgy, Published online by Trans Indian Inst Met (2017).

Надійшла до редакції 21.10.2016