

УДК 669.018.9:621.762.5

**А. С. Осипов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; **Д. Л. Коростышевский**<sup>1</sup>, **М. В. Никишина**<sup>1</sup>,  
**Т. Б. Сербенюк**<sup>1</sup>, **Т. В. Колабылина**<sup>1</sup>; **С. В. Ткач**<sup>1</sup>, **Д. А. Стратийчук**<sup>1</sup>, кандидаты  
технических наук; **Е. И. Фесенко**<sup>1</sup>, **В. И. Часнык**<sup>2</sup>, канд. техн. наук; **Г. П. Гажа**<sup>1</sup>,  
**В. С. Беловол**<sup>1</sup>, **Т. И. Смирнова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; **И. А. Петруша**<sup>1</sup>,  
**Н. А. Бондаренко**<sup>1</sup>, **М. Г. Лошак**<sup>1</sup>, **В. И. Лавриненко**<sup>1</sup>,  
**И. П. Фесенко**<sup>1</sup>, доктора технических наук

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>ГП НИИ «Орион», г. Киев, Украина

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА, КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА, КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

*Data on measuring the thermal conductivity coefficient of the diamond, cubic boron nitride, tungsten carbide and aluminum nitride based composites obtained by the HP-HT treatment, hot pressing and pressureless sintering are presented. The composite materials are characterized by thermal conductivity from 16 to 430 W/(m·K) depending on the structure of matrix and inclusions. The measured vast range of thermal conductivity values of the composites can be used for improving quality and estimation of the possible fields of their application as cutting tool and wear resistant materials.*

### Введение

Теплопроводность – важнейший параметр при диагностике структурного состояния поликристаллических и композиционных материалов. Высокая теплопроводность этих материалов способствует повышению сопротивления термоудару и препятствует образованию «горячих точек» при локальном нагревании [1].

Теплопроводность композиционных материалов зависит не только от теплопроводности их компонент, но и от состояния границ, сопряжения кристаллических решеток, наличия зернограничных фаз. Например, в сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалах такие уникальные свойства алмаза, как теплопроводность, твердость и стойкость, проявляются только при равномерном распределении составляющих, наличии химических связей на границах контакта алмаз – матрица, определенном состоянии прослойки вокруг частиц алмаза [2]. На практике эффекты проводимости, к которым относится также теплопроводность, существенно отличаются по величине из-за различия микроструктур составляющих композит компонент и соответственных материалов в монолитном, монокристаллическом состоянии.

Значение теплопроводности перспективных инструментальных композиционных материалов в недостаточной мере описано в литературе.

Цель настоящей работы – исследовать теплофизические свойства инструментальных композиционных материалов с высокотеплопроводными составляющими (алмаз, карбид кремния, нитрид алюминия), а также связками на основе металлов (медь, кобальт, олово) и полимеров, определить их корреляцию со структурой и методами получения.

### Методика эксперимента

При анализе микроструктуры образцов композитов использовали электронный микроскоп ZEISS EVO 50XVP. Теплопроводность образцов размером 15×15×1 мм композитов измеряли прибором ИТЗ-МХТИ (Новомосковск, РФ). Ошибка измерения составляла 5 % [3].

### Результаты и их обсуждение

Результаты анализа микроструктуры алмазосодержащего слоя алмазо-твердосплавной пластины (АТП) свидетельствуют, что 74 об. % составляет крупнофракционный алмаз со сред-

ним размером зерен 15–20 мкм (рис. 1). Межзеренное пространство – 15 % – заполнено мелкой фракцией алмаза и кобальтом (5 %). Высокая теплопроводность образцов композита алмазного слоя (табл. 1) объясняется высокой теплопроводностью алмаза и тесным тепловым контактом алмазных зерен.

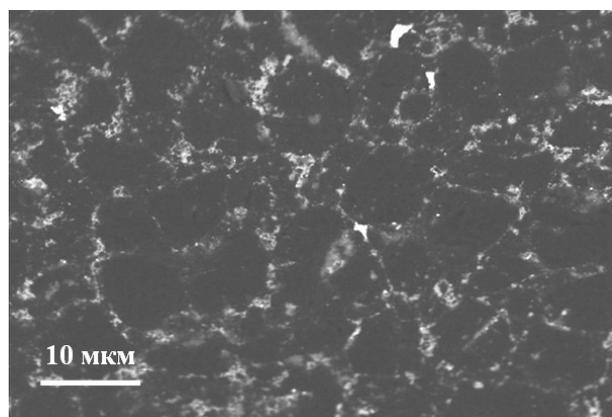


Рис. 1. Микроструктура шлифа образца композита алмазного слоя АТП

Таблица 1. Измеренные при комнатной температуре и приводимые в литературе значения теплопроводности образцов композитов и их компонентов

Образец	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Литературный источник
Композит алмазного слоя АТП	383±18	
Композит алмаз –15 об.% SiC	202±12	
WC–15мас.% Co (BK 15) после P = 8,0 ГПа, T = 1500 °C	113±6	
WC–6 мас.% Co (BK 6)	114±6	
Нано WC Wolkar	20	[4]
WC	29	[5]
	21	[6]
	29	[7]
	34	[8]
Co	69,5	[9]
	96	[10]
	69	[6]
BK6	34,6	[11]
	62,8	[8]
BK15	34,6	[11]
	67	[8]

Микроструктура композита алмаз–SiC представляет собой около 85 об. % алмазных зерен среднего размера 25 мкм и около 15 % расположенных на их границах прослоек карбида кремния (рис. 2). Более низкая теплопроводность композита алмаз–SiC (см. табл. 1) объясняется вносимым в систему тепловым сопротивлением карбида кремния, теплопроводность которого составляет для монокристаллов 100–300 Вт/(м·К), для поликристаллов – 20–100 Вт/(м·К) [1].

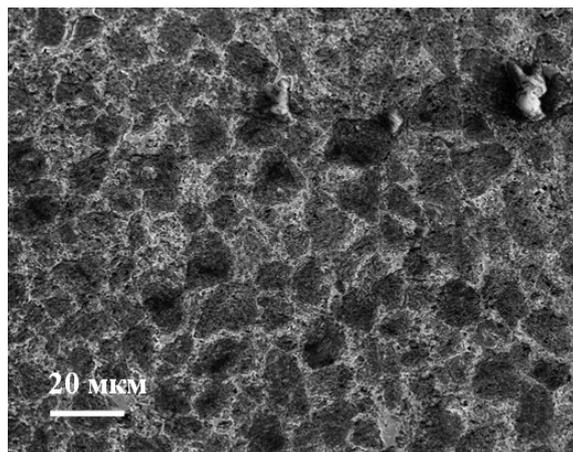


Рис. 2. Микроструктура шлифа образца композита алмаз–SiC

Микроструктура образца WC–15мас.% Co (твердого сплава BK15) после термобарического воздействия состоит из зерен карбида вольфрама среднего размера 5 мкм и прослоек кобальта (рис. 3).

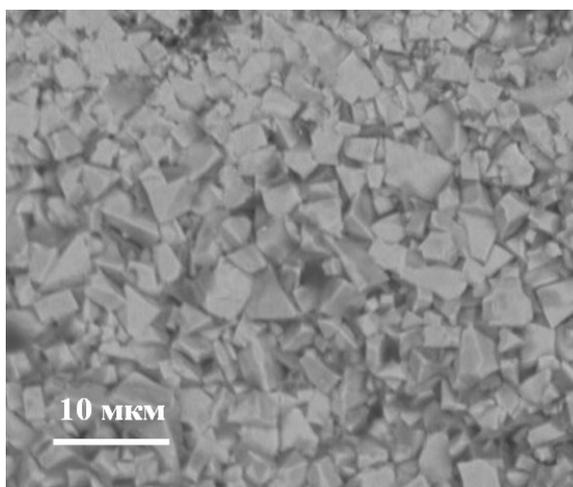


Рис. 3. Микроструктура образца WC–15мас.% Co после P-T обработки

Сравнительно высокая измеренная теплопроводность материалов твердого сплава WC–Co марок BK15 и серийного BK6 по сравнению с поликристаллическим материалом Wolkar (20 Вт/(м·К)) объясняется низким удельным содержанием границ, что служит причиной низкого рассеяния теплового потока в материале, и присутствием металлической составляющей кобальта на границе зерен. В то же время приводимые в литературе значения теплопроводности карбида вольфрама, кобальта и твердых сплавов на их основе значительно ниже измеренного значения теплопроводности образцов композитов WC-Co (см. табл. 1). Впервые полученные значения теплопроводности твердых сплавов более 100 Вт/(м·К) объясняются более высокой степенью совершенства кристаллической решетки карбида вольфрама и кобальта, что способствует меньшему рассеянию фононов и носителей заряда, участвующих в переносе тепла.

Поликристаллические образцы на основе кубического нитрида бора получали при высоких температурах и давлении спеканием исходных порошков кубического нитрида бора, а также прямым твердофазным превращением пиролитического нитрида бора в кубический согласно технологическим схемам [12]. Различие структур образцов приводит к различию их теплопроводности (табл. 2). Вследствие рекристаллизации кубического нитрида бора при спекании на границах образуются новые дисперсные зерна, что влияет на интегральную теплопроводность композита. Для поликристаллов, полученных прямым переходом, характерно

наличие крупнозернистой структуры с совершенными контактами между зернами, что объясняет их высокую теплопроводность (до 440 Вт/(м·К)).

Таблица 2. Теплопроводность образцов поликристаллических материалов cBN

Образец	Теплопроводность, Вт/(м·К)
cBN, спекание при НР–НТ	220±11
cBN, прямой переход при НР–НТ, гексагональная кубическая структура	440±22

В целях теплофизического описания металлополимерных алмазосодержащих инструментальных композитов измеряли теплопроводность металлоорганической матрицы и составов, содержащих как алмаз, так и нитрид алюминия (табл. 3). Для изготовления образцов применяли алмазный порошок размером 28–40 мкм (АСМ 40/28) в количестве, соответствующем 100 % концентрации алмаза в инструменте. Нитрид алюминия с теплопроводностью 85 Вт/(м·К), полученный горячим прессованием смеси AlN + 5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> согласно описанной в [13] технологи, дробили и просеивали через сито 0069. Полученный порошок добавляли в металлоорганическую матрицу.

Таблица 3. Теплопроводность образцов композитов на основе меди, олова, алмаза, нитрида алюминия, карбида кремния и полимера

Состав образца, мас. %	Теплопроводность, Вт/(м·К)
металлоорганическая матрица (медь – 50; олово – 30; полимерная связка – 20)	16,5±0,8
25 % алмаз – металлоорганическая матрица	22,7±1,1
25 % AlN – металлоорганическая матрица	16,0±0,8
AlN–5% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> горячее прессование	85±4,3
AlN–50% SiC–4% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> свободное спекание	37±2,0

На основании приведенных в табл. 3 данных приходим к выводу, что добавление в композит такой высокотеплопроводной составляющей, как алмаз, повышает на 38 % теплопроводность полученного композита, по сравнению с матрицей. Добавление равного количества керамических частиц теплопроводностью примерно на порядок ниже, чем у алмаза (нитрида алюминия), не воздействует подобным образом на теплопроводность композита с металлоорганической матрицей.

Теплопроводность композита из шихты 46%AlN–50%SiC–4%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученного свободным спеканием, ниже теплопроводности AlN и SiC, что объясняется образованием в составе этого композита твердого раствора карбида кремния в нитриде алюминия [14]. Это свидетельствует о влиянии точечных дефектов твердого раствора карбида кремния на прохождение потока фононов в высокотеплопроводной матрице нитрида алюминия. Для композитов инструментального назначения важно обеспечить высокую потенциальную теплопроводность составляющих фаз, согласование межзеренных контактов и фононных потоков.

### Выводы

Проанализированы теплофизические свойства композитов на основе алмаза, кубического нитрида бора, карбида вольфрама, нитрида алюминия, полученных спеканием при высоком давлении, горячим прессованием и свободным спеканием. Теплопроводность композитов изменяется с 16 до 430 Вт/(м·К) в зависимости от структуры и физико-механических свойств матрицы и включений. Широкий диапазон значений теплопроводности описанных

композитов позволяет наиболее точно определить области их применения в качестве режущих и износостойких материалов.

### Литература

1. Thermal and Electrical Conduction in MMCs / T. W. Clyne // Comprehensive composite materials, Elsevier Science LTD. – 2000. – V. 3.
2. Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Основы создания алмазосодержащих композиционных материалов для породоразрушающих инструментов / Под ред. Н.В. Новикова. – К.: Изд-во ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 456 с.
3. Азима Ю. И., Беляев Ю. И., Кулаков М. В. Устройство для измерения коэффициента теплопроводности высокотеплопроводных материалов // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – № 4. – С. 248–249.
4. Strel'chuk P. M., Uzunyan M. D. The energy intensity analysis of the diamond–spark grinding of the WolKar nanostructural hard alloy // J. Sup. Mat. – 2010. – 32. – N 1. – P. 50–54.
5. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справоч. М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
6. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 326 с.
7. Теплопроводность твердых тел: Справоч. / А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева, А. С. Пушкарский; Под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
8. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справоч. изд./ Челябинск: Металлургия, 1989. – 368 с.
9. Свойства элементов. Ч. 1: Физические свойства / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
10. Смитлз К. Дж. Металлы: Справоч. изд.: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. – 448 с.
11. Туманов В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт: Справоч. – М.: Металлургия, 1971. – 96 с.
12. Розробка полікристалічних матеріалів на основі кубічного нітриду бору з спеціальними електрофізичними властивостями для застосування в якості пасивних та активних елементів приладів сучасної електроніки / І. А.Петруша, О. С.Осіпов, Т. І.Смірнова та ін. // Пріоритети наукової співпраці ДФФД і БРФФД: Матер. спільних конкурсних проєктів Державного фонду фундаментальних досліджень і Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень („ДФФД-БРФФД –2005”). – К.: ДІА, 2007. – С. – 218–230.
13. Фесенко И. П. Диэлектрическая керамика с высокой теплопроводностью на основе AlN // Сверхтвердые матер. – 2001. – № 2. – С. 15–20.
14. Свойства керамического материала, полученного спеканием порошковой системы AlN–SiC–C–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / И. П. Фесенко, О. Ф. Коломыс, Н. К. Давидчук и др. // Сб. докл. II Междунар. Самсоновской конф. «Материаловедение тугоплавких соединений», 18 – 20 мая. К., 2010. – С. 60.

Поступила 25.05.10