

А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, Ю. В. Губин, Т. В. Куринная, В. С. Терещенко  
**Жаростойкость электроискровых покрытий из сплавов  
системы Ni – Cr – Al – Y**

**Резюме**

Исследована жаростойкость стали 45, сплавов системы Ni – Cr – Al – Y и электроискровых покрытий из этих сплавов на стали 45 при 900 °С и выдержке 20 часов на воздухе. Показано, что жаростойкость сплавов Ni – Cr, Ni – Cr – Al и Ni – Cr – Al – Y на два порядка больше жаростойкости стали 45, а жаростойкость стали с покрытиями на порядок больше в сравнении с жаростойкостью стали 45 (увеличение массы образца стали достигает 90 мг/см<sup>2</sup>, стали с покрытиями Ni – Cr – Al – Y 2,0 – 2,5 мг/см<sup>2</sup>).

A. V. Paustovskiy, R. A. Alfintseva, Yu. V. Gubin, T. V. Kurinnaya, V. S. Tereschenko  
**Heat-resistance of spark coatings Ni – Cr – Al – Y alloys system**

**Summary**

The heat resistance of 45 steel, alloys of Ni – Cr – Al – Y and electric-spark coatings of these alloys on steel 45 at 900 °C and holding for 20 hours in air is investigated. It is shown that the heat resistance of Ni – Cr alloy and Ni – Cr – Al – Y alloys is in two degree higher than resistant of steels 45, and the heat resistance of coated steel is one order higher in comparison with the heat-resistant of steel 45 (increasing weight of steel sample reaches 90 mg/cm<sup>2</sup>, steel with Ni – Cr – Al – Y coating reaches 2,0 – 2,5 mg/cm<sup>2</sup>).

УДК 669.018.95:539.4.015:665.3:621.762.5

*Структура та властивості розпилених  
порошків евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$*

П. І. Лобода, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України

Ю. І. Богомол, кандидат технічних наук

О. І. Білій\*, кандидат технічних наук

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

\*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

*Методом відцентрового плазмового розпилення пресовок, сформованих із суміші порошків карбіду бору і дибориду титану, був одержаний порошок евтектичного сплаву системи  $V_4C - TiB_2$  з розмірами частинок 100 – 500 мкм, мікроструктура якого представляє собою матрицю з  $V_4C$ , армовану волокнистими і пластинчастими включеннями  $TiB_2$ . Така мікроструктура дозволяє реалізувати на рівні окремо взятих частинок механізми зміцнення типові для спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів. Дослідження технологічних і механічних властивостей одержаного порошку евтектичного сплаву системи  $V_4C - TiB_2$  показали перспективність його використання в якості абразивного матеріалу, а також для газотермічного напilenня зносостійких покриттів.*

**М**атеріали з використанням карбіду бору все ширше застосовуються у промисловості завдяки унікальному комплексу фізико-механічних

властивостей. Завдяки специфічній конфігурації зв'язків бору у кристалічній структурі  $B_4C$  має високі значення міцності хімічного зв'язку і, як наслідок, високу твердість, модулі пружності і температуру плавлення [1]. Суттєвою перевагою цього матеріалу є його низька питома вага. За співвідношенням «властивості/питома вага» він має значні переваги над іншими матеріалами в таких областях застосування як інструментальні, високотемпературні конструкційні матеріали та матеріали для електроніки [2]. Недоліком  $B_4C$  та матеріалів на його основі є висока крихкість і низька міцність.

Одним з ефективних шляхів підвищення міцності матеріалів є армування волокнами тугоплавких сполук, яке реалізується під час спрямованої кристалізації розплавів евтектичних сплавів квазібінарних систем  $B_4C - TC$  (де  $TC - TiB_2, ZrB_2, HfB_2, SiC$  тощо) [3]. Спрямованою кристалізацією розплавів можна отримувати матеріали з міцністю понад 4,5 ГПа за рахунок високої чистоти та досконалості структури фазових складових композиту [4].

Авторами у попередніх роботах [5 – 7] для одержання композиційних матеріалів з ізотропною структурою на макрорівні і анізотропною на мікрорівні було запропоновано використовувати евтектичні порошки системи  $B_4C - TiB_2$ , виготовлені механічним подрібненням. Такий процес є достатньо трудо-, енерго- і ресурсномістким, а тому в даній роботі пропонується одержувати порошки евтектичного сплаву  $B_4C - TiB_2$  відцентровим розпиленням порошкових заготовок евтектичного складу.

В якості вихідних матеріалів використовували порошки дибориду титану  $TiB_2$  та карбиду бору  $B_4C$ , вироблені на Донецькому заводі хімреактивів з чистотою 98 % (по масі) та середнім діаметром частинок ~1 мкм. Порошки, взяті у евтектичному співвідношенні 77 об. %  $B_4C + 23$  об. %  $TiB_2$ , відповідно до даних роботи [8] їх змішували шляхом 10 разового протирання через сито з розміром комірок 50 мкм. В якості пластифікатора використовували 2,5 % водний розчин полівінілового спирту.

Пресування зразків довжиною 50 мм і діаметром 30 мм здійснювали на гідравлічному пресі. Пресуванням при 400 МПа була одержана заготовка з середньою пористістю 50 %. Заготовки діаметром 30 мм і довжиною 60 мм формували на гідравлічному пресі під тиском 50 МПа і висушували у вакуумній сушильній шафі протягом 12 годин при 100 °С. Для підвищення міцності стрижні спікали при температурі 1600 °С у вакуумній шахтній електропечі.

Одержані стрижні піддавали відцентровому розпиленню на промисловій плазмовій установці (рис. 1), створеній в Інституті електрозварювання ім. Е. О. Патона [9, 10].

Особливістю такого методу є те, що він є саморегулюючим і дозволяє одержувати порівняно невелику різницю в гранулометричному складі частинок порошку. Крім цього можливість точного виконання умов розпилення стрижня забезпечує високу однорідність одержаних сферичних частинок. Використання в якості джерела нагріву високотемпературної плазмової дуги дозволяє одержувати порошки з частинками сферичної форми

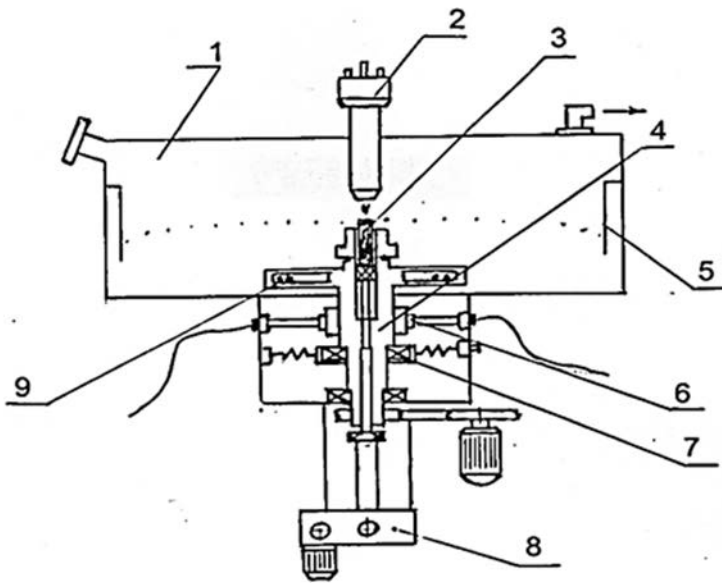


Рис. 1. Схема установки для відцентрового розпилення. 1 – камера, 2 – плазмотрон, 3 – дослідний зразок сплаву, 4 – обертач, 5 – екран, 6 – струмовідвід, 7 – вузол рухомого підшипника, 8 – вузол подачі зразка, 9 – вузол стабілізації валу.

з матеріалів з високою температурою плавлення. При цьому, плазмова дуга також виявляє рафінуючу дію на розплав.

Стрижні розпилювали при напрузі плазмової дуги 38 – 40 В, силі струму 450 – 470 А та частоті обертання стрижня 7000 – 7100 об/хв.

Мікроструктуру одержаних порошків вивчали з використанням скануючого електронного мікроскопа “Selmi PEM 106 II” з EDS приставкою. Рентгенофазовий аналіз проводили на установці Rigaku Ultima IV. Мікромеханічні властивості досліджували за допомогою мікротвердоміра MНV-1000 при навантаженні 3 Н.

Одержаний в результаті відцентрового плазмового розпилення порошок евтектичного сплаву системи  $B_4C - TiB_2$  був темно-сірого кольору, характерного для вихідних порошків карбиду бору та дибориду титану. Дослідження макроструктури частинок порошку з використанням скануючої електронної мікроскопії показало, що більшість частинок мають сферичну форму, яка характерна для порошків, одержаних розпиленням розплавів [11]. Розмір одержаних евтектичних частинок склав від 100 мкм (мінімальна фракція) до 500 мкм (максимальна фракція). Гранулометричний аналіз одержаного евтектичного порошку показав, що близько 60 % порошку складає фракція 300 – 500 мкм, 35 % – фракція 100 – 200 мкм, все інше – фракція <100 мкм, яка в основному складається з однофазних частинок несферичної форми, а тому не піддавалась детальному аналізу (рис. 2).

Дослідження мікроструктури частинок порошку показало, що для частинок з розмірами ~ 100 мкм характерна досить рівномірна евтектична структура, яка складається з матриці з карбиду бору, армованої стрижневими або пластинчастими включеннями дибориду титану (рис. 3 а, б). Така

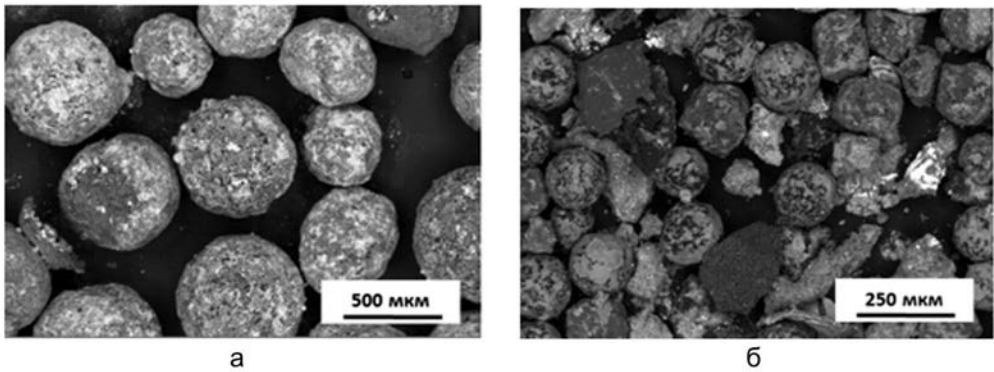


Рис. 2. Макроструктура порошку евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$ , одержаного відцентровим розпиленням. а – крупна фракція, б – дрібна фракція.

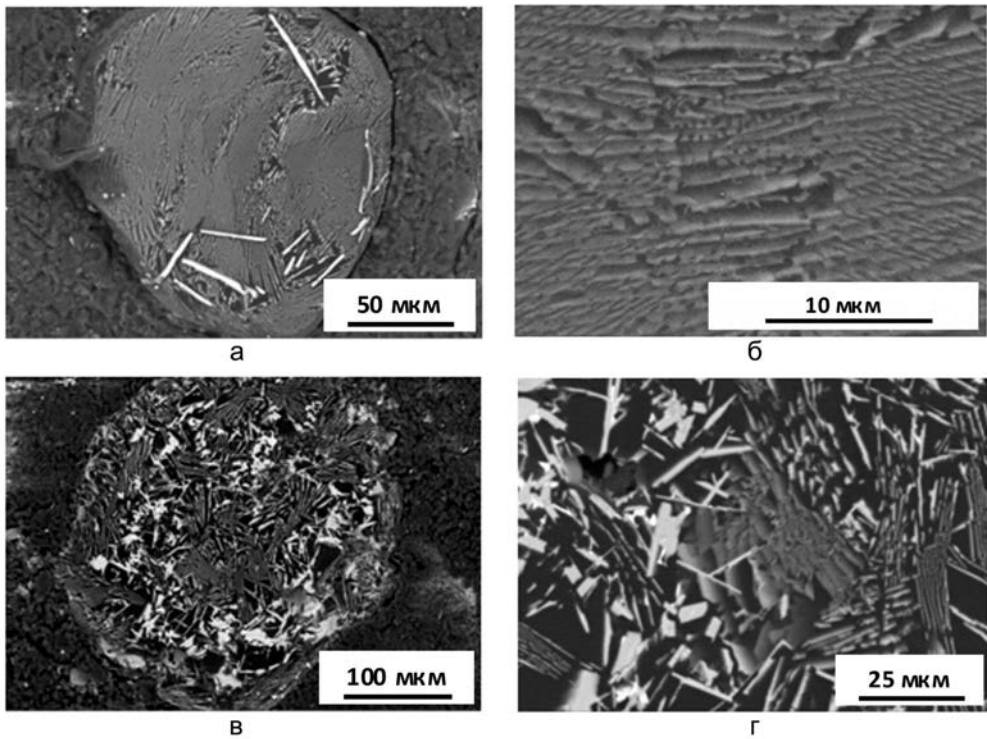


Рис. 3. Мікроструктура порошку евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$ , одержаного відцентровим розпиленням. а, б – мінімальна фракція, в, г – крупна фракція.

мікроструктура є типовою для спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  [12]. В мікроструктурі доволі чітко проглядаються області ромбоподібної форми, які показують, що при кристалізації евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  головною фазою був карбід бору, який має ромбоєдричну кристалічну ґратку [1]. За даними металографічного аналізу середній розмір диборидних армуючих включень склав 0,3 мкм, середня відстань між ними 0,3 мкм. Такі розміри є дещо нижчими за розміри включень та середню

відстань між ними, одержані для спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2 - 0,5$  мкм та  $0,8$  мкм, відповідно [12]. Одержані структурно-геометричні характеристики мікроструктури є наслідком значно вищих швидкостей охолодження, які забезпечує метод відцентрового розпилення ( $10^5$  °C/с), в порівнянні з методом безтигельної зонної плавки ( $10^2$  °C/с) [13]. Значно вищі швидкості охолодження закономірно приводять до значно вищих температурних градієнтів, що, в свою чергу, сприяє подрібненню мікроструктури евтектичних сплавів [3]. Також в мікроструктурі евтектичних частинок  $V_4C - TiB_2$  з мінімальним розміром спостерігаються більш крупні включення дибориду титану з поперечним розміром  $1 - 5$  мкм, що може бути наслідком концентраційного переохолодження, викликаного локальною зміною хімічного складу або наявністю домішок у розплаві.

Дослідження мікроструктури частинок евтектичного порошку  $V_4C - TiB_2$  більш крупних фракцій ( $200 - 500$  мкм) показали, що для них характерною є нерівномірна евтектична структура, яка складається з матриці з карбіду бору темно-сірого кольору, армованої включеннями дибориду титану світлого кольору (рис. 3 в, г). Причому включення дибориду титану розміщені в матриці хаотично і мають різну форму: від дрібнозернистої стрижневої з поперечним діаметром включень, порівняним з дрібнозернистими частинками (до  $0,3$  мкм) до близької до крупнозернистої рівноважної з розмірами до  $20 - 30$  мкм. Також на крупних частинках спостерігаються пори розміром до  $10$  мкм. Відмінність у структурі порошків різних фракцій пояснюється тим, що у більшому об'ємі частинок значно важче реалізувати рівномірний фронт кристалізації, який є необхідною умовою для одержання гомогенної евтектичної структури [3]. Це може вказувати на те, що під час розпилення розплав евтектичного складу у частинках з розмірами до  $500$  мкм формується велика кількість центрів кристалізації, що в результаті призводить до утворення комірчастої структури (рис. 3 в, г). Очевидно, що під час кристалізації евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  в умовах відцентрового розпилення, в крупних частинках превалює концентраційне переохолодження, яке може бути наслідком локальної неоднорідності хімічного складу у розплаві, а також природи зародження та росту евтектичних сплавів на основі карбіду бору [14].

Рентгенофазовий аналіз порошку евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$ , одержаного відцентровим плазовим розпиленням, підтвердив, що він складається тільки з фаз карбіду бору  $V_4C$  і дибориду титану  $TiB_2$ .

Дослідження технологічних властивостей показало, що насипна щільність одержаного відцентровим розпиленням порошку евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  фракції  $300 - 500$  мкм дорівнює  $1,45$  г/см<sup>3</sup>, а його текучість –  $5,5$  г/с. Експериментальні дослідження мікромеханічних характеристик показали, що середнє значення твердості по Віккерсу одержаного порошку складає  $33,57$  ГПа. Така твердість задовільно співпадає з твердістю спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  [12]. Середня тріщиностійкість, розрахована за методом мікроіндентування, одержана на рівні  $6,23$  МПа·м<sup>1/2</sup>, що також є на рівні спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву  $V_4C - TiB_2$  [12]. Середня міцність

на стиснення частинок розмірами до 500 мкм склала 12,4 ГПа. Одержані дані свідчать про перспективність використання одержаного плазовим відцентровим розпиленням порошку евтектичного сплаву  $B_4C - TiB_2$  в якості абразивного матеріалу, а також для газотермічного напилення зносостійких покриттів.

## Література

1. Самсонов Г.В., Марковский Л.Я., Жигач А.Ф. Бор, его соединения и сплавы. – Киев: АН УССР, 1960. – 590 с.
2. Кислый П.С., Кузенкова М.А., Боднарук Н.И. Карбид бора. – Киев: Наук. думка, 1988. – 216 с.
3. Ashbrook R.L. Directionally Solidified Ceramic Eutectics. // Journal of the American Ceramic Society. – 1977. – 60, 9 – 10. – P. 428 – 435.
4. Bogomol I., Loboda P. Chapter 10. Directionally solidified ceramic eutectics for high-temperature applications in book MAX Phases and Ultra-High Temperature Ceramics for Extreme Environments. – IGI Global, 2013. – P. 303 – 322.
5. Лобода П.І., Богомол Ю.І., Марич М.В. Структура та властивості евтектичного композиту  $B_4C - TiB_2$ , одержаного електророзрядним спіканням // Металознавство та обробка металів. – 2011. – № 4. – С. 35 – 42.
6. Bogomol I., Grasso S., Nishimura T. Hard polycrystalline eutectic composite prepared by spark plasma sintering // Ceramics International. – 2012. – 38, 5. – P. 3947 – 3953.
7. Bogomol I., Borodianska H., Zhao T. Dense and tough ( $B_4C - TiB_2$ ) –  $B_4C$  'composite within a composite' by spark plasma sintering // Scripta Materialia. – 2014. – 71. – P. 17 – 20.
8. Лобода П.І., Богомол Ю.І., Сисоєв М.О. Структура і властивості надтвердих матеріалів на основі псевдобінарних систем боридів, отриманих методом зонної плавки // Сверхтвердые материалы. – 2006. – 5. – С. 30 – 34.
9. Lezberg E.A., Lord A.M. Apparatus for the preparation of metal powders. Patent USA N 2795819. 18.07.1967.
10. Kauffman A.R. Method and apparatus for making powders. Patent USA N 3099041. 30.07.63.
11. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. – Київ: НТУУ «КПІ», 2006. – 353 с.
12. Лобода П.І., Богомол Ю.І. Мікромеханічні характеристики спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів системи  $B_4C - Me^{IV}B_2$  // Металознавство та обробка металів. – 2006. – 4. – С. 33 – 40.
13. Trosnikova I.Yu., Loboda P.I., Karasevska O.P. Effect of the Cooling Rate During Melt Solidification on the Structure and Properties of  $WC - W_2C$  // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2014. – 52, 11 – 12. – P. 674 – 679.
14. Bogomol I., Vasyukiv O., Sakka Y. Mechanism of nucleation and growth of directionally crystallized alloys of the  $B_4C - MeB_2$  system // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – 490, 1 – 2. – P. 557 – 561.

Одержано 16.02.15

Структура и свойства распыленных порошков эвтектического сплава  $B_4C - TiB_2$

Резюме

Методом центробежного плазменного распыления прессовок, сформированных из смеси порошков карбида бора и диборида титана, был получен порошок эвтектического сплава системы  $B_4C - TiB_2$  с размерами частиц 100 – 500 мкм, микроструктура которого представляет собой матрицу из  $B_4C$ , армированную волокнистыми и пластинчатыми включениями  $TiB_2$ . Такая микроструктура позволяет реализовать на уровне отдельных взятых частиц механизмы упрочнения, типичные для направленно закристаллизованных эвтектических сплавов. Исследование технологических и механических свойств полученного порошка эвтектического сплава системы  $B_4C - TiB_2$  показали перспективность его использования в качестве абразивного материала, а также для газотермического напыления износостойких покрытий.

P. I. Loboda, I. I. Bogomol, O. I. Biliy

Structure and properties of sputtered powder of the eutectic  $B_4C - TiB_2$  alloy

Summary

By the centrifugal plasma sputtering of the pressed mixture of boron carbide and titanium diboride powders the powder of the eutectic  $B_4C - TiB_2$  alloy with particle size of 100 – 500 microns and microstructure represented  $B_4C$  matrix reinforced by fiber and plate  $TiB_2$  inclusions was produced. This type of microstructure allows to realize on the level of each particles the strengthening mechanisms typical for directionally solidified eutectic alloys. The investigation of technological and mechanical properties of the powder of the eutectic  $B_4C - TiB_2$  alloy shows the prospects for using it as an abrasive material as well as for gas-thermal spraying of wear-proof coatings.

**Шановні колеги!**

**Триває передплата на науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» на 2016 р.**  
Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.  
Вартість одного номера журналу – 40 грн., передплата на рік – 160 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2014 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників, спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника

**просимо надсилати до редакції,**  
вказавши номер і дату платіжного документа.