

УДК 539.216:621.762

**О. Н. Кайдаш, В. В. Ивженко**, кандидаты технических наук,  
**М. А. Маринич**, канд. хим. наук, **И. П. Фесенко**, д-р техн. наук,  
**Г. Ф. Сарнавская; В. Н. Ткач**, д-р физ.-мат. наук; **В. С. Беловол**  
*Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ $V_4C-TiB_2$

*Изучена устойчивость керамических материалов системы  $V_4C-TiB_2$  к гидроабразивному износу в морской воде и пульпе из морской воды с песком. В целях этого измерена плотность тока растворения при выбранном потенциале  $\varphi = +0,6$  В. Наиболее коррозионностойкий горячепрессованный керамический материал  $V_4C-10\% TiB_2$  имеет высокую твердость НКН-18,5 ГПа и повышенную трещиностойкость  $K_{Ic} = 5,3$  МПа·м<sup>1/2</sup>.*

**Ключевые слова:** керамический материал,  $V_4C-TiB_2$ , гидроабразивный износ, коррозионная стойкость, плотность тока растворения.

Износ деталей машин зависит от условий трения, свойств материалов и конструкции. Износ можно рассматривать как механический процесс, осложнённый действием физических и химических факторов, вызывающих снижение прочности микрообъёмов поверхностного слоя. По условиям внешнего воздействия на поверхностный слой можно выделить абразивный износ (газоабразивный, гидроабразивный).

Гидроабразивному износу подвергаются детали гидравлических машин и трубопроводов (рабочие колёса, корпуса грунтовых насосов, улитки земснарядов, уплотняющие устройства, соединительная арматура, лопасти и камеры гидротурбин и др.). Интенсивность гидроабразивного износа зависит от качества изнашиваемого материала, характеристик гидросмеси, коррозионной активности жидкой среды, скорости и угла перемещения частиц относительно изнашиваемой поверхности и пр. Увеличению износостойкости изделий способствует применение материалов с высокой износостойкостью. Основной механической характеристикой, которую часто используют для оценки износостойкости, является твердость [1–3]. Ранее были предприняты попытки интерпретировать твердость как параметр, определяющий износостойкость материала. Однако известны эксперименты, в результате которых было показано, что в ряде случаев большим значениям твердости может соответствовать больший износ, что обуславливалось хрупкостью материала. Было установлено, что ключевыми факторами влияния на скорость эрозии являются твердость и ударная вязкость [3].

Лидерскую позицию среди износостойких материалов по-прежнему удерживают керамические материалы на основе карбида бора [1; 4]. Для улучшения уплотнения, повышения вязкости материалов и снижения температуры горячего прессования используют добавки диборидов переходных металлов IV–VI групп Периодической системы элементов [4; 5]. Цель настоящей работы – установить взаимосвязь механических свойств керамических материалов на основе карбида бора со стойкостью к гидроабразивному износу.

Изучали относительную плотность, механические свойства [6] и стойкость к гидроабразивному износу горячепрессованной керамики системы  $V_4C-TiB_2$ . Содержание добавки диборида титана изменяли от 10 до 50%. Здесь и далее по тексту % (по массе). Температура горячего прессования составляла 2100–2250 °С при давлении прессования 30 МПа в течение 20 мин. Материалы имели высокую плотность (98,5–99,5% теоретической). В качестве эталона изготовили горячепрессованные плотные образцы состава  $V_4C-2\% C$ . Для экспресс-оценки гидроабразивного износа изучали коррозионную стойкость

материалов (измеряли силу тока растворения) с помощью электрохимической установки ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, состоящей из потенциостата П-5848, вращающегося дискового электрода с кольцом и электрохимической ячейки. Методика работы с вращающимся дисковым электродом описана в [7]. В электрохимическую ячейку погружают три электрода. Рабочий электрод состоит из фторопластовой трубки-кожуха, в нижнюю часть которой помещают диск-образец из исследуемого материала диаметром 18 мм. К обратной стороне диска подводят электрод, который проходит внутри фторопластовой трубки. В этой же ячейке электродом сравнения был хлор-серебряный электрод, вспомогательным – платиновый электрод. На рабочем электроде для разных материалов снимали анодные потенциостатические кривые [8]. По полученным потенциостатическим кривым выбрали потенциал, при котором происходит процесс активного растворения исследуемых материалов ( $\varphi = +0,6$  В). В электрохимическую ячейку, заполненную морской водой или пульпой из полидисперсных частиц песка и морской воды, помещали изучаемый материал во фторопластовой втулке, подключали его к потенциостату и устанавливали выбранный ранее потенциал. Далее в течение часа производили вращение образца с различной скоростью. Не останавливая вращения, измеряли силу тока растворения. Показателем скорости процесса растворения является плотность тока растворения  $i$ , которую можно определить как частное от деления силы тока растворения на площадь исследуемого образца. Чем выше плотность тока растворения, тем ниже коррозионная стойкость полученного материала. Значения плотности тока растворения  $V_4C$ -материалов с различным содержанием  $TiB_2$  в морской воде показаны на рис. 1, в пульпе из морской воды с песком – на рис. 2.

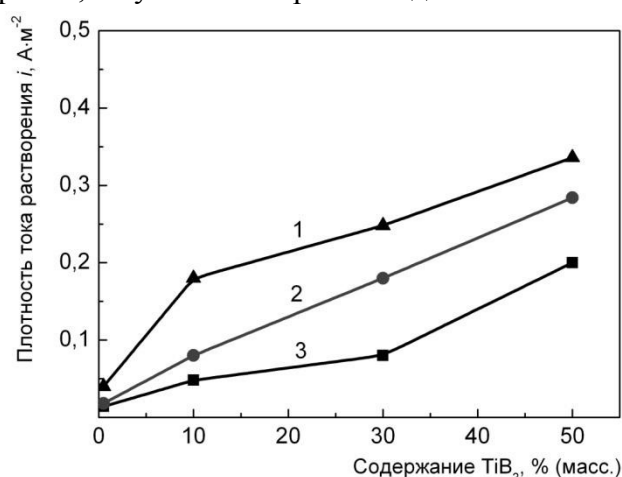


Рис. 1. Зависимость плотности тока растворения  $i$  от содержания добавки  $TiB_2$  в керамике  $V_4C-TiB_2$  и частоты вращения дискового электрода в морской воде: 1 – 3800 мин<sup>-1</sup>, 2 – 2000 мин<sup>-1</sup>, 3 – 1200 мин<sup>-1</sup>

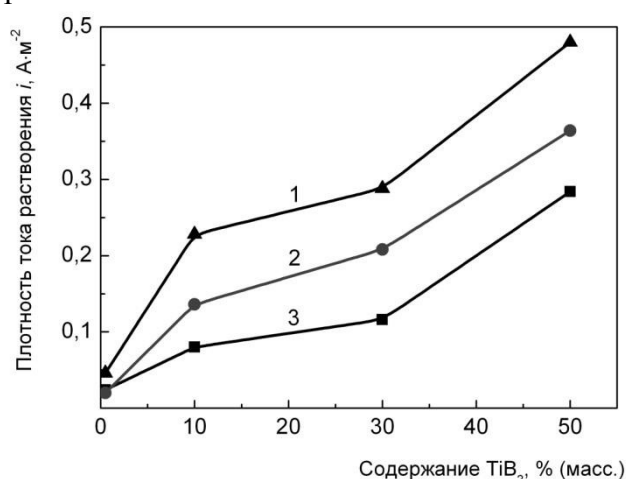


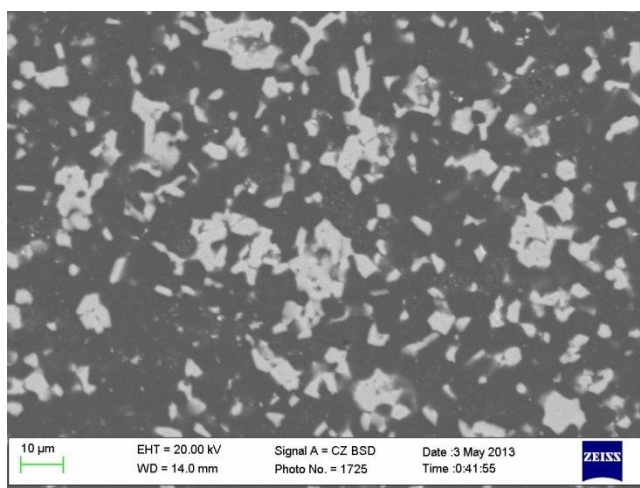
Рис. 2. Зависимость плотности тока растворения  $i$  от содержания добавки  $TiB_2$  в керамике  $V_4C-TiB_2$  и частоты вращения дискового электрода в пульпе из морской воды и песка: 1 – 3800 мин<sup>-1</sup>, 2 – 2000 мин<sup>-1</sup>, 3 – 1200 мин<sup>-1</sup>

Из данных рис. 1 и 2 следует, что наивысшей коррозионной стойкостью обладает чистый  $V_4C$ . С увеличением содержания диборида титана до 50% в  $V_4C-TiB_2$  коррозионная стойкость керамики снижается: плотность тока растворения  $i$  в морской воде повышается на порядок с 0,016 до 0,200  $A \cdot m^{-2}$ , при работе в пульпе из морской воды с песком – с 0,024 до 0,284  $A \cdot m^{-2}$ . С повышением частоты вращения с 1200 до 3800 мин<sup>-1</sup> плотность тока растворения в морской воде повысилась в 3,8 раза. Например, для наилучшего состава  $V_4C-10\% TiB_2$  – с 0,048 до 0,180  $A \cdot m^{-2}$  (рис. 1). Для этого же состава с повышением гидроабразивной нагрузки

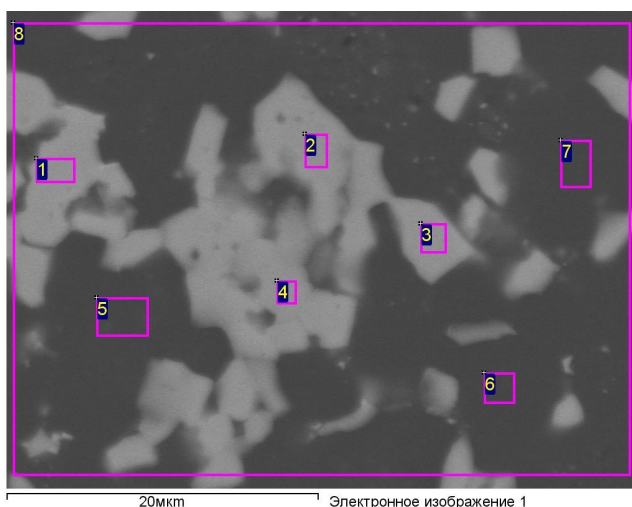
(повышение частоты вращения с 1200 до 3800 мин<sup>-1</sup> в пульпе из морской воды и песка) плотность тока растворения повысилась в 2,9 раза – с 0,080 до 0,228 А·м<sup>-2</sup> (рис. 2).

Изучение процессов, происходящих при гидроабразивном износе, было дополнено исследованиями структуры полученных материалов. Такие работы довольно сложные, так как являются междисциплинарными и требуют привлечения специалистов по материаловедению, электрохимии, механике разрушения. Коррозионное поведение – одна из наиболее сложных для понимания характеристик керамики.

Результаты рентгеновского фазового анализа показали, что после горячего прессования в микроструктуре присутствуют карбид бора, диборид титана и некоторое количество свободного углерода. Результаты сканирующей электронной микроскопии (SEM) показаны на рис. 3, микрорентгеноспектрального анализа – на рис. 4 и приведены в таблице.



*Рис. 3. Изображение микроструктуры поверхности шлифа горячепрессованного материала V<sub>4</sub>C–30% TiB<sub>2</sub>*



*Рис. 4. Расположение зон микрорентгеноспектрального анализа в микроструктуре шлифа горячепрессованного материала V<sub>4</sub>C–30% TiB<sub>2</sub>*

### **Результаты спектрального анализа горячепрессованного материала V<sub>4</sub>C–30% масс. TiB<sub>2</sub>**

Спектр	Характеристика фазы	Содержание элементов, % ат.					
		В	С	Ti	примесей		
					Cr	Fe	Zr
1	Межзеренная TiB <sub>2</sub>	65,09	4,00	29,54	0,36	0,45	0,55
2	Межзеренная TiB <sub>2</sub>	64,50	4,43	29,78	0,36	0,53	0,39
3	Межзеренная TiB <sub>2</sub>	65,72	4,53	28,63	0,34	0,41	0,36
4	Межзеренная TiB <sub>2</sub>	63,72	5,61	29,32	0,46	0,51	0,39
5	Основная (матричная) V <sub>4</sub> C	79,29	19,76	0,44	0,00	0,51	0,01
6	Основная (матричная) V <sub>4</sub> C	77,54	22,30	0,10	0,01	0,04	0,01
7	Основная (матричная) V <sub>4</sub> C	78,26	21,57	0,11	0,00	0,04	0,02

Как и другие хрупкие материалы, полученная керамика на основе карбида бора носит антибатный характер зависимости между измеренной твердостью и вязкостью разрушения (рис. 5). Наиболее твердым и коррозионностойким является чистый V<sub>4</sub>C, однако ему присуща высокая хрупкость – его трещиностойкость не превышает 2,5

МПа·м<sup>1/2</sup>. То есть при выборе работоспособного материала системы В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> следует учитывать некоторые оптимальные значения обеих характеристик.

Результаты исследований показали, что с увеличением содержания диборида титана уплотнение в горячепрессованных материалах системы В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> активируется, а твердость

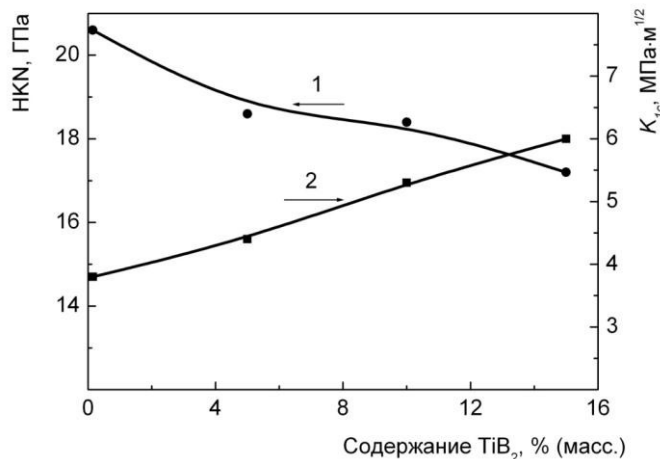


Рис. 5. Антибатный характер зависимости твердости по Кнупу HKN (1) и трещиностойкости  $K_{1c}$  (2) горячепрессованных материалов В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> в зависимости от количества уплотняющей добавки TiB<sub>2</sub>

по Кнупу плавно снижается с 21 до 16 ГПа (рис. 5). Снижение твердости композитов, по всей вероятности, связано с осаждением прослоек свободного углерода на границах раздела фаз при спекании. Напротив, присутствие в микроструктуре карбида бора частиц TiB<sub>2</sub> в межзеренных границах и междуузлиях эффективно препятствует распространению трещин, вследствие этого вязкость разрушения  $K_{1c}$  возрастает на 60% – с 3,8 до 6 МПа·м<sup>1/2</sup>. Наиболее высокой коррозионной стойкостью из исследованных материалов обладает В<sub>4</sub>С–10% TiB<sub>2</sub>, при этом он характеризуется также высокой твердостью HKN-18,5 ГПа, и повышенной трещиностойкостью  $K_{1c}$  – 5,3 МПа·м<sup>1/2</sup>.

#### Выводы

1. Изучена стойкость керамических материалов системы В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> к гидроабразивному износу в морской воде и пульпе из морской воды с песком. С этой целью измерена плотность тока растворения  $i$  при выбранном потенциале  $\varphi = +0,6$  В.

2. Показано, что с увеличением содержания добавки диборида титана в В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> коррозионная стойкость керамики снижается: плотность тока растворения  $i$  в морской воде повышается на порядок с 0,016 до 0,200 А·м<sup>-2</sup>, при работе в пульпе – с 0,024 до 0,284 А·м<sup>-2</sup>.

3. С увеличением гидроабразивной нагрузки коррозионная стойкость снижается. Для наилучшего состава В<sub>4</sub>С–10% TiB<sub>2</sub> плотность тока растворения  $i$  в морской воде повышается в 3,8 раза с 0,048 до 0,180 А·м<sup>-2</sup>, в пульпе – в 2,9 раза: с 0,080 до 0,228 А·м<sup>-2</sup>.

4. Наиболее коррозионностойкий горячепрессованный керамический материал В<sub>4</sub>С–10% TiB<sub>2</sub> имеет высокую твердость HKN 18,5 ГПа и повышенную трещиностойкость  $K_{1c}$  5,3 МПа·м<sup>1/2</sup>.

*The resistance of В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> ceramic materials to hydroabrasive wear in the sea water and the pulp of sea water with sand was studied. For this purpose, the amperage was measured at the chosen potential  $\varphi = +0.6$  V. The best corrosion resistant hot-pressed В<sub>4</sub>С–10% TiB<sub>2</sub> ceramic material has high hardness HKN-18.5 GPa and increased fracture toughness  $K_{1c} = 5.3$  МПа·м<sup>1/2</sup>.*

**Key words:** ceramic material, В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub>, hydroabrasive wear, corrosion resistant, amperage.

*Вивчено стійкість керамічних матеріалів системи В<sub>4</sub>С–TiB<sub>2</sub> до гідроабразивного износу в морській воді та пульпі з морської води і піску. З цією метою виміряно щільність струму розчинення при вибраному потенціалі  $\varphi = +0,6$  В. Найбільш корозійностійкий горячепресований керамічний матеріал В<sub>4</sub>С–10% TiB<sub>2</sub> має високу твердість HKN-18,5 ГПа та підвищену тріщиностійкість  $K_{1c} = 5,3$  МПа·м<sup>1/2</sup>.*

**Ключові слова:** керамічний матеріал,  $B_4C-TiB_2$ , гідроабразивний знос, корозійна стійкість, щільність струму розчинення.

#### Литература

1. Wear of boron carbide ceramics by abrasive waterjets / K. A. Schwetz, L. S. Sigl, J. Greim, H. Knoch // *Wear*. – 1995. – **181–183**. – Part1. – P. 148–155.
2. Deng J., Sun J. Sand erosion performance of  $B_4C$  based ceramic nozzles // *Intern. J. of Refractory Metals and Hard Mater.* – 2008. – **26**. – N 3. – P. 128–134.
3. Sun J. Development of new  $B_4C$  composite ceramic nozzle and study on its erosion mechanisms / PhD Dissertation, Shandong University of Science and Technology, People's Republic of China, 2007. – 174 p.
4. Erosion behavior of  $B_4C$  based ceramic nozzles by abrasive air-jet / J. Sun, C. Liu, J. Tian, B. Feng // *Ceramics Intern.* – 2012. – **38**. – N 8. – P. 6599–6605
5. High strength  $B_4C-TiB_2$  composites fabricated by reaction hot-pressing / S. Yamada, K. Hirao, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // *J. Eur. Ceramic Soc.* – 2003. – **23**. – N 7. – P. 1123–1130.
6. Особенности формирования структуры и свойств в системе  $B_4C-TiH_2$  при реакционном спекании под давлением / В. В. Ивженко, О. Н. Кайдаш, Г. Ф. Сарнавская, и др. // *Сверхтвердые матер.* – 2011. – № 1. – С. 46–58.
7. Анодное растворение серебра в растворах NaOH / Н. Н. Лесных, Л. Е. Волкова, Н. М. Туткина, И. К. Маршаков // *Коррозия: материалы, защита*. – 2007. – № 4. – С. 1–6.
8. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. – 4е изд. – М.: Высш. шк. – 1984. – 512 с.

Поступила 07.06.13

УДК 621.923

**А. М. Кузей**, докт. техн. наук; **В. Я. Лебедев**, канд. техн. наук;  
**Н. И. Лащ**; **А. В. Францкевич**

*Государственное научное учреждение «Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси», г. Минск*

#### СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕТАЛЛО- СТЕКЛЯННЫХ СВЯЗКАХ

*Методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновского анализа, исследованы процессы формирования композиционных материалов алмаз – медно-оловянный сплав – стекло. Показано, что прослойки стекла в композиционном материале выполняют функцию армирующего компонента и адгезионного покрытия алмазных зерен.*

**Ключевые слова:** алмазосодержащие композиционные материалы, спекание, микроструктура, контактное взаимодействие

#### Введение

Технологические процессы получения алмазоабразивных композиционных материалов методами порошковой металлургии включают четыре основные операции: смешение компонентов (получение алмазосодержащей шихты); холодное прессование