

УДК 621.762(045)

М.С. СТОРОЖЕНКО, А.П. УМАНСКИЙ, А.А. ТАМАРГАЗИН

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ $TiB_2-SiC$ С ВЫСОКОЙ ИЗНОСО-ЖАРОСТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

*Получена конструкционная керамика на основе диборида титана с различным содержанием карбида кремния: 10%, 20%, 30% (мас). Рассмотрено влияние состава порошковых смесей на процессы структурообразования и свойства композиционных материалов  $TiB_2-SiC$ . Исследована стойкость к высокотемпературному окислению композиционного материала  $TiB_2-20\%SiC$ (мас). Изучены трибологические свойства разрабатываемых материалов в условиях трения скольжения без смазки. Установлено, что в условиях трения при больших скоростях и нагрузках композиты  $TiB_2-SiC$  имеют высокую износостойкость.*

**Ключевые слова:** диборид титана, карбид кремния, композиционный материал, горячее прессование, структура, износостойкость, жаростойкость.

### Введение

Одной из важнейших задач двигателестроения остается повышение КПД двигателя. В соответствии с законами термодинамики для повышения КПД двигателя и его топливной экономичности необходимо увеличивать температуру цикла. Однако применяемые на сегодняшний день материалы работоспособны до температур 700-800°C. Поэтому одним из путей повышения эффективности двигателей является разработка и применение конструкционной керамики. Детали двигателя, изготовленные из керамических материалов, в отличие от обычных, могут работать при температурах 1000°C и выше. Керамические агрегаты не поддаются коррозии, обладают высокой износостойкостью и жаростойкостью.

Работы по разработке и внедрению керамических элементов ведутся в США, России, Японии и ряде других стран. Их опыт показал возможность и перспективность использования керамики в качестве конструкционных материалов, однако в этом направлении существует ряд преград, связанных с низкими прочностными свойствами керамики, а также с проблематичностью изготовления керамических изделий.

Целью настоящей работы является разработка композиционного керамического материала на основе диборида-титана и карбида кремния, который отличается повышенной износостойкостью.

В качестве основного компонента композиционного керамического материала был выбран диборид титана, который обладает высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств: твердостью, износостойкостью, абразивной

способностью [1]. Диборид титана обладает высокой химической стойкостью; заметное окисление кислородом воздуха начинается при температурах 900-1000°C. Однако сам по себе материал достаточно хрупкий ( $\sigma_{изг} = 245$  МПа), потому было разработано ряд материалов на основе диборида титана с металлическими связками, которые повышают пластичность, но при этом ухудшают термостойкость материала [2 – 3]. Повысить прочность материала без ущерба термостойкости можно, создав гетерогенную структуру ведением компонентов другой термостойкой фазы.

Для деталей двигателя, работающих при высоких температурах и подверженных большому износу, перспективным материалом следует считать карбид кремния, для которого характерны достаточно высокие твердость и модуль упругости, низкий коэффициент термического расширения. Для карбида кремния характерно увеличение прочности с повышением температуры, максимум прочности для самосвязанного карбида кремния наблюдается при 600-700°C. SiC – одно из наиболее химически стойких соединений: не разлагается при действии минеральных кислот и их смесей, растворов щелочей. Взаимодействие с кислородом воздуха начинается при температурах выше 800°C, при этом образуется защитная пленка SiO<sub>2</sub>, которая разрушается при 1900°C. Поэтому температуру 1900°C можно считать граничной для использования карбида кремния [4].

### 1. Объекты и методы исследований

Исходными материалами служили порошки диборида титана производства Донецкого завода

химреактивов (ТУ 6-09-03-7-75), а также порошок  $\alpha$ -SiC технической чистоты. Порошковые компоненты SiC и TiB<sub>2</sub> смешивали на протяжении 7 минут в лабораторной планетарной мельнице в среде спирта, используя размольные тела из твердого сплава, соотношение массы смеси и шаров - 1:3. Были приготовлены смеси трех составов с содержанием SiC 10%, 20%, 30% (масс.). Гранулометрический состав полученных смесей исследовали на лазерном анализаторе «SK Lazer Micron Sizer». Средний размер частиц составлял 2.5-2.7 мкм.

Горячее прессование проводили на прессе СПД-125 в пресс-форме из графита МПГ-7. Полная усадка материала происходила при температуре 1800<sup>0</sup>С, давление при этом составляло 25 МПа. Полученные материалы шлифовались и полировались до получения зеркальной поверхности.

Твердость HRA материалов измеряли на твердомере ТК-14-250 при нагрузке 60 кг. Микротвердость определялась вдавливанием алмазной пирамиды Виккерса при нагрузке 100 г на приборе ПМТ-3. Рентгенофазовый анализ полученных композиционных материалов и затем окисленных образцов проводился на дифрактометре «ДРОН-3» в медном излучении. Разработанные композиционные материалы исследовались методами электронной растровой микроскопии на микроскопе Camebax SX-50.

Окисление проводили на дериватографе ОД-103 на воздухе. При этом использовались порошки композиционного материала гранулометрического состава -100 +40 мкм.

Триботехнические испытания проводили в условиях трения скольжения без смазки на машине трения МТ-68.

## 2. Результаты исследований

По данным рентгенофазового анализа в полученных композиционных материалах TiB<sub>2</sub>-SiC присутствует 3 фазы: TiB<sub>2</sub>, SiC, а также SiO<sub>2</sub>. По данным МРСА микроструктура материала представляет собой фазу серого цвета с микротвердостью 34 ГПа, которая соответствует микротвердости диборида титана [1], а также включения неправильной формы темно-серого цвета – карбид кремния (рис. 1). По границам карбида кремния выявлено оксидную пленку SiO<sub>2</sub>, которая, с одной стороны, является диффузионным барьером для химического взаимодействия между TiB<sub>2</sub> и SiC, а с другой стороны способствует усадке в процессе горячего прессования: полная усадка разработанных композиционных материалов происходила при 1800<sup>0</sup>С, тогда как горячее прессование чистого диборида титана происходит при температуре 2100<sup>0</sup>С.

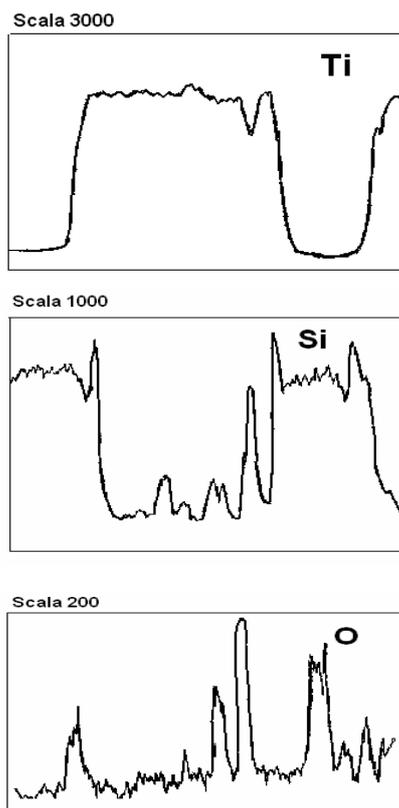
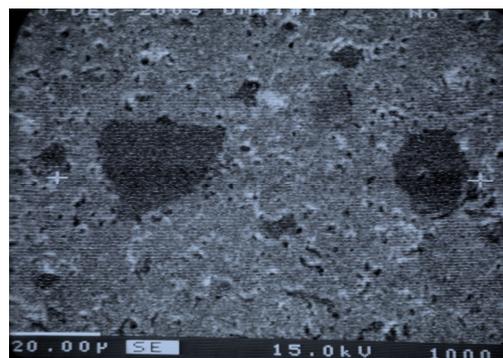


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала TiB<sub>2</sub>-20%SiC

Микроструктура композиционных материалов с различным содержанием SiC подобна. Отличие состоит в размере консолидаций карбида кремния: с увеличением содержания SiC в материале увеличивается размер карбидокремниевой фазы (рис. 2). При содержании карбида кремния в материале в количестве 10%, в структуре наблюдаются единичные включения темно-серой фазы размером до 20 мкм. При увеличении содержания SiC в материале до 20%, максимальный размер карбидокремниевой фазы достигает 25-30 мкм, а также увеличивается содержание более мелких карбидокремниевых зерен, которые расположены достаточно равномерно. Структура материала, содержащего 30% SiC, характеризуется большими размерами консолидаций карбида кремния – до 40 – 60 микрон, количество мелкозернистого SiC незначительно.

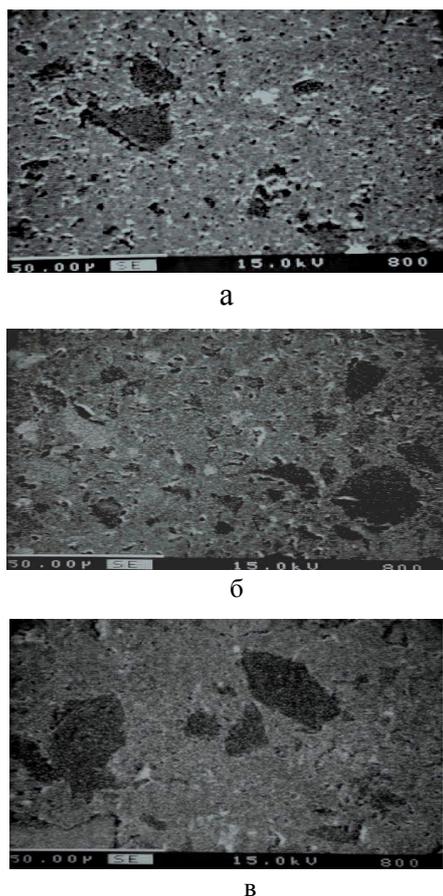


Рис. 2. Структура композиционного материала  $TiB_2-SiC$ : а –  $TiB_2-10\%SiC$ ; б –  $TiB_2-20\%SiC$ ; в –  $TiB_2-30\%SiC$

Таким образом, композиционный материал  $TiB_2-20\%SiC$  характеризуется наиболее равномерным распределением фаз.

Твердость разработанных керамических материалов уменьшается при увеличении содержания карбида кремния и составляет (88-92) HRA.

С целью определения возможности применения разработанных композиционных материалов в условиях высоких температур исследовали стойкость к высокотемпературному окислению материала  $TiB_2-20\%SiC$ . На дериватограмме окисления порошкового композиционного материала кривая дифференциального термического анализа (ДТА) имеет 2 пика. Первый из них соответствует температуре  $560^{\circ}C$ . Рентгенофазовый анализ порошка композиционного материала  $TiB_2-20\%SiC$ , выдержанного 2 часа при температуре  $560^{\circ}C$ , обнаружил в его составе оксид бора  $B_2O_3$ . Второй пик на ДТА кривой фиксируется при  $820^{\circ}C$ . Рентгенофазовым анализом образцов, выдержанных 2 часа при температуре  $820^{\circ}C$ , установлено, что окалина содержит оксиды  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$  и рутил  $TiO_2$ . Очевидно, что указанные оксиды связываются в плотную стекловидную пленку, которая препятствует дальнейшему окислению материала.

Триботехнические испытания показали, что в условиях трения скольжения в паре со сталью 65Г композиционные материалы имеют высокие значения износостойкости (рис. 3).

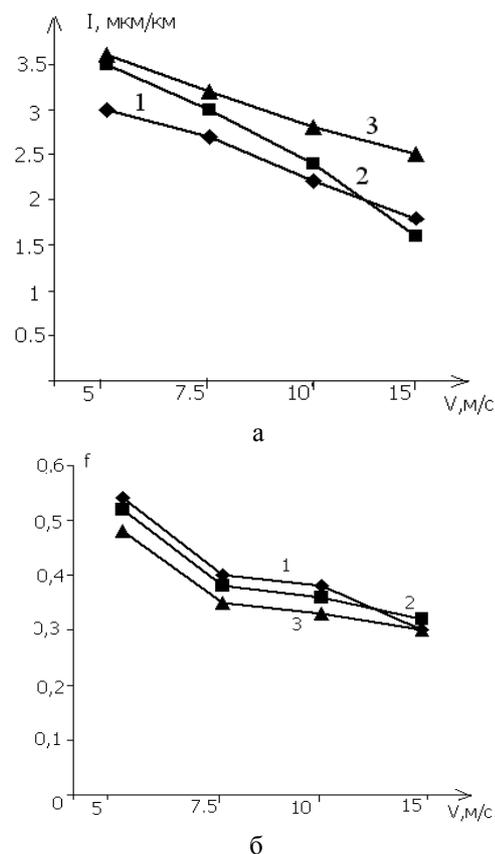


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от скорости при  $P=16$  МПа: 1 –  $TiB_2-10\%SiC$ ; 2 –  $TiB_2-20\%SiC$ ; 3 –  $TiB_2-30\%SiC$

При увеличении скорости интенсивность изнашивания и коэффициент трения уменьшаются. При скорости 15 м/с наименьший износ среди разработанных материалов имеет керамика  $TiB_2-20\%SiC$ . Снижение интенсивности износа и коэффициента трения при высоких скоростях скольжения связано с образованием окиси  $Fe_2O_3$ , которая образуется в процессе трибоокисления стали и частично переносится на поверхность  $TiB_2-SiC$ . В ранее проведенных исследованиях было установлено, что  $Fe_2O_3$  может являться смазкой, которая предохраняет поверхности трения от повреждения [5]. В частности было доказано, что уменьшение износа в этом случае может происходить не только потому, что пленка является смазкой, но и потому, что образующаяся хрупкая пленка  $Fe_2O_3$ , разрушаясь при скольжении, блокирует разрушение в тонком поверхностном слое. Таким образом, разработанные материалы целесообразно применять в паре со сталью в условиях трения скольжения без смазки при больших нагрузках и скоростях.

## Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что материал  $TiB_2-SiC$  имеет двухфазную структуру, состоящую из матрицы диборида титана, упрочненную зернами  $SiC$ .

При увеличении содержания карбида кремния в шихте возрастает размер зерен  $SiC$  композиционном материале  $TiB_2-SiC$ . Твердость HRA при этом уменьшается.

Процесс окисления композиционного материала  $TiB_2-20\%SiC$  характеризуется образованием на поверхности материала оксидной пленки, которая состоит из оксидов  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  и защищает материал от дальнейшего окисления.

Материалы  $TiB_2-SiC$  имеют высокую износостойкость при высоких нагрузках и скоростях за счет формирования на их поверхности пленки  $Fe_2O_3$ , которая образуется в процессе трибоокисления стального контртела.

## Литература

1. Самсонов Г.В. Бор, его соединения и сплавы / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач, М.Г. Валяшко. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – 590 с.
2. Композиционный материал на основе диборида титана с фероникелевой связкой / А.Д. Панасюк, А.П. Уманский, В.П. Смирнов, Л.П. Исаева // Спекание и горячее прессование материалов на основе тугоплавких соединений – К.: Инс-тут проблем материаловедения АН УССР, 1986 – С.75-82.
3. Пат. 25933 Україна, МПК (2006) C22C 29/00. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану-хрому / О.П. Уманський, А.Д. Панасюк, В.П. Коновал и др. – № 2007 04682; заяв. 27.04.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13.
4. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы / Г.Г. Гнесин – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
5. Крагельский И.В. Трение и износ в машинах / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1962. – 384 с.

Поступила в редакцию 12.04.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Д. Панасюк, Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев, Украина.

## НОВІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ СИСТЕМИ $TiB_2-SiC$ З ВИСОКИМ РІВНЕМ ЖАРО-ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЛЯ ДВИГУНОБУДУВАННЯ

*М.С. Стороженко, О.П. Уманський, О.А. Тамаргазін*

Отримано конструкційну кераміку на основі дибориду титану з різним вмістом карбиду кремнію: 10%, 20%, 30% (мас). Досліджено вплив кількості  $SiC$  на процеси структуроутворення та властивості композиційних матеріалів  $TiB_2-SiC$ . Встановлено, що від кількості карбиду кремнію в вихідній шихті залежить розмір консолідацій  $SiC$  в композиційному матеріалі. Досліджено стійкість матеріалу  $TiB_2-20\%SiC$  до високо-температурного окислення на повітрі. Встановлені триботехнічні характеристики розроблених матеріалів в умовах тертя ковзання без мастила.

**Ключові слова:** диборид титану, карбід кремнію, композиційний матеріал, гаряче пресування, структура, зносостійкість, жаростійкість.

## NEW COMPOSITE MATERIALS $TiB_2-SiC$ WITH HIGH LEVEL OF HIGH-TEMPERATURE STRENGTH AND WEAR-RESISTENCE FOR PROPULSION ENGINEERING

*M.S. Storozhenko A.P. Umansky, A.A. Tamargasin*

Construction ceramics on the base of double titanium boride with different content silicone carbide have been obtained. The influence of the composition of powder mixtures on the processes of structure formation and on the properties of composite  $TiB_2-SiC$  materials is studied. The resistance to high-temperature oxidization of composite material  $TiB_2-20\%SiC$  was researched. In this study the tribotechnical characteristics of developed materials were investigated. It is noted, that the composite materials  $TiB_2-SiC$  have high wear-resistance.

**Keywords:** titanium boride, silicone carbide, composite material, hot pressing, structure, wear-resistance.

**Стороженко Марина Сергеевна** – аспирант кафедри технологій аеропортів Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Уманський Александр Павлович** – д-р техн. наук, професор кафедри технологій аеропортів Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, kermet@voliacable.com.

**Тамаргазін Александр Анатольевич** – д-р техн. наук, завідує кафедрою технологій аеропортів Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна.