

DOI: 10.18721/JEST.240108
УДК 669.046:536.45

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ И ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИБОРИДА ТИТАНА

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость диборида титана при хранении и нагревании в воздушной среде. Диборид титана синтезирован плазменным и магниетермическим способами и имеет удельную поверхность, м²/кг: TiB₂ (1) – 43000, TiB₂ (2) – 38000, TiB₂ (3) – 2600. Установлено, что при хранении на воздухе в течение первых 24 часов диборид титана активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB₂ (1) достигает $11,06 \cdot 10^{-7}$, TiB₂ (2) – $8,15 \cdot 10^{-7}$, TiB₂ (3) – $31,5 \cdot 10^{-7}$ кг O₂/м². Для расчета окисленности получены аналитические зависимости. При нагревании на воздухе нанокристаллы диборида титана окисляются в интервале температур $(623–673) \pm 15$ К, микрокристаллы – при температуре 688 ± 5 К и выше. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются соответственно в интервалах температур $(550–870) \pm 12$ К и $(670–790) \pm 17$ К.

ДИБОРИД ТИТАНА; НАНОКРИСТАЛЛЫ; МИКРОКРИСТАЛЛЫ; ОКИСЛЕННОСТЬ; ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

Ссылка при цитировании:

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова. Исследование окисленности и термоокислительной устойчивости нанокристаллического диборида титана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 87–94. DOI: 10.18721/JEST.240108.

G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova

Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

STUDY OF OXIDATION AND THERMOOXIDATIVE STABILITY OF NANOCRYSTALLINE TITANIUM DIBORIDE

Oxidation and thermal-oxidative stability of titanium diboride are studied during storage and heating in air. Titanium diboride has been synthesized by plasma and magnesium-thermal methods and has the following specific surface areas, m²/kg: 43000 for TiB₂ (1), 38000 for TiB₂ (2), 2600 for TiB₂ (3). It was found that titanium diboride actively adsorbs oxygen and moisture when stored in air for the first 24 hours: the oxidation reaches $11,06 \cdot 10^{-7}$ for TiB₂ (1), $8,15 \cdot 10^{-7}$ for TiB₂ (2), $31,5 \cdot 10^{-7}$ kg O₂/m² for TiB₂ (3). Analytical dependencies were obtained for the calculation of oxidation. When heated in air, titanium diboride nanocrystals are oxidized in the temperature range $(623–673) \pm 15$ K, micro-

crystals at a temperature of 688 ± 5 K and higher. The pyrolytic boron and carbon accompanying the diboride are oxidized in the temperature ranges $(550-870) \pm 12$ K and $(670-790) \pm 17$ K.

TITANIUM DIBORIDE; NANOCRYSTALS; MICROCRYSTALS; OXIDATION; THERMOOXIDATIVE STABILITY.

Citation:

G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova. Study of the oxidation and thermooxidative stability of nanocrystalline titanium diboride, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 87–94, DOI: 10.18721/JEST.240108.

Введение

Наноматериалы, как правило, имеют следующие особенности кристаллического строения и энергетического состояния [1–4], которые обуславливают их высокую химическую активность:

1) малый размер зерен определяет большую развитость и протяженность межзеренных границ: при размере зерна от 100 до 10 нм границы содержат от 10 до 50 % атомов нанокристаллического твердого тела;

2) зерна в наносостоянии содержат различные атомные дефекты – вакансии, их комплексы, дислокации, количество и распределение которых качественно иное, чем в крупных зернах размером 5–10 мкм и более;

3) исключительно высокую диффузионную подвижность атомов по границам зерен нанокристаллического твердого тела, в 10^5-10^6 раз превосходящую таковую в обычных поликристаллах;

4) возбужденное состояние в нанозернах атомных слоев вблизи их поверхностей, вызывающее сжатие кристаллов и отклонение в них атомов от положения, соответствующего равновесному;

5) постоянное стремление наносистем к релаксации избыточной энергии.

В совокупности это приводит к проявлению наноразмерных эффектов в таких свойствах, как склонность к агрегированию, активное взаимодействие с атмосферными и технологическими газами, повышенная растворимость в жидких средах, диффузионная подвижность в матрицах композиционных материалов, способность к твердофазной коалесценции и спеканию и др. Особенности физико-химических свойств наноматериалов приводит к необходимости проведе-

ния их комплексной аттестации с обязательным определением характеристик, практически значимых для дальнейшего применения, оценки конкурентных преимуществ и реальной стоимости этих материалов. В течение последних 15 лет опубликовано значительное количество работ, в частности [5–8], содержащих результаты исследования особенностей свойств нанопорошков металлов, карбидов, боридов, их композиций. Их анализ в целом подтверждает специфику свойств нанокристаллических веществ и необходимость ее учета при проведении последующих технологических переделов с их участием. Однако для каждого вещества в наносостоянии характерны свои температурно-временные условия проявления размерных эффектов и конкретные уровневые значения. Это позволяет в каждом случае рассматривать полученные результаты как новую информацию, имеющую научно-прикладное значение.

С учетом особенностей свойств нанокристаллических материалов по предложению их потребителей начиная с 2000 года расширен спектр сертификационных характеристик порошковой нанопродукции. К традиционным характеристикам – фазовому и химическому составам, удельной поверхности – добавлены окисленность и температура начала окисления.

Цель и методика исследований

Целями настоящей работы были исследование окисленности и термоокислительной устойчивости диборида титана нано- и микроразмерного уровня дисперсности в воздушной среде и сопоставительный анализ результатов.

Характеристики исследуемых образцов диборида титана

Characteristics of test samples of titanium diboride

Образец порошка диборида титана	Характеристики порошка											
	Фазовый состав	Химический состав, %								Удельная поверхность, м ² /кг	Размерный диапазон частиц, мкм	Окисленность, 10 ⁻⁷ кгО ₂ /м ²
		TiB ₂	B _{своб}	Ti _{своб}	TiO ₂	C	Mg	O ₂	N			
TiB ₂ (1)	TiB ₂	96,32	1,00	1,15	—	—	—	0,61	0,92	43000	0,01-0,06	1,42
TiB ₂ (2)	TiB ₂	93,61	0,42	—	3,84	1,12	—	1,54	1,01	38000	0,02-0,08	4,05
TiB ₂ (3)	TiB ₂	97,24	0,42	—	—	—	0,41	0,82	0,41	2600	<5	31,5

Окисленность определяется количеством, кг, кислорода, приходящегося на 1 м² поверхности порошка. Определение удельной поверхности диборида титана проводилось на анализаторе TRISTAR 3020 и было основано на методе низкотемпературной адсорбции азота.

Температура начала окисления соответствует изменению массы нанопорошка на 1 % при нагревании в воздушной среде. В качестве характеристики термоокислительной устойчивости может быть принят также наиболее вероятный температурный интервал, в котором начинается процесс окисления нанопорошка при нагревании на воздухе. Окисление порошков диборида титана в воздушной среде исследовалось методами термогравиметрии и высокотемпературной рентгенографии, для чего использовались дериватограф Setaram LabSys

Evo и дифрактомер ДРОН-3 с приставкой ГПВТ-1500.

В качестве объектов исследования использовались не контактировавшие с воздухом нанопрошки диборида титана, полученные плазмосинтезом из шихт Ti+V (TiB₂ (1)), TiO₂+V (TiB₂ (2)), а также полученный магнитермическим способом его микропорошок (TiB₂ (3)). Фазовый и химический составы, удельная поверхность, начальная окисленность образцов приведены в таблице.

Определение окисленности

Изменение окисленности образцов диборида титана при контактировании их с воздухом в течение 240 часов отражено на рис. 1. В течение первых двух суток содержание кислорода в образцах контролировалось каждые 4 часа, в последующие сутки — каждые 12 часов.

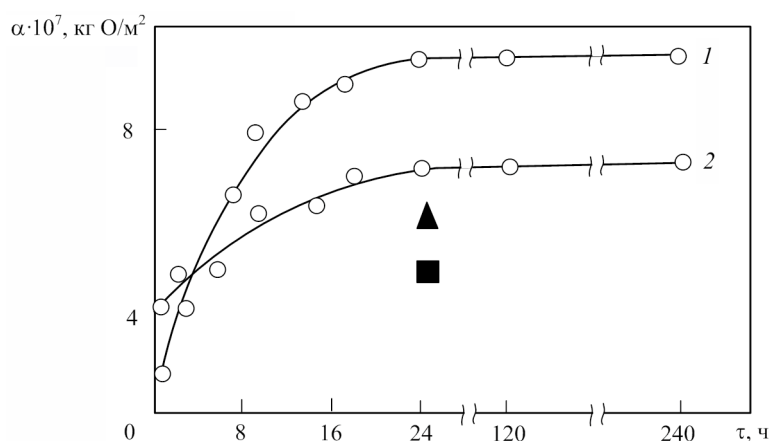


Рис. 1. Изменение окисленности α образцов диборида титана при контактировании их с воздухом: 1 — $(1,42 \text{ ч } 11,06) \pm (0,02 \text{ ч } 0,18)$; 2 — $(4,05 \text{ ч } 8,0) \pm (0,06 \text{ ч } 0,016)$ (приведена также окисленность образцов 1 (▲) и 2 (■), термодесорбированных в вакууме после хранения на воздухе в течение 24 часов)
 Fig. 1. Change in oxidation α of samples of titanium diboride in contact with air (oxidation of samples 1 (▲) and 2 (■), thermodesorbed in vacuum after storage in air for 24 hours)

Анализ полученных результатов позволил выделить четыре научных аспекта, подлежащих обсуждению. Рассмотрим их.

1. Значительный рост окисленности происходит в течение первых 20–24 часов. В последующий период времени окисленность практически не меняется. При этом отмечается увеличение окисленности для TiB_2 в образце 1 приблизительно в 8 раз (с $1,42 \cdot 10^{-7}$ до $11,06 \cdot 10^{-7}$ кг O_2/m^2), в образце 2 – примерно в 2 раза (с $4,05 \cdot 10^{-7}$ до $8,15 \cdot 10^{-7}$ кг O_2/m^2). Оксиды титана и бора на рентгенограммах образцов не обнаружены. Повышение окисленности, вероятнее всего, связано с адсорбцией кислорода и паров воды. Этот факт подтвержден в целом ряде работ при исследовании высокотемпературных наноразмерных соединений [9–13]. Однако механизм сорбции (физическая адсорбция или хемосорбция) до сих пор не изучен.

Полученные данные позволили определить зависимость величины окисленности диборида титана от продолжительности контактирования его с воздухом. Она описывается для образца 1 уравнением вида $\alpha = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^{-7}$, (1) а для образца 2 – $\alpha = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^{-7}$, (2) где α – окисленность, кг $O_2 \cdot m^{-2}$; τ – продолжительность контактирования TiB_2 с воздухом, ч.

Эти зависимости представлены на рис. 2.

2. Образец 2 TiB_2 более устойчив к воздействию кислорода воздушной атмосферы, что обусловлено адсорбцией им на стадии получения монооксида углерода, обладающего высокой пассивирующей способностью по отношению к высокодисперсным порошкам переходных металлов и их соединениям с углеродом, бором, азотом [14]. Действительно, концентрация CO в газовой фазе для варианта 2 составляет 3,2–5 %, для варианта 1 – 0,8–1,0 % об.

3. Вакуумный отжиг при температуре 973 К для десорбции газов образцов 1 и 2, контактировавших с воздухом, обеспечивает удаление только 40 % кислорода (точки \blacktriangle и \blacksquare на рис. 1). Оставшееся количество кислорода при этих температурных условиях, по-видимому, участвует в поверхностном окислении наночастиц с образованием аморфных оксидных пленок, что подтверждается описанными далее результатами определения температуры начала окисления исследуемых образцов.

4. Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 (соответственно $11,06 \cdot 10^{-7}$, $8 \cdot 10^{-7}$ и $31,5 \cdot 10^{-7}$ кг O_2/m^2 поверхности) подтверждает, что по этой характеристике нанопорошки не только не уступают микропорошку, но и превосходят его.

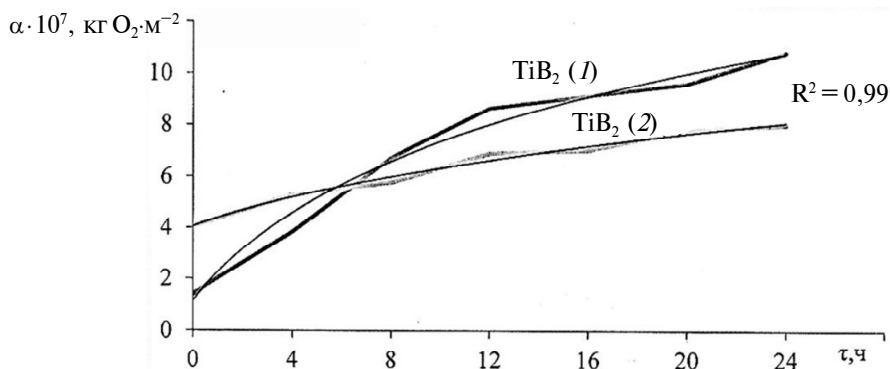


Рис. 2. Зависимости окисленности α образцов диборида титана TiB_2 1 и 2 при контактировании их с воздухом (τ – продолжительность контактирования TiB_2 с воздухом, ч; R^2 – коэффициент детерминации)
 Fig. 2. Graphical dependence of oxidation α of samples of titanium diboride TiB_2 1 and 2 upon contacting them with air (τ – duration of contact of TiB_2 with air, h; R^2 – coefficient of determination)

Определение термоокислительной устойчивости

Процесс окисления при нагревании в воздушной среде обычно исследуют двумя методами — высокотемпературной рентгенографии и термогравиметрии.

В первом случае изучается температурная зависимость интенсивности одного из характеристических пиков исследуемого материала, в связи с чем особых требований по содержанию основной фазы и примесей к объекту исследований не предъявляется. Однако этот метод позволяет констатировать лишь интервал температуры, в котором начинается процесс окисления.

Значительно более точно температура начала окисления может быть определена методом термогравиметрии, но при условии

отсутствия или минимального содержания примесей, окисляющихся в том же температурном интервале, что и основная фаза. Диборид титана, получаемый по вариантам 1 и 2, фактически представляет собой композиции составов, %: $92,55\text{TiB}_2 + 1,05\text{Ti}_{\text{своб}} + 1,05\text{B}_{\text{своб}}$ в образце 1 и $91,25\text{TiB}_2 + 0,83\text{B}_{\text{своб}} + 1,21\text{C}$ в образце 2. При этом пиролитические бор и углерод окисляются в интервалах температур соответственно 550–870 К и 671–790 К, что создает непреодолимые трудности корректного термографирования нанокристаллического TiB_2 (см. рис. 3). Следует ожидать, что температура окисления нанокристаллического TiB_2 может быть на 30–50° ниже, чем у микропорошка TiB_2 [15], окисление которого начинается при температуре 688 ± 5 К.

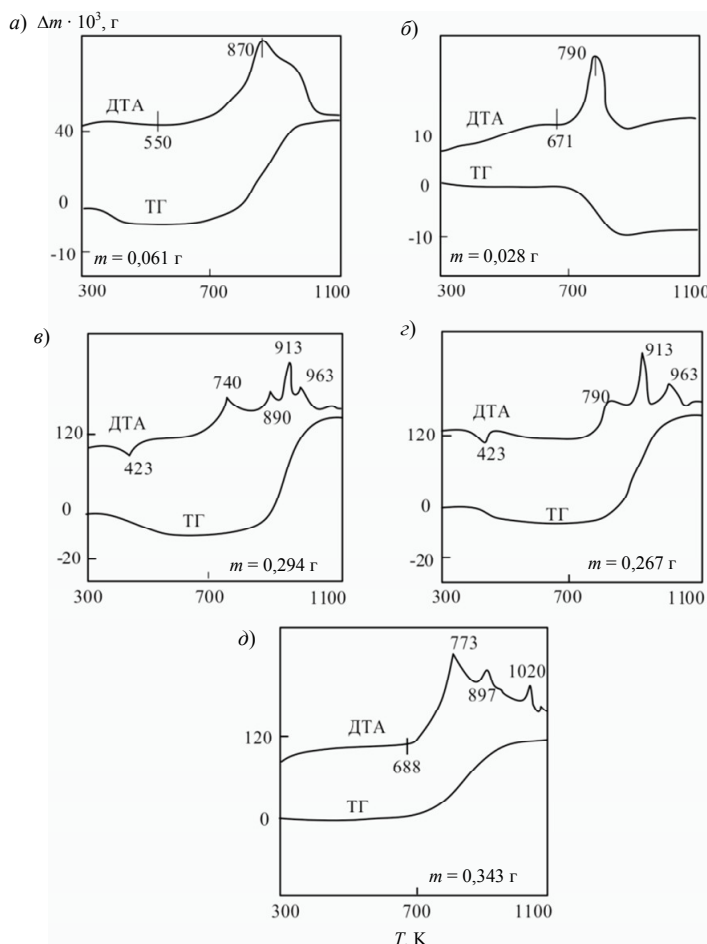


Рис. 3. Дериватограммы нанопорошков пиролитических бора (а), углерода (б), диборидов титана 1 (в), 2 (г) и микропорошков диборида титана (д)

Fig. 3. Derivatograms pyrolytic boron nanopowder (a), carbon (b), titanium diboride 1 (c), 2 (d) and micro-powders of titanium diboride (d)

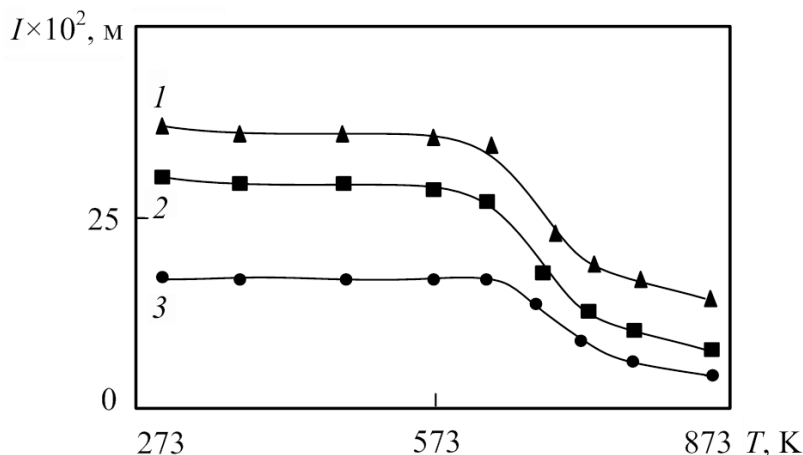


Рис. 4. Рентгеновская термическая характеристика диборида титана (1 – TiB₂ (1); 2 – TiB₂ (2); 3 – TiB₂ микропорошок)
 Fig. 4. X-ray thermal characteristics of titanium diboride (1 – TiB₂ (1); 2 – TiB₂ (2); 3 – TiB₂ micropowder)

Данные о термоокислительной устойчивости нанопорошков TiB₂ 1, 2 и микропорошка TiB₂ (3), полученные высокотемпературной рентгенографией, представлены на рис. 4 в виде зависимости интенсивности характеристического пика TiB₂ (101) от температуры. При нагревании образцов в интервале температур (273–623)±15 К изменение интенсивности пиков не отмечается. При дальнейшем нагревании у образцов 1 и 2 TiB₂ в интервале температур (623–673)±15 К и у образца микропорошка TiB₂ в интервале температур (673–723)±15 К наблюдается значительное снижение интенсивности пиков, продолжающееся и в более высокой температурной области, что свидетельствует о начале и развитии процессов окисления.

В исследуемой области температур на рентгенограммах отсутствуют пики, соответствующие оксидам титана и бора, что позволяет предположить их образование в аморфном состоянии.

Заключение

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость на воздухе нано- и микропорошка диборида титана. Диборид титана при хранении на воздухе в течении первых 24 часов активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB₂ (1), синтезированного по варианту (Ti+B),

изменяется в пределах (1,42–11,06) · 10⁻⁷ кг O₂/м². TiB₂ (2), синтезированного по варианту (TiO₂+B), – в диапазоне (4,05–8,15) · 10⁻⁷ кг O₂/м². Она может быть описана уравнениями:

$$\alpha(1) = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^7;$$

$$\alpha(2) = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^7.$$

Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 (соответственно 11,06 · 10⁻⁷, 8 · 10⁻⁷ и 31,5 · 10⁻⁷ кг O₂/м² поверхности) подтверждает, что по этой характеристике нанокристаллический диборид превосходит более крупный микрокристаллический.

Диборид титана термодесорбирует в вакууме при температуре 973 К не более 40 % поглощенного при хранении кислорода, что подтверждает адсорбционно-диффузионный механизм его взаимодействия с атмосферными газами и возможность окисления наночастиц с формированием аморфных оксидных слоев при нагревании. Нанокристаллы диборида титана при нагревании на воздухе окисляются в интервале температур (623–673)±15 К, что на 66 градусов ниже температуры начала окисления его микрокристаллов, которая составляет 688±5 К. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются соответственно в интервалах температур (550–870)±12 К и (671–790)±17 К.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии. СПб.: Наука, 2007. 186 с.
3. Колмаков А.Г., Баринов С.М., Алымов М.И. Основы технологий и применение наноматериалов. М.: Физматлит, 2012. 208 с.
4. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Угреша», 2007. 125 с.
5. Гуров А.А., Карманов В.И., Порозова С.Е., Шоков В.О. Синтез и свойства нанопорошка диоксида титана для получения функциональных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 1. С. 23–29.
6. Zhao G., Zhang X., Shen Z., Zhang Z. Oxidation of ZrB₂ nanoparticles at high temperature under low oxygen pressure // Journal of the American Ceramic Society. 2014. P. 2360–2363.
7. Golla B.R., Bhandari T., Mukhopadhyay A., Basu V. Titanium diboride // Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications. 2015. P. 316–360.
8. Карпов И.В., Ушаков А.В., Лепешев А.А. Исследование технологических свойств нанопорошка TiN, синтезированного в плазме дугового разряда низкого давления // Технология машиностроения. 2013. № 2. С. 39–42.
9. Лепешев А.А., Ушаков А.В., Карпов И.В. Плазмохимический синтез нанодисперсных порошков и полимерных нанокмполитов. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 310 с.
10. Ноздрин И.В., Руднев В.В., Галевский Г.В. Борид хрома – нанотехнология, свойства, применение: монография. Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 233 с.
11. Цзкан Ilker, Dokumaci Esra, Бьлент Цпау А. Cyclic oxidation behavior of TiB₂ pellets at elevated temperatures // Journal of the Australian Ceramic Society. 2017. Vol. 53. P. 415–420.
12. Ушаков А.В., Лепешев А.А., Карпов И.В., Крушенко Г.Г. Физико-химические свойства порошка TiO₂, полученного в плазмохимическом реакторе низкого давления // Технология металлов. 2012. № 10. С. 27–32.
13. Пойлов В.З., Прямилова Е.Н. Термодинамика окисления боридов циркония и гафния // Журнал неорганической химии. 2016. Т. 61. № 1. С. 59–62.
14. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3 т. / Науч. ред. Г.В. Галевский; Т. 3. Плазмометаллургическое производство карбида кремния для конструкционной керамики. М.: Флинта, Наука, 2007. 210 с.
15. Иванов В.В., Блохина И.А., Кирик С.Д. Изотермическое окисление порошков TiB₂ в воздухе // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4–5. С. 10–15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович — доктор технических наук заведующий кафедрой Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

РУДНЕВА Виктория Владимировна — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: kafcmet@mail.ru

ЕФИМОВА Ксения Александровна — аспирант Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: efimovaksenia@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.07.2017

REFERENCES

- [1] Gusev A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii. M.: Fizmatlit, 2005. 416 s. (rus.)
- [2] Rudskoi A.I. Nanotekhnologii v metallurgii. SPb.: Nauka, 2007. 186 s. (rus.)
- [3] Kolmakov A.G., Barinov S.M., Alymov M.I. Osnovy tekhnologii i primenenie nanomaterialov. M.: Fizmatlit, 2012. 208 s. (rus.)
- [4] Baloian B.M., Kolmakov A.G., Alymov M.I., Krotov A.M. Nanomaterialy. Klassifikatsiia, osobennosti svoistv, primenenie i tekhnologii polucheniia. M.: Mezhdunarodnyi universitet prirody, obshchestva i cheloveka «Dubna», Filial «Ugresha», 2007. 125 s. (rus.)
- [5] Gurov A.A., Karmanov V.I., Porozova S.E., Shokov V.O. Sintez i svoistva nanoporoshka

dioksida titana dlia polucheniia funktsional'nykh materialov. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2014. T. 16. № 1. S. 23–29. (rus.)

[6] **Zhao G., Zhang X., Shen Z., Zhang Z.** Oxidation of ZrB₂ nanoparticles at high temperature under low oxygen pressure. *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. P. 2360–2363. (rus.)

[7] **Golla B.R., Bhandari T., Mukhopadhyay A., Basu B.** Titanium diboride. *Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications*. 2015. P. 316–360.

[8] **Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshev A.A.** Issledovanie tekhnologicheskikh svoistv nanoporoshka TiN, sintezirovannogo v plazme dugovogo razriada nizkogo davleniia. *Tekhnologiya mashinostroeniia*. 2013. № 2. S. 39–42. (rus.)

[9] **Lepeshev A.A., Ushakov A.V., Karpov I.V.** Plazmokhimicheskii sintez nanodispersnykh poroshkov i polimernykh nanokompozitov. Krasnoiarsk: Izd-vo SFU, 2012. 310 s. (rus.)

[10] **Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevskii G.V.** Borid khroma – nanotekhnologiya, svoistva,

primeneniie: monografiia. Saarbriuken (Germaniia): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 233 s.

[11] **Uzkan ilker, Dokumaci Esra, Bylent Cnay A.** Cyclic oxidation behavior of TiB₂ pellets at elevated temperatures. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2017. Vol. 53. P. 415–420.

[12] **Ushakov A.V., Lepeshev A.A., Karpov I.V., Krushenko G.G.** Fiziko-khimicheskie svoistva poroshka TiO₂, poluchennogo v plazmokhimicheskom reaktore nizkogo davleniia. *Tekhnologiya metallov*. 2012. № 10. S. 27–32. (rus.)

[13] **Poilov V.Z., Priamilova E.N.** Termodinamika okisleniia boridov tsirkoniia i gafniia. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 2016. T. 61. № 1. S. 59–62. (rus.)

[14] Nanomaterialy i nanotekhnologii v proizvodstve karbida kremniia: monografiia: v 3 t. / Nauch. red. G.V. Galevskii; T. 3. Plazmometallurgicheskoe proizvodstvo karbida kremniia dlia konstruktsionnoi keramiki. M.: Flinta, Nauka, 2007. 210 s. (rus.)

[15] **Ivanov V.V., Blokhina I.A., Kirik S.D.** Izotermicheskoe okislenie poroshkov TiB₂ v vozdukh. *Ogneupory i tekhnicheskaiia keramika*. 2013. № 4–5. S. 10–15.

AUTHORS

GALEVSKY Gennadii V. – *Siberian state industrial university*

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

RUDNEVA Viktoriia V. – *Siberian state industrial university*

E-mail: kafcmet@mail.ru

EFIMOVA Kseniia A. – *Siberian state industrial university*

E-mail: efimovaksenia@mail.ru

Received: 24.07.2017