

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.06

УДК 621.762

А.А. Сметкин, М.Н. Каченюк, Ю.К. Майорова, Ю.А. ЛожкинаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ КАРБОСИЛИЦИДА ТИТАНА
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Описано исследование кинетики высокотемпературного окисления композиционного материала на основе карбосилицида титана. Образцы композиционного материала на основе карбосилицида титана, содержащего 20 % карбида титана, получены из синтезированных в планетарной мельнице САНД порошков, консолидированных методом плазменно-искрового спекания на установке SPS-100b. Композит состоит преимущественно из ламеллярных зерен карбосилицида титана размером 10–20 мкм и округлых включений карбида титана размером до 3–5 мкм.

Высокотемпературные испытания на воздухе выполнены при температурах 1100–1200 °С в муфельной электропечи СНОЛ 1.6,2.5.1/11. Кинетику окисления исследовали с помощью металлографического, рентгенофазового анализа и анализировали по изменению массы образцов в зависимости от времени выдержки согласно стандартной методике.

Для экспериментальных образцов получены кривые зависимости массы, кинетики окисления и глубины проникновения коррозии от времени. Установлено, что процесс окисления на начальном этапе носит линейный характер, далее зависимость становится степенной. Глубина коррозии материала при температурах 1100 и 1200 °С достигает 266 и 306 мкм соответственно.

Окисленная поверхность состоит из внутреннего и наружного оксидных слоев, которые соответствуют различным фазам – оксида кремния и рутила. Оксидные слои формируются за счет диффузии кислорода внутрь и диффузии титана наружу материала, а атомы кремния окисляются *in situ*. Толщина оксидных слоев увеличивается с ростом температуры окисления. По результатам анализа в образцах после окисления при данных температурах были выявлены фазы рутила TiO₂ и следы SiO₂.

Ключевые слова: МАХ-фаза, композиционный материал, титан, высокотемпературное окисление, глубина проникновения коррозии, жаростойкость, карбосилицид титана, кинетика окисления, кристаллическая фаза, рутил.

A.A. Smetkin, M.N. Kachenyuk, Yu.K. Majorova, Yu.A. Lozhkina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**KINETICS OXIDATION OF COMPOSITE MATERIAL
ON THE BASIS OF TITANIUM SILICON CARBIDE
AT THE HIGH TEMPERATURES**

This article is devoted to investigation of the kinetics of high temperature oxidation of the composite material on the basis of titanium silicon carbide. The samples of composite material based on titanium silicon carbide containing 20% of titanium carbide, obtained from synthesized in a planetary mill

SAND powders consolidated by spark plasma sintering in the SPS-100b. The composite structure consists of Ti_3SiC_2 lamellar size 10-20 μm and rounded inclusions of titanium carbide with a size of 3-5 μm . High temperature testing in air is performed at temperatures of 1100-1200 $^{\circ}C$ in a muffle furnace SNOL of 1.6,2.5.1/11. The kinetics of oxidation was investigated using metallographic, x-ray diffraction and analyzed according to mass changes of the samples from the time of exposure according to the standard method. For experimental samples obtained curves of dependence of mass, oxidation kinetics and penetration depth of corrosion with time. It is established that the oxidation process at the initial stage is linear then the dependence becomes exponential. Depth of corrosion of the material at temperatures of 1100 and 1200 $^{\circ}C$ reaches 266 and 306 μm respectively. The oxidized surface consists of inner and outer oxide layers which correspond to different phases of silica and rutile. Oxide layers formed by oxygen diffusion and inward diffusion of titanium to the outside of the material and the silicon atoms are oxidized in situ. The thickness of the oxide layers increases with oxidation temperature. According to the analysis of the samples after oxidation at these temperatures revealed that the rutile phase of TiO_2 and traces of SiO_2 .

Keywords: MAX-phase, composite material, titan, high-temperature oxidation, corrosion penetration depth, heat resistance, titanium silicon carbide, oxidation kinetics, crystal phase, rutile.

Введение

На протяжении последних десяти лет интенсивно изучается новый класс материалов – поликристаллические наноламинаты, которые представляют собой новый тип твердых тел – обрабатываемые материалы, пригодные для использования при высоких температурах [1–5].

Эти вещества представляют собой тройные соединения, которые отвечают формуле $M_{n+1}AX_n$, где M – переходный металл; A – элемент групп III A или IV A; X – углерод или азот; $n = 1, 2$ или 3 (их называют еще MAX-соединениями) [2].

В данных соединениях сочетаются лучшие свойства металлов и керамики. Как металлы, они электро- и теплопроводны, легко обрабатываются резанием при комнатной температуре, хорошо противостоят распространению трещин, не чувствительны к термическому удару, пластичны при высоких температурах. Как керамика, они имеют низкую плотность, обладают высокими значениями характеристик упругости, стойки к ползучести, имеют высокую жаростойкость, сохраняют свою прочность до температур, превышающих те, при которых используются жаропрочные материалы на основе металлов, например никелевые суперсплавы [2, 3]. Наиболее изученным и перспективным среди соединений данного класса является карбосилицид титана Ti_3SiC_2 [1–6].

Свойства Ti_3SiC_2 были изучены группой ученых под руководством М. Барсума [7]. Было установлено, что карбосилицид титана обладает высокой электро- и теплопроводностью (лучшими, чем у чистого титана) и одним из самых низких коэффициентов трения среди

твердых материалов. Ученые также обнаружили, что вещество обладает высокой жесткостью в сочетании с низкой плотностью и очень большой стойкостью к повреждениям. Более того, вещество сохраняет эти свойства при высоких температурах и проявляет высокую стойкость к окислению и тепловому удару.

В работе [8] была изучена жаростойкость образцов на основе Ti_3SiC_2 в температурном интервале 600–800 °С. По данным работы наилучшей жаростойкостью обладал образец с составом $3Ti + 1,25SiC + 0,75C$, полученный механосинтезом в планетарной мельнице САНД в течение 2 ч с последующим горячим прессованием при $T = 1400$ °С.

В работах [9] и [10] определяли стойкость к окислению на воздухе порошков, пористых компактов и горячепрессованных (ГП) образцов Ti_3SiC_2 при температурах 1000–1200 °С. Лучшую стойкость к окислению на воздухе показали плотные ГП-образцы с добавками 20 об. % $TiSi_2$, для которых заметная прибавка массы наблюдалась лишь при температуре выше 1200 °С. Авторы объяснили это менее развитой поверхностью контакта материала с кислородом воздуха. На поверхности ГП-образцов образуется защитный оксидный слой, который препятствует дальнейшему проникновению кислорода в глубь материала.

Целью работы является изучение высокотемпературного окисления экспериментальных образцов на основе карбосилицида титана в температурном интервале 1100–1200 °С.

Материал и методы исследования

В качестве исходных материалов использованы образцы механосинтезированного и консолидированного карбосилицида титана следующего состава: $Ti + 1,25SiC + 0,75C$. Образцы получены из композиционных порошков фазового состава Ti_3SiC_2/TiC , синтезированных в планетарной мельнице САНД в течение 2 ч с последующим плазменным искровым спеканием в установке SPS-100b при $T = 1370$ °С с выдержкой 5 мин под давлением 30 МПа. Подробно методики получения экспериментальных образцов представлены в работах [11–13].

Образец № 1 испытывали при температуре 1100 °С, образец № 2 – при 1200 °С. Время выдержки обоих образцов составило 30 ч. Рентгенофазовый анализ образцов был выполнен на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu) в λ -Cu-излучении. Структуру экспериментальных об-

разцов анализировали с помощью оптического микроскопа Axiovert-40MAT (Carl Zeiss) при увеличениях 50–1000 крат. Травление шлифов экспериментальных образцов проводили универсальным травителем, состоящим из водного раствора плавиковой и азотной кислот: одна часть HNO_3 , одна часть HF и три части воды.

Высокотемпературное циклическое окисление образцов проводили в лабораторной муфельной электропечи сопротивления СНОЛ 1,6.2,5,1/11. Окисление проводилось согласно ГОСТ 6130–71 «Металлы. Методы определения жаростойкости». Длительность каждого цикла изотермического окисления образцов составляла 1–5 ч, а общая продолжительность соответствовала 30 ч. Образцы, взвешенные на аналитических весах ВЛА 200, помещали в керамические тигли до проведения процесса их высокотемпературного окисления. После каждого изотермического цикла извлекали тигли из печи, охлаждали на воздухе и взвешивали как тигли с образцами, так и окисленные образцы.

Количественную оценку жаростойкости определяли через глубину проникновения коррозии $h_{\text{ув}}$, выраженную в миллиметрах за данный период времени по формуле

$$h_{\text{ув}} = \frac{C \Delta g_{\tau}}{\rho 100},$$

где C – коэффициент соответствия увеличения массы образца уменьшению его массы; Δg_{τ} – увеличение массы образца за заданное время, $\text{мг}/\text{см}^2$; ρ – плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$.

Кинетику окисления считали по формуле

$$q^2 = K_p \tau,$$

где q – величина окисляемости, равная отношению прироста массы образца к его площади; K_p – константа скорости параболического окисления; τ – время.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно рентгенофазовому анализу исходные образцы представляют собой композиционный материал состава $\text{Ti}_3\text{SiC}_2 - 20\% \text{TiC}$. Композит состоит преимущественно из ламеллярных зерен карбосилицида титана размером 10–20 мкм и округлых включений карбида титана размером до 3–5 мкм (рис. 1). Двухфазное состояние обусловлено

скоротечностью процессов консолидации при плазменно-искровом спекании, когда диффузионные процессы практически подавлены и нет условий для формирования новых или промежуточных фаз.

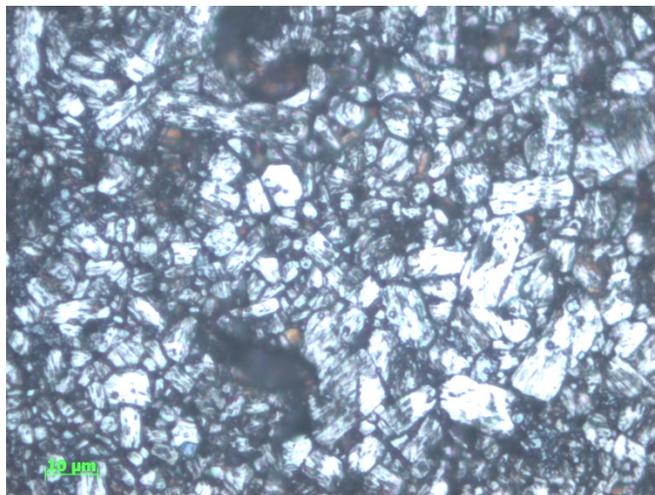
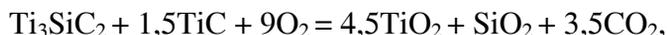


Рис. 1. Микроструктура композиционного образца $Ti_3SiC_2 - 20\% TiC$ после плазменно-искрового спекания

При высокотемпературном окислении в общем случае при температурах 1100 и 1200 °С реакция окисления для композиционного материала Ti_3SiC_2/TiC имеет вид [14]



поэтому рентгенофазовый анализ показал наличие на поверхности обоих образцов фазы TiO_2 в форме рутила.

Металлография окисленных образцов показала в процессе испытаний формирование оксидных слоев, которые на снимках указаны стрелками (рис. 2). На полученных изображениях видно, что окисленная поверхность состоит из различных оксидных слоев – внутреннего и наружного, соответствующих, судя по материалу контраста, различным фазам, а именно SiO_2 и TiO_2 соответственно. Толщина наружного оксидного слоя рутила составляет 45 мкм, а внутреннего – 60 мкм после испытаний при 1100 °С. Толщина внутреннего и наружного слоев для образца после испытаний при 1200 °С составляет 200 и 70 мкм соответственно. Особенностью слоистого строения является наличие

третьего промежуточного слоя толщиной 25–30 мкм, который наилучшим образом виден на рис. 2, б. Оценить его состав с помощью рентгенофазового анализа невозможно ввиду малых размеров слоя.

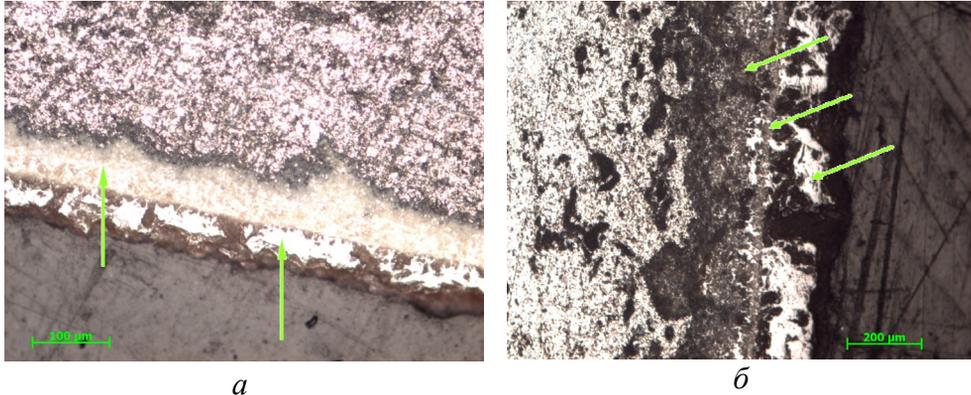


Рис. 2. Микроструктуры окисленных образцов:
а – при 1100 °С; б – при 1200 °С

Обобщая металлографические и рентгенофазовые исследования, можно заключить, что оксидные слои формируются за счет диффузии кислорода внутрь и диффузии титана наружу материала, а атомы кремния окисляются *in situ*. В образце после испытаний при $T = 1200$ °С кроме рутила обнаруживается оксид кремния в виде кварца. Оценка состава по корундовому числу дает результат 64 % TiO_2 + 36 % SiO_2 . Оценка в программе PowderCell дает содержание SiO_2 на уровне следов (0,2 вес. %). Полученные данные хорошо согласуются с результатами работ [15–17].

Полнопрофильный анализ дифрактограммы по методу Ритвельда образца № 2 показал, что размер кристаллитов рутила достаточно крупный (172 нм), а уровень микронапряжений низкий и соответствует $\Delta a/a = 0,017$ %.

С целью выявления характера окисления исследуемых образцов построены графические зависимости по изменению массы образцов от продолжительности испытаний (рис. 3).

Все образцы во время окисления равномерно прибавляли в массе. При этом из анализа рис. 3 очевидно, что угол наклона зависимости, характеризующей скорость окисления, наибольший у образца при испытаниях при $T = 1200$ °С.

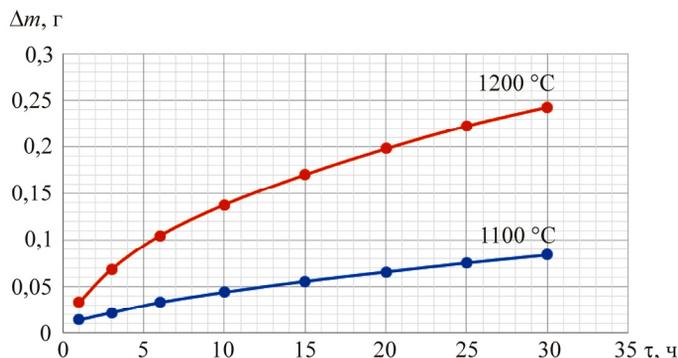


Рис. 3. Зависимости изменения массы образцов без тигля от времени выдержки на воздухе при 1100 и 1200 °С: —●— образец № 1; —●— образец № 2

Далее построены кривые зависимости константы скорости параболического окисления от времени (рис. 4).

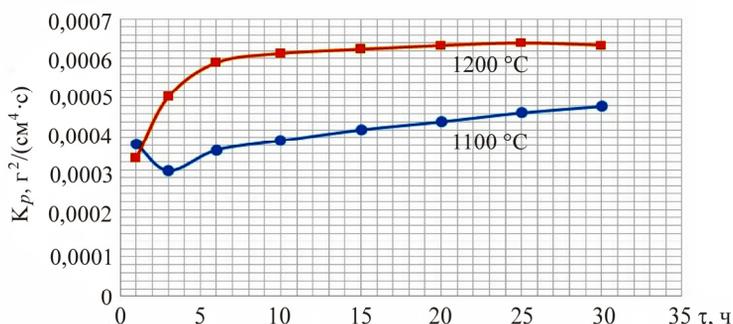


Рис. 4. Зависимости кинетики окисления от времени выдержки на воздухе при 1100 и 1200 °С: —●— образец № 1; —■— образец № 2

Из полученных зависимостей следует, что кинетика окисления подчиняется определенному закону. В первые три часа окисления наблюдается линейная зависимость, характеризующая постоянную скорость окисления на этом этапе и определяющая скорость поверхностной реакции. По мере роста оксидных фаз титана и кремния всё большую роль начинает играть диффузия окислителя через окисел к границе раздела $TiO_2/SiO_2/Ti_3SiC_2$. Замедленная доставка кислорода к границе раздела приводит к изменению характера зависимости константы скорости окисления, она становится параболической.

При определении зависимости глубины проникновения от продолжительности выдержки (рис. 5) учитываемая плотность образцов соответствовала $4,5 \text{ г/см}^3$.

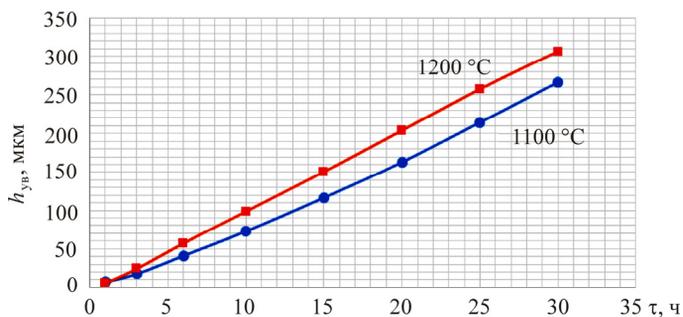


Рис. 5. Зависимости глубины проникновения коррозии от времени выдержки на воздухе при 1100 и 1200 °C: —●— образец № 1; —■— образец № 2

Из графических зависимостей видно, что с увеличением времени окисления глубина проникновения коррозии увеличивается: после окисления при 1100 °C для образца № 1 она составила 266 мкм, при 1200 °C для образца № 2 – 306 мкм. Полученные данные хорошо согласуются с металлографическим анализом поперечных сечений окисленных при различных температурах образцов.

Заключение

При высокотемпературном окислении композиционного материала $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{TiC}$ на воздухе при температурах 1100 и 1200 °C формируется оксид титана TiO_2 в форме рутила со следами SiO_2 . При 1200 °C доля SiO_2 составляет 0,2 %.

Процесс окисления на начальном этапе носит линейный характер, когда формируются оксидные фазы. Далее кинетика окисления имеет параболический вид. Глубина коррозии материала при температурах 1100 и 1200 °C достигает 266 и 306 мкм соответственно. Окисленная поверхность состоит из внутреннего и наружного оксидных слоев, которые соответствуют различным фазам – оксида кремния и рутила. Толщина оксидных слоев увеличивается с ростом температуры окисления.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации базовой части государственного задания № 11.8353.2017/БЧ.

Список литературы

1. Надуткин А.В. Исследование свойств материалов на основе Ti_3SiC_2 // Ежегодник Ин-та химии Коми НЦ УрО РАН: 2006. – Сыктывкар, 2007. – С. 74–77.
2. Медведева Н.И., Еняшин А.Н., Ивановский А.Л. Моделирование электронного строения, химической связи и свойств тройного силикокарбида Ti_3SiC_2 // Журнал структурной химии. – 2011. – Т. 52, № 4. – С. 806–822.
3. Родионов И.В., Анников В.В. Исследование и разработка металлоксидных биосовместимых покрытий для медицинского применения // Новые технологии создания и применения биокерамики в восстановительной медицине: материалы международного науч.-практ. конф., 4–7 октября 2010 г. – Томск, 2010. – С. 137–143.
4. Каблов Е.Н. Перспективные материалы для двигателей нового поколения // Новые материалы и технологические процессы для перспективных ГТД: симпозиум, 12–15 апреля 2004 г. – М., 2004. – С. 2–3.
5. Фирстов С.А., Печковский Э.П., Горбань В.Ф. Прочность и пластичность спеченных материалов на основе карбосилицида титана Ti_3SiC_2 // Успехи физ. мет. – 2006. – Т. 7. – С. 243–281.
6. Barsoum M. The $M_{n+1}AX_n$ phases: a new class of solids // Prog. Solid. St. Chem. – 2000. – № 28. – P. 201–281.
7. Barsoum M.W., EL-Raghy T. Processing and mechanical properties of Ti_3SiC_2 : 1. Reaction path and microstructure evolution // J. American Ceramics Society. – 1999. – № 82. – P. 2849–2854.
8. Сметкин А.А., Майорова Ю.К., Ложкина Ю.А. Процессы окисления композиционного материала на основе карбосилицида титана // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международ. науч.-практ. конф. 4–10 апреля 2016 г. – Омск, 2016. – С. 210–214.
9. Керамические материалы на основе Ti_3SiC_2 / А.В. Надуткин, П.В. Истомин, Ю.И. Рябков, Б.А. Голдин // Керамика и композиционные материалы: докл. VI Всерос. науч. конф., 25–28 июня 2007 г. – Сыктывкар, 2007. – С. 49–52.
10. Надуткин А.В., Истомин П.В., Рябков Ю.И. Окисление на воздухе материалов на основе Ti_3SiC_2 // Керамика и композиционные материалы: докл. VI Всерос. науч. конф., 25–28 июня 2007 г. – Сыктывкар, 2007. – С. 53–56.
11. Анциферов В.Н., Каченюк М.Н., Сметкин А.А. Закономерности уплотнения и фазообразования в системе Ti–SiC–C при плазменно-искровом спекании // Новые огнеупоры. – 2015. – № 4. – С. 16–19.
12. Каченюк М.Н. Структура и физико-механические характеристики композиционных материалов на основе Ti_3SiC_2 // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – № 4. – С. 89–95.
13. Способ получения композиционного материала на основе карбосилицида титана: пат. 237216706 Рос. Федерация: МПК B22F3/14, C22C1/05, C22C29/00 / Анциферов В.Н., Сметкин А.А., Каченюк М.Н. – Заявл. 06.11.2007; опубл. 10.11.2009.

14. Barsoum M.W. MAX phases: Properties of machinable ternary carbides and nitrides. – Weinheim: John Wiley & Sons, 2013. – 437 p.
15. Mapping of elemental composition in air-oxidized Ti_3SiC_2 / W.K. Pang, I.M. Low, K.E. Prince, A.J. Atanacio // J. of the Australian Ceramic Society. – 2008. – Vol. 44[2]. – P. 52–55.
16. Li S., Cheng L., Zhang L. Oxidation behavior of Ti_3SiC_2 at high temperature in air // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 341, № 1–2. – P. 112–120.
17. Lee D.B., Park S.W. Oxidation of Ti_3SiC_2 between 900 and 1200 °C in Air // Oxid. Met. – 2007. – Vol. 67, № 1. – P. 51–66.

References

1. Nadutkin A.V. Issledovanie svoystv materialov na osnove Ti_3SiC_2 [Research of properties of materials on the basis of Ti_3SiC_2]. *Ezhegodnik Instituta khimii Komi Natsional'nogo Tsentra Ural'skogo Otdeleniia Rossiiskoi Akademii nauk*, 2006. Syktyvkar, 2007, 74–77 pp.
2. Medvedeva N.I., Eniashin A.N., Ivanovskii A.L. Modelirovanie elektronnoogo stroeniia, khimicheskoi svyazi i svoystv troinogo silikokarbida Ti_3SiC_2 [Modeling of an electronic structure, chemical bond and properties of a threefold silikokarbid Ti_3SiC_2]. *Zhurnal strukturnoi khimii*, 2011, vol. 52, no. 4, 806–822 pp.
3. Rodionov I.V., Annikov V.V. Issledovanie i razrabotka metalloksidnykh biosovmestimykh pokrytii dlia meditsinskogo primeneniia [Research and development the metalloksidnykh of biocompatible coverings for medical application]. *Novye tekhnologii sozdaniia i primeneniia biokeramiki v vosstanovitel'noi meditsine: materialy mezhdunarodnoi nauchn-prakticheskoi konferentsii, 4–7 oktiabria 2010*. Tomsk, 2010, 137–143 pp.
4. Kablov E.N. Perspektivnye materialy dlia dvigatelei novogo pokoleniia [Perspective materials for engines of new generation]. *Novye materialy i tekhnologicheskie protsessy dlia perspektivnykh gazoturbinykh dvigatelei: simpozium, 12–15 apreliia 2004*. Moscow, 2004, 2–3 pp.
5. Firstov S.A., Pechkovskii E.P., Gorban' V.F. Prochnost' i plastichnost' spechenykh materialov na osnove karbosilitsida titana Ti_3SiC_2 [Durability and plasticity of sintered materials on the basis of a karbosilitsid of the titan of Ti_3SiC_2]. *Uspekhi fiziki metallov*, 2006, vol. 7, 243–281 pp.
6. Barsoum M. The $Mn+1AX_n$ phases: a new class of solids. *Prog. Solid. St. Chem.*, 2000, no. 28, 201–281 pp.
7. Barsoum M.W., EL-Raghy T. Processing and mechanical properties of Ti_3SiC_2 :1. Reaction path and microstructure evolution. *Journal American Ceramics Society*, 1999, no. 82, 2849–2854 pp.
8. Smetkin A.A., Maiorova Iu.K., Lozhkina Iu.A. Protsessy okisleniia kompozitsionnogo materiala na osnove karbosilitsida titana [Processes of oxidation of composite material on the basis of a karbosilitsid of the titan]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniia: materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 4–10 apreliia 2016*. Omsk, 2016, 210–214 pp.
9. Nadutkin A.V., Istomin P.V., Riabkov Iu.I., Goldin B.A. Keramicheskie materialy na osnove Ti_3SiC_2 [Ceramic materials on the basis of Ti_3SiC_2]. *Keramika i kompozitsion-*

nye materialy: doklady VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, 25–28 iyunia 2007. Syktyvkar, 2007, 49–52 pp.

10. Nadutkin A.V., Istomin P.V., Riabkov Iu.I. Okislenie na vozdukh materialov na osnove Ti_3SiC_2 [Oxidation on air of materials on the basis of Ti_3SiC_2]. *Keramika i kompozitsionnye materialy: doklady VI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, 25–28 iyunia 2007*. Syktyvkar, 2007, 53–56 pp.

11. Antsiferov V.N., Kacheniuk M.N., Smetkin A.A. Zakonomernosti uplotneniia i fazoobrazovaniia v sisteme Ti–SiC–C pri plazmenno-iskrovom spekanii [Regularities of consolidation and fazoobrazovaniye in the Ti–SiC–C system at plasma and spark agglomeration]. *Novye ognepory*, 2015, no. 4, 16–19 pp.

12. Kacheniuk M.N. Struktura i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki kompozitsionnykh materialov na osnove Ti_3SiC_2 [Structure and physicomachanical characteristics of composite materials on the basis of Ti_3SiC_2]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2006, no. 4, 89–95 pp.

13. Antsiferov V.N., Smetkin A.A., Kacheniuk M.N. Sposob polucheniia kompozitsionnogo materiala na osnove karbosititsida titana [Way of receiving composite material on the basis of a karbosititsid of the titan]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 237216706 (2009).

14. Barsoum M.W. MAX phases: Properties of machinable ternary carbides and nitrides. *Weinheim: John Wiley & Sons*, 2013, 437 p.

15. Mapping of elemental composition in air-oxidized Ti_3SiC_2 / W.K. Pang, I.M. Low, K.E. Prince, A.J. Atanacio. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2008, vol. 44[2], 52–55 pp.

16. Li S., Cheng L., Zhang L. Oxidation behavior of Ti_3SiC_2 at high temperature in air. *Materials Science and Engineering: A.*, 2003, vol. 341, no. 1–2, 112–120 pp.

17. Lee D.B., Park S.W. Oxidation of Ti_3SiC_2 between 900 and 1200 °C in Air. *Oxid. Met.*, 2007, vol. 67, no. 1, 51–66 pp.

Получено 3.04.2017

Об авторах

Сметкин Андрей Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

Каченюк Максим Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: maxh@pm.pstu.ac.ru.

Майорова Юлия Константиновна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: july.majorova2014@yandex.ru.

Ложкина Юлия Анатольевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: yulya.lojkina@yandex.ru.

About the authors

Andrei A. Smetkin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

Maksim N. Kachenyuk (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: maxx@pm.pstu.ac.ru.

Yuliya K. Majorova (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: july.majorova2014@yandex.ru.

Yuliya A. Lozhkina (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: yulya.lojkina@yandex.ru.