

Таблица 1 – Характер изменения расчетных величин по длине оболочки

$\alpha$	$W \cdot 10^3$	$U \cdot 10^6$	$M_1$	$M_2$	$N_1$	$N_2$
0	0,0	0,0	-9,71608	-4,17511	-2,16607	-0,99421
0,1	-0,05403	-0,87381	-3,56012	-1,80509	-1,07511	-2,58409
0,2	-0,16721	0,06788	0,07746	-0,30733	-0,35142	-6,17013
0,3	-0,26960	2,62508	2,15907	0,63612	-0,63503	-10,11210
0,4	-0,34052	5,70209	3,28106	1,24514	-1,78410	-13,10121
0,5	-0,36473	8,34110	3,53810	1,58013	-3,17805	-14,11012

Результаты исследования НДС оболочки при нагружении показывают, что возникающие в трубопроводе пластические деформации локализованы в относительно узких зонах. Отметим, что разрушение трубопровода при нагружении определяется главным образом накоплением повреждений.

#### Список литературы

- 1 Мубаракوف, Я. Н. Сейсмостойкость подземных сооружений типа оболочек / Я. Н. Мубаракوف. – Ташкент : Фан. – 1987. – 190 с.
- 2 Гехман, А. С. Расчет, конструирование и эксплуатация трубопроводов в сейсмических районах / А. С. Гехман, Х. Х. Зайнегдинов. – М. : Стройиздат. – 1988. – 184 с.
- 3 Султанов, К. С. Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений / К. С. Султанов. – Ташкент : Фан. – 2016. – 392 с.
- 4 Соколов, В. Г. Колебания, статическая и динамическая устойчивость трубопроводов большого диаметра : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Соколов. – СПб., 2011. – 36 с.
- 5 Селезнев, В. Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В. Е. Селезнев, В. В. Алешин, С. Н. Прялов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
- 6 Calvetti, F. Experimental and Numerical Analysis of Soil-Pipe Interaction / F. Calvetti, C. di Prisco, R. Nova // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2004. – № 130. – P. 1292–1299. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1292\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1292)) (date of access: 05.09.2025).
- 7 Ильюшин, А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Логос, 2004. – 388 с.
- 8 Москвитин, В. В. Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : URSS, 2019. – 344 с.
- 9 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.
- 10 Abdusattarov, A. Deformation and damage capacity of thin-walled rods and tubular conduits under alternating loading / A. Abdusattarov // Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering : International Scientific Conference, E3S Web of Conferences / ed. by D. Bazarov and N. Vatin (EDP Sciences Publishing, Les Ulis Cedex A, France). – 2023. – Vol. 401. – P. 03033–03052.

УДК 666.762+66.094.3+544.47

## ОКИСЛЕНИЕ И КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УВТК НА ОСНОВЕ $(Me^{4+})B_2-SiC$ В СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ

*А. Н. АСТАПОВ*

*Московский авиационный институт, Российская Федерация*

*Б. Е. ЖЕСТКОВ*

*Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Российская Федерация*

*В. А. ПОГОДИН*

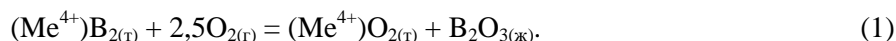
*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Для оценки стойкости к окислению и каталитической активности ультравысокотемпературных керамик (УВТК) на основе системы  $(Me^{4+})B_2-SiC$  ( $Me^{4+} = Hf$  и/или  $Zr$ ) проводили газодинамические стендовые испытания. Моделировали процессы термохимического взаимодействия образцов со скоростным высокоэнтальпийным потоком воздушной плазмы для условий полета перспективного возвращаемого летательного аппарата в атмосфере Земли на высоте 60–80 км. Испытания выполняли на тепловом стенде ФАУ «ЦАГИ» (г. Жуковский), оснащенном индукционным плазмотроном [1]. При проведении огневых экспериментов на поверхности УВТК были реализованы два уровня термодинамических температур: высокий ( $T_w = 1750...1800$  °С) и ультравысокий ( $T_w = 2500...2600$  °С).

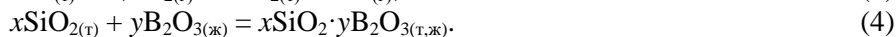
Выполнены структурные исследования образцов после испытаний с привлечением методов рентгеноструктурного фазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии.

Анализ полученных результатов позволил предложить механизм окисления УВТК на основе системы  $(\text{Me}^{4+})\text{B}_2\text{-SiC}$  в условиях взаимодействия со скоростным потоком воздушной плазмы.

Окисление начинается с боридной фазы при температурах  $T_w < 1000$  °С по реакции (1):



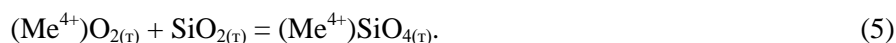
При повышении температуры до  $T_w \sim 1200$  °С образующийся  $\text{B}_2\text{O}_3$  начинает интенсивно испаряться, способствуя взаимодействию боридной фазы с кислородом. Этот процесс будет замедляться в результате пассивного окисления SiC и синтеза *in situ* боросиликатного стекла по реакциям (2)–(4):



Образование стеклофазы замедляет диффузию кислорода в объем УВТК. Это препятствует развитию процесса дальнейшего окисления, а также частично подавляет переход  $\text{B}_2\text{O}_3$  в газовую фазу за счет уменьшения его активности в  $\text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ . Часть синтезируемого боросиликата сохраняется в объеме пленки, а другая часть переносится на поверхность, обеспечивая формирование сплошного стекловидного слоя с низкой каталитической активностью ( $K_w = 3 \dots 5$  м/с). Основной движущей силой апвеллинга являются объемное расширение в результате окисления SiC и низкая смачиваемость зерен  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$ .

С течением времени происходит растворение катионов  $\text{Me}^{4+}$  в стекле, которое может протекать как по механизму внедрения в промежуточные области аморфной кремнеборокислородной сетки, так и путем замещения катионов  $\text{Si}^{4+}$  в ее тетраэдрах. Образование более термодинамически устойчивой связи  $(\text{Me}^{4+})\text{-O}$  относительно  $\text{Si-O}$  является причиной увеличения высокотемпературной стабильности модифицированного боросиликатного стекла и снижения упругости пара.

Взаимодействие образовавшихся оксидов  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  и  $\text{SiO}_2$  приводит к формированию фазы ортосиликата по реакции (5). При этом имеет место межузельная диффузия катионов  $\text{Si}^{4+}$  из стекла и их растворение в  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  до достижения предела растворимости. Полученный продукт состоит из зерен  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$ , окруженных оболочкой из  $(\text{Me}^{4+})\text{SiO}_4$ , в стеклофазе. Далее диффузия катионов  $\text{Si}^{4+}$  осуществляется уже через слой образовавшегося ортосиликата. Фаза  $(\text{Me}^{4+})\text{SiO}_4$  характеризуется высокой плотностью упаковки атомов в кристаллической решетке, что обуславливает снижение массопереноса реагентов через нее и, как следствие, повышает жаростойкость УВТК:



В результате формирования на поверхности газоплотной оксидной пленки снижается диффузия кислорода в объем УВТК и на границе раздела фаз  $\text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 / (\text{Me}^{4+})\text{B}_2\text{-SiC}$  создается пониженное парциальное давление кислорода, недостаточное для осуществления окисления  $(\text{Me}^{4+})\text{B}_2$ , но обеспечивающее переход к активному окислению SiC по реакции (6):



Таким образом, при температуре  $T_w < 1750 \dots 1800$  °С образуется трехслойная оксидная пленка, представленная поверхностным слоем боросиликатного стекла с отдельно расположенными в нем частицами  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2 / (\text{Me}^{4+})\text{SiO}_4$ , подслоем на основе  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2 / (\text{Me}^{4+})\text{SiO}_4$ , содержащим стеклофазу, и подслоем на основе  $(\text{Me}^{4+})\text{B}_2$ , обедненным по SiC.

Повышение температуры свыше  $T_w > 1750 \dots 1800$  °С в сочетании с воздействием скоростного потока воздушной плазмы приводит к интенсификации процессов испарения и механического уноса боросиликатного стекла с поверхности пленки. В результате происходит оголение пористого каркаса на основе  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$ , что способствует изменению каталитических и излучательных характеристик пленки. Слой  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  играет роль термобарьерного покрытия, что приводит к возникновению значительного градиента температуры по толщине УВТК и, как следствие, к уменьшению интенсивности испарения боросиликата изнутри. Дальнейшее окисление УВТК лимитируется встречной диффузией реагентов через дефекты и каналы в  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  и через стеклофазу, сохранившуюся в толще оксидной пленки.

Образование высококаталитической термобарьерной пленки на основе  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  в условиях взаимодействия с потоком воздушной плазмы приводит к резкому (практически скачкообразному) са-

мопроизвольному (без изменения параметров режима испытаний извне) увеличению температуры лицевой поверхности УВТК вплоть до  $T_w = 2500\text{--}2600$  °С. При этом константа скорости гетерогенной рекомбинации атомов и ионов потока  $K_w$  увеличивается на порядок – от 3–5 до 30–36 м/с. Увеличение каталитической активности поверхности, по-видимому, связано с ионной имплантацией в  $(\text{Me}^{4+})\text{O}_2$  атомарного кислорода и последующими актами рекомбинации с его участием.

Дополнительное введение в УВТК на основе системы  $(\text{Me}^{4+})\text{B}_2\text{--SiC}$  силицидных фаз  $(\text{MoSi}_2, (\text{Me}^{4+})\text{Si}_2)$  увеличивает долю образующегося при окислении боросиликатного стекла. Это может быть оправдано, прежде всего, в тех случаях, когда требуется максимизировать теплоотвод посредством эндотермических процессов плавления и уноса части массы с поверхности (унос расплава, выделение газообразных продуктов).

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352-П в части исследования каталитических свойств УВТК.*

#### Список литературы

1 Methodology of studying high-velocity plasma flow impact on high-temperature materials / A. N. Astapov, B. E. Zhestkov, I. V. Senyuev, V. V. Shtapov // AIP Conference Proceedings. – XLV Academic space conference, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists – pioneers of space exploration. – Moscow, Russia, 30 March – 2 April, 2021. – 2023. – Vol. 2549, № 1. – 210009. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0109458> (date of access: 05.09.2025).

УДК 531.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ МОТОВЕЛОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Н. А. АХРАМЕНКО, М. В. БУЙ, И. И. ПРОНЕВИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В последние годы в Республике Беларусь наблюдается увеличение числа мотовелотранспортных средств. Развитию велосипедного движения способствует «Концепция развития велосипедного движения в Республике Беларусь». В связи с этим исследования в области безопасности и надежности мотовелотранспортных средств являются актуальными.

При движении вело- или мототранспорта со скоростью  $v$  на него действует некоторая сила сопротивления  $\vec{F}$  (далее рассматриваем проекции сил на горизонтальную ось). Она складывается из постоянной составляющей (определяется коэффициентом  $A$ ) и составляющей, пропорциональной скорости движения (определяется коэффициентом  $B$ ), в значительной степени обусловленной аэродинамическим сопротивлением

$$F = -A - Bv. \quad (1)$$

Знак минус в выражении (1) указывает на то, что сила направлена противоположно направлению движения. Используем второй закон Ньютона (в проекции на горизонтальную ось) в виде [1, 2]

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = F, \quad (2)$$

где  $p$  – импульс транспортного средства;  $m$  – масса транспортного средства.

Из выражений (1) и (2) получаем уравнение для скорости  $v$

$$m \frac{dv}{dt} = -A - Bv. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (3) к следующему виду

$$\frac{dv}{dt} + \frac{B}{m}v = -\frac{A}{m}. \quad (4)$$

Получили линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка. Введем обозначения