

УДК 629.7.023.224

С.С. Солнцев<sup>1</sup>, В.С. Денисова<sup>1</sup>, В.А. Розенкова<sup>1</sup>

## **РЕАКЦИОННОЕ ОТВЕРЖДЕНИЕ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ И МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-329-343

*Рассмотрены основы создания и свойства высокотемпературных композиционных покрытий и материалов, полученных путем реакционного отверждения. Возможность получения высокого уровня характеристик композиционных материалов и покрытий объясняется формированием уникальной структуры материала в результате химических реакций окисления компонентов материала кислородом атмосферы и последующего стеклообразования.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного направления 14.2. «Новые технологии получения сверхвысокотемпературных керамических композиционных материалов и покрытий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** покрытие, стекло реакционноотверждаемое, тетраборид кремния, никелевые сплавы, углеродокерамический композиционный материал.

S.S. Solntsev, V.S. Denisova, V.A. Rozenenkova

### **Reaction cure is the new direction in technology of high-temperature composite coatings and materials**

*The principles of development and properties of high-temperature composite materials and coatings, produced by reaction cure are considered. The possibility for production of high level of characteristics of composite materials and coatings is explained by the unique structure of material as the result of chemical oxidation reactions of material's components by atmospheric oxygen and subsequent glass-formation.*

*The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 14.2. «New technologies of receiving very high-temperature ceramic and metal composite materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

*Keywords: coating, reactionary curing glass, silicon tetraboride, nickel alloys, carbon ceramic composite material.*

## Введение

Стратегия развития материалов для авиационно-космической техники предполагает значительное улучшение их свойств и характеристик в результате создания качественно новых химических составов материалов и технологий их получения [2, 3]. К последним относятся, в частности, высокотемпературные реакционноотверждаемые покрытия и материалы. В отличие от жаростойких эмалей, которые широко применяются в авиационной и космической технике, но требуют обжига при температуре на 200–300°C выше, чем их рабочая температура, реакционноотверждаемые покрытия обеспечивают возможность повышения рабочих температур на 100–350°C в зависимости от типа и состава защищаемого материала – никелевый сплав, интерметаллидный материал или углеродокерамический композиционный материал. Важным преимуществом реакционноотверждаемых покрытий является возможность применения их при температурах, равных или выше температуры обжига [4, 5].

Информация о реакционноотверждаемых стекломатериалах и покрытиях на их основе впервые опубликована в работе [5], в которой рассмотрены составы стекол и технология покрытий на их основе для многоразовой плиточной теплозащиты американского космического челнока. Согласно работе [5] реакционноотверждаемые стекла получали путем термической обработки смеси пористого высококремнеземного стекла и борного ангидрида. Для получения на теплозащитных плитках покрытия из указанного стекла к нему добавляли тетраборид кремния. В качестве добавок рассматривались также гексаборид кремния, бор, силициды бора и их смеси.

При создании эрозионностойких покрытий для плиточной теплозащиты орбитального корабля «Буран» реакционноотверждаемые стекла не разрабатывались и не использовались из-за отсутствия в нашей стране в тот период промышленного производства высококачественных пористых высококремнеземных стекол. Специалисты ВИАМ вынуждены были инициировать организацию производства гарнисажных высококремнеземных стекол, разработать технологию и начать изготовление в ВИАМ тетраборида кремния, что позволило затем разработать реакционноотверждаемые покрытия типа ЭВЧ-4 для плиток из супертонкого особо чистого кварцевого волокна [6]. Эти покрытия отличаются достаточно сложной технологией приготовления и нанесения. Однако температура их обжига всего на 20–30°C выше температуры эксплуатации (1250°C). В связи с этим можно констатировать, что реакционноотверждаемые покрытия – это высоко-

температурные покрытия на основе стекла, стеклообразующих компонентов и их соединений типа боридов, силицидов. Температуроустойчивость таких покрытий увеличивается в результате химических реакций окисления и стеклообразования при обжиге покрытия.

Известно, что кремний и бор являются наиболее распространенными стеклообразующими элементами. Стекла образуются при окислении кремния, бора, а также их соединений типа боридов и силицидов. Формирование реакционноотверждаемых покрытий стало возможным именно благодаря окислению бора и кремния при обжиге покрытий. Эффект реакционного отверждения реализован и благодаря частичному окислению тетраборида кремния. Положение частиц тетраборида кремния в слое покрытия оказывает влияние на степень их окисления и на процесс реакционного отверждения при обжиге. Частицы тетраборида кремния, расположенные во внутренних слоях покрытия и на границе с материалом подложки, окисляются меньше, чем на поверхности покрытия и в слоях, прилегающих к ней. Образование боросиликатного стекла при окислении частиц тетраборида кремния на поверхности покрытия препятствует диффузии кислорода из атмосферы к внутренним слоям покрытия и, соответственно, окислению частиц тетраборида кремния в этих слоях.

По научно-техническим литературным данным [7], смесь оксидов бора и кремния в расплавленном состоянии полностью смешивается. В системе  $B_2O_3-SiO_2$  могут выделяться обособленные наноразмерные области  $SiO_2$  и  $B_2O_3$ , которые рассматриваются как микроликвация. Отмечается также возможность полного растворения стабильной фазы  $SiO_2$  в боросиликатном расплаве. Отсюда следует, что структура и свойства реакционноотверждаемых покрытий определяются количеством образующихся при обжиге оксидов бора и кремния. Чем больше оксида бора, тем больше жидкой фазы при обжиге, тем больше легкоплавкого боросиликатного стекла, меньше вязкость, пористость и температура обжига покрытия. С увеличением содержания  $B_2O_3$  в стеклах растет число бороксольных групп  $[BO_3]^-$  за счет уменьшения тетраэдрических  $[BO_4]^-$  структурных образований, что приводит к формированию двухмерной структуры, более простой, чем комплексная трехмерная, что и приводит к уменьшению вязкости. Однако дальнейшее окисление тетраборида кремния, рост содержания диоксида кремния, образование расплава боросиликатного стекла и его взаимодействие с матричным боросиликатным стеклом (92%  $SiO_2-8\% B_2O_3$ ) приводят к росту содержания бора в четверной координации, уменьшению вязкости и росту температуроустойчивости. По научно-техническим литературным данным, увеличение  $B_2O_3$  с 0,5 до 5% (по массе) в системе  $B_2O_3-SiO_2$  приводит к уменьшению температуры размягчения с 1700 до 1460°C, а вязкость при температуре 1400°C

уменьшается с 2,61 до 1,9 Па·с. Незначительное изменение содержания борного ангидрида и диоксида кремния может привести к значительно-му изменению структуры покрытия и получению заданных свойств. В результате отмеченных процессов можно получить пониженную температуру обжига покрытия, при которой формируется поликомпонентное композиционное покрытие, состоящее из матричного боросиликатного стекла, боросиликатных продуктов окисления тетраборида кремния и недоокисленных наночастиц тетраборида кремния. Химический состав и особенности структуры обеспечивают хорошую термостойкость и прочное сцепление покрытия с защищаемым субстратом.

Опираясь на опыт разработки реакционноотверждаемых покрытий для плиток из кварцевого волокна, в данной работе рассмотрена возможность применения принципов реакционного отверждения к высокотемпературным покрытиям для защиты никелевых сплавов и сталей, волокнистых уплотнительных и углеродокерамических композиционных материалов.

### **Реакционноотверждаемые композиционные материалы и покрытия для защиты авиационных никелевых сплавов и сталей**

Успешное применение жаростойких силикатных эмалей в авиакосмической технике обусловлено следующими преимуществами: технологичностью, высокой прочностью сцепления с металлами и сплавами, отсутствием пористости и исключением диффузии компонентов из газовой среды к сплаву и из сплава в покрытие, ремонтоспособностью, невысокой стоимостью. Преимущества технологии нанесения позволяют получать эмалевые покрытия на крупногабаритных деталях сложной формы. Исследования жаростойких эмалевых покрытий для защиты никелевых сплавов начались в 50-х годах прошлого века с создания жаростойкой эмали А-417 в США и эмали ЭВ-55А в ВИАМ, где токсичный оксид BeO, входящий в состав эмали А-417, заменен на MgO.

В отличие от известных зарубежных жаростойких эмалей авиационного назначения, основу которых составляют  $\text{SiO}_2$  (35–45% (по массе)) и BaO (30–40% (по массе)), в ВИАМ в 60-х годах прошлого века на основе системы BaO– $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  созданы высококремнеземные (содержание  $\text{SiO}_2$ : 55–65% (по массе)) многоборные жаростойкие эмали с малым содержанием BaO (ЭВК-103) на рабочие температуры: 1000°C – длительно и 1100°C – кратковременно. Однако температура эксплуатации современных высокожаростойких никелевых сплавов типа ВЖ171 достигает 1150–1250°C. Применение серийных эмалей для защиты указанных сплавов невозможно ввиду их неработоспособности при столь высоких

температурах. Температуры эксплуатации и обжига эмалей в значительной мере определяются температурной зависимостью вязкости исходной фритты (стекла). Низкая вязкость фритты при температуре обжига эмали способствует получению сплошного глянцевого слоя, прочно закрепленного на металле. Достаточно высокая вязкость эмали при рабочих температурах обеспечивает возможность ее надежной эксплуатации в высокоскоростном газовом потоке. Решение проблемы высокотемпературной защиты сплавов силикатными эмалями осложнено также трудностями получения этих покрытий, поскольку требуется температура обжига 1350–1450°C, что приводит к короблению, разупрочнению и потере свойств деталей из жаростойких сплавов.

В качестве основы жаростойких реакционноотверждаемых покрытий для защиты никелевых сплавов и сталей выбраны фритты системы  $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (рис. 1), обеспечивающие получение высокой тугоплавкости стекол и отличающиеся технологичностью при варке [8]. Путем введения  $\text{V}_2\text{O}_5$  в состав барийалюмосиликатных фритт и последующего спекания изготавливали реакционноотверждаемое стекло. Шликеры реакционноотверждаемых покрытий готовили путем мокрого размола реакционноотверждаемого стекла и специальных добавок, в качестве которых использовали тетраборид кремния, дисилицид молибдена, бор и т. п. компоненты.

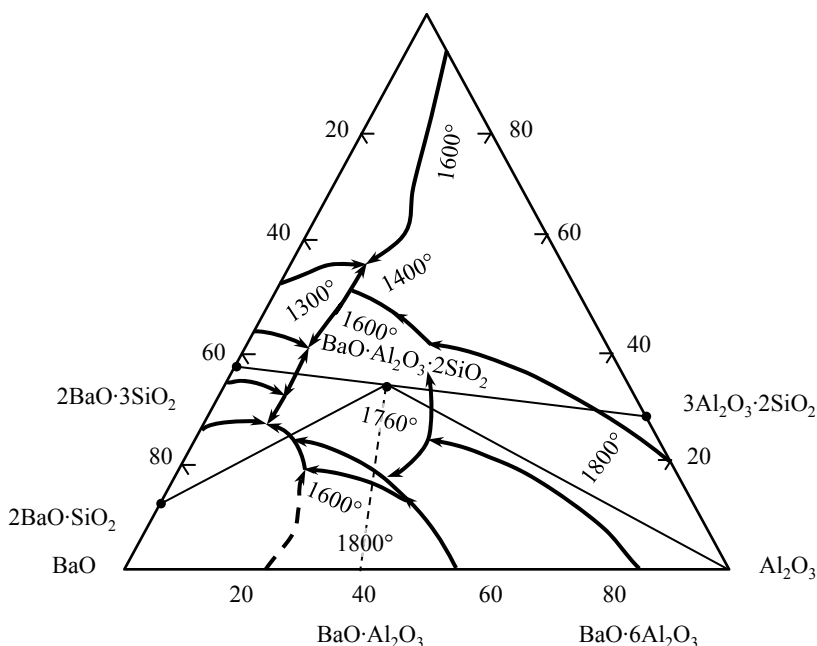


Рис. 1. Диаграмма состояния системы  $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Свойства и особенности структуры реакционноотверждаемых покрытий исследованы методом высокотемпературной дилатометрии. Представлены результаты исследований образца реакционноотверждаемого покрытия с добавкой тетраборида кремния (20% (по массе)  $\text{SiB}_4$ ) в сравнении с образцом серийной жаростойкой эмали. Исследования проведены с помощью электронного дилатометра Netzsch DIL 402 PC-4. Показано, что результаты исследований образца серийной эмали могут быть представлены в виде дилатометрической кривой (рис. 2 [2]), характерной для стекол, с температурой начала деформации  $744^\circ\text{C}$ . При этом дилатометрическая кривая образца реакционноотверждаемого покрытия (рис. 2 [2]) имеет вид, свидетельствующий об образовании структуры, нехарактерной для стеклоэмалей.

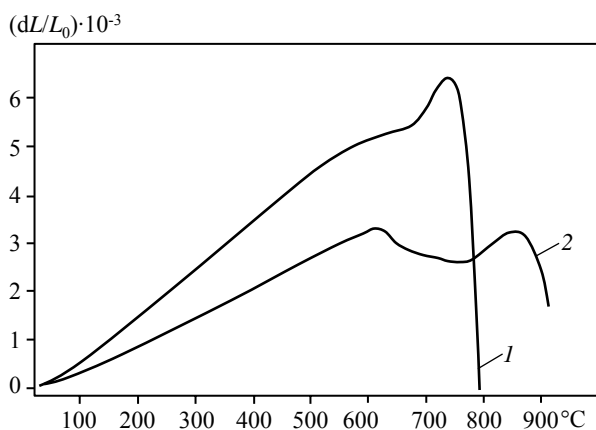


Рис. 2. Результаты дилатометрического анализа серийной жаростойкой эмали (1) и реакционноотверждаемого покрытия (2)

Для объяснения результатов дилатометрического анализа проведены дополнительные исследования плавкости образцов серийной жаростойкой эмали и реакционноотверждаемых покрытий с содержанием  $\text{SiB}_4$  от 1 до 20% (по массе). Суспензии шликеров исследуемых покрытий высушивали в конусообразных формах до получения твердых конусов радиусом 0,5 см и высотой 1 см. Образцы помещали в печь и термообработывали при температуре  $1200^\circ\text{C}$  в течение 3 мин. Образец серийной эмали после термообработки имел форму капли, что свидетельствует о хорошем растекании, характерном для материалов на основе стекла (рис. 3, а). Образцы с добавкой  $\text{SiB}_4$  сохранили конусообразную форму. Образец с 20% (по массе)  $\text{SiB}_4$  не изменил форму и геометрические размеры, но поверхность образца имела стеклянный блеск, что свидетельствует об оплавлении поверхностных слоев образца (рис. 3, б).

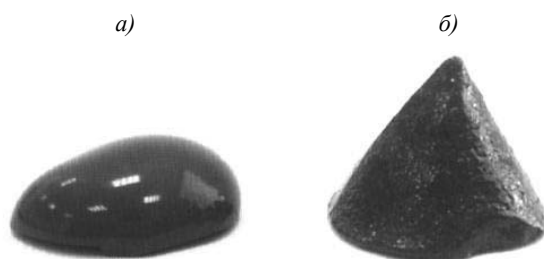


Рис. 3. Внешний вид образцов из фритты серийной эмали (а) и из материала реакционноотверждаемого покрытия (б) после испытаний на плавкость

С целью дополнительного исследования реакционноотверждаемых покрытий определена прочность сцепления жаростойкого покрытия с подложкой из сплава ВЖ171. Для стандартного удара образцов с покрытием использовали тарированный сферический боек заданной массы. Одновременное действие удара и деформации металла может приводить к скалыванию покрытия. Чем меньше площадь скола на поверхности образца с покрытием, тем выше сцепление покрытия с металлом. Сцепление покрытия с подложкой оценивали в процентах от площади поверхности образца, с которой покрытие не скололось в результате приложения ударной нагрузки. Прочное сцепление покрытия со сплавом за счет переходных диффузионных слоев обуславливает надежность эксплуатации в условиях резких температурных перепадов. Известно, что структурные превращения в покрытиях при термообработке оказывают значительное влияние на совокупность их эксплуатационных свойств, в том числе на прочность сцепления покрытия с металлом. Прочность сцепления покрытия с защищаемой поверхностью в значительной мере определяет его термостойкость и жаростойкость в условиях эксплуатации температур  $>1000^{\circ}\text{C}$ . В результате проведенных испытаний установлено, что прочность сцепления серийной жаростойкой эмали ЭВК-103 со сплавом ВЖ171 составляет 97%. Прочность сцепления реакционноотверждаемых покрытий составляет 100%, сколов после приложения ударной нагрузки не наблюдается. Высокая прочность сцепления реакционноотверждаемых покрытий обусловлена образованием переходного слоя, являющегося результатом взаимодействия покрытия с металлом при температуре обжига.

Методом просвечивающей электронной микроскопии проведен анализ микроструктуры образца реакционноотверждаемого покрытия. Результаты анализа свидетельствуют об образовании структуры «ядро—оболочка», где жидкая фаза боросиликатного стекла способствует оплавлению покрытия и препятствует окислению тетраборида кремния, что также способствует увеличению жаростойкости (рис. 4).

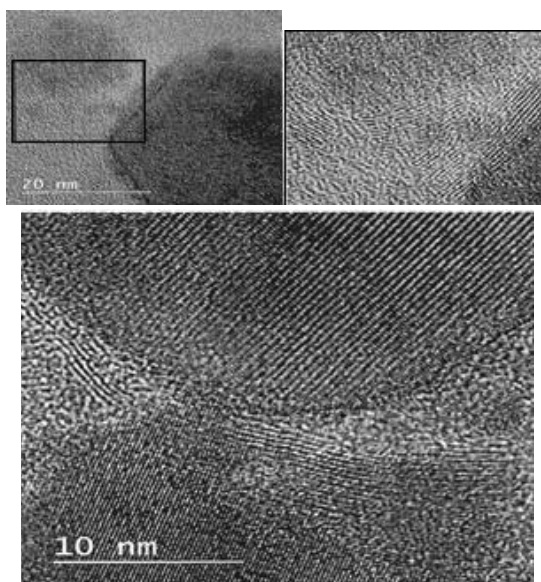


Рис. 4. Микроструктура реакционноотверждаемого покрытия

Исследована жаростойкость серийного жаростойкого покрытия и реакционноотверждаемого покрытия на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  и модифицирующих добавок, в том числе  $SiV_4$  в количестве 20% (по массе) по ГОСТ 9.312–89. В качестве подложки выбраны жаропрочный сплав ВЖ171 и коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т. Испытания для покрытий на сплаве ВЖ171 проводили при температуре 1250°С в течение 100 ч. Испытания для покрытий на стали 12Х18Н10Т проводили при температуре 600°С в течение 100 ч. Результаты испытаний представлены в таблице.

**Сравнительные свойства серийного жаростойкого и реакционноотверждаемого покрытий**

Покрытие	Режим испытаний	Привес, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Внешний вид покрытия после испытаний
Сталь 12Х18Н10Т			
Серийное жаростойкое покрытие	600°С, 100 ч	0,025 (с покрытием); 0,16 (без покрытия)	Цвет – зеленый, покрытие плотное, незначительные сколы на острых кромках
Реакционноотверждаемое покрытие		0,009 (с покрытием); 0,16 (без покрытия)	Цвет – темно-серый, имеет стекловидный блеск, дефектов нет
Сплав ВЖ171			
Серийное жаростойкое покрытие	1250°С, 100 ч	Покрытие неработоспособно; 1,5 (без покрытия)	Покрытие полностью скололось через 45 ч испытаний
Реакционноотверждаемое покрытие		0,09 (с покрытием); 1,5 (без покрытия)	Цвет – темно-серый, присутствует незначительная матовость, сколов и трещин нет



Установлено, что реакционноотверждаемые покрытия превосходят серийные жаростойкие эмали по уровню жаростойкости и могут использоваться для защиты никелевых сплавов авиационного назначения при температурах до 1250°С и коррозионностойких сталей – до 600°С.

### **Стеклокерамические композиционные покрытия для интерметаллидных сплавов**

Интерметаллидные сплавы на основе  $Ni_3Al$  и  $Ti-Al$  с большой степенью гетерогенности имеют низкую технологическую пластичность и высокое сопротивление деформированию как при низких, так и при высоких температурах. Это вызывает значительные трудности при изготовлении деформированных полуфабрикатов и деталей с применением традиционных способов обработки давлением.

К наиболее эффективным и универсальным способам обработки малопластичных интерметаллидных сплавов с получением точных заготовок деталей относится деформирование в изотермических условиях в режиме сверхпластичности [9–12].

Освоение ресурсосберегающих технологий изотермического деформирования в режиме сверхпластичности потребовало разработки новых теоретических основ синтеза технологических покрытий с качественно новым уровнем свойств, обеспечивающих высокие термомеханические режимы объемного и локального деформирования труднодеформируемых интерметаллидных титановых и никелевых сплавов систем  $Ti-Al$ ,  $Ti-Al-Nb$ ,  $Ni-Al-Co$  [13, 14].

Исследованы новые композиции технологических покрытий на основе силикатных систем  $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ ,  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  и модифицирующих добавок: бор аморфный, оксид алюминия, дисилицид молибдена. При обжиге эмали в отсутствие борированного дисилицида молибдена частицы тугоплавкой фритты не образуют высококачественного защитного слоя из-за высокой вязкости фритты. Для получения покрытия готовили смесь порошков дисилицида молибдена и бора, которую подвергали нагреву в безокислительной среде. В результате диффузионного процесса поверхность частиц дисилицида молибдена насыщается бором, образуется двухфазная система «дисилицид молибдена–бор». Приготовленную смесь из тугоплавкой эмалевой фритты и борированного дисилицида молибдена наносили тонким слоем на поверхность металла и обжигали. При обжиге покрытия борированные частички дисилицида молибдена окисляются кислородом атмосферы печи. На их поверхности формируется жидкая фаза из борного ангидрида. Одновременно идет окисление кремния с образованием его диоксида. Наружные слои жидкой пленки борного ангидрида вступают в реакцию с частицами тугоплавкой

фритты, а внутренние — взаимодействуют с диоксидом кремния. В результате реакций внутренние слои этой пленки обогащаются диоксидом кремния. Образуется боросиликатное стекло, которое прочно закрепляется на дисилициде молибдена, защищает его от дальнейшего окисления, предупреждает развитие процесса «силицидной чумы». Внешние слои пленки борного ангидрида сплавляются с частицами тугоплавкой фритты, что приводит к получению высоковязкого боросиликатного промежуточного слоя, скрепляющего частицы фритты и дисилицида молибдена. Итогом этих процессов является формирование при умеренных температурах сплошного тугоплавкого покрытия.

Проведены исследования эффективности защитного действия и коэффициента трения исследованных композиций технологических покрытий интерметаллидных сплавов систем Ti—Al, Ti—Al—Nb, Ni—Al—Co по температурно-временным режимам изотермической штамповки: температура — от 1000 до 1250°C, продолжительность выдержки — до 5 ч.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что состав покрытия ЭВТ-115 является оптимальным и обеспечивает снижение окисляемости образцов интерметаллидных сплавов систем Ti—Al, Ti—Al—Nb и Ni—Al—Co при температурах 1000 и 1250°C в 9–8–6 и в 7,35–6–5 раз соответственно по сравнению с образцами без покрытия. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что в покрытии ЭВТ-115 присутствует кристаллическая фаза  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , аналогичная данбуриту, которая способствует повышению жаростойкости покрытия ЭВТ-115.

Микроструктура покрытия ЭВТ-115 гетерогенная, в стекломатрице распределены кристаллические частицы в виде разветвленных агрегатов. Заметного влияния модифицирующих добавок на микроструктуру покрытия ЭВТ-115 не обнаружено. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что дисилицид молибдена достаточно устойчив в стеклорасплаве системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  при температуре 1250°C.

Исследование влияния защитного покрытия ЭВТ-115 на технологические параметры деформации интерметаллидных сплавов систем Ti—Al, Ti—Al—Nb и Ni—Al—Co показало, что при изотермической штамповке на воздухе наблюдалось снижение усилий деформации, прикладываемых прессом для формоизменения заготовок, на 15–20%, что, в свою очередь, связано с уменьшением коэффициента трения на границе раздела «штамп—металл» на 30–50%.

Применение стеклокерамического композиционного покрытия позволит реализовать ресурсосберегающую технологию изотермической штамповки на воздухе заготовок из интерметаллических сплавов систем Ti—Al, Ti—Al—Nb и Ni—Al—Co, получить экономию металла — до 18%, повысить коэффициент необрабатываемой поверхности — до 0,9, снизить трудоемкость процесса и себестоимость деталей — на 30–50% [14].

## Трещиностойкий керамический композиционный материал на основе керамообразующих полимеров и реакционноотверждаемое покрытие для его защиты

Создание поликерамической технологии позволило разработать трещиностойкий углеродокерамический композиционный материал марки ВМК-12П с применением прекурсоров на основе керамообразующих полимеров типа поликарбосилана и полисилазана (ПКС213-М) [15–19].

Данный композиционный материал не обладает достаточной температуроустойчивостью вследствие низкой окислительной стойкости углеродных волокон, армирующих керамическую матрицу. Последняя не обеспечивает надежную защиту композиционного материала вследствие недостаточной смачиваемости углеродных волокон и заполнения пор между углеродными волокнами.

Разработано гибридное реакционноотверждаемое покрытие для композиционного материала, состоящее из двухслойного покрытия. *Первый слой* – реакционноотверждаемое покрытие, которое состоит из стекломатрицы на основе системы  $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , модифицированной тугоплавкими бескислородными соединениями  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{SiB}_4$ . Отличительной особенностью данного покрытия является протекание химических реакций окисления и стеклообразования в процессе формирования и эксплуатации наноструктурированного керамического композиционного материала. Причем температура обжига покрытия на  $250\text{--}350^\circ\text{C}$  меньше по сравнению с рабочей температурой композиционного материала. *Второй слой* покрытия формируется при комнатной температуре из золя и модифицирующих добавок  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{SiB}_4$ . Данное наноструктурированное покрытие является безобжиговым и изготавливается по золь-гель технологии.

Проведены испытания температуроустойчивости композиционного материала с покрытием и без покрытия при температурах  $1200\text{--}1250^\circ\text{C}$  в течение 8 ч. Анализ полученных данных свидетельствует, что потеря массы образца без покрытия составляет 40%, с покрытием: 0,5%. Внешний вид образца с покрытием после испытания практически не изменился. Покрытие – темно-серого цвета, матовое, без следов трещин и сколов.

Композиционный материал ВМК-12П, разработанный с применением гибридного реакционноотверждаемого покрытия, обладает следующими свойствами: плотность  $1,8\text{--}2,0\text{ г/см}^3$ , предел прочности при изгибе  $200\text{--}300\text{ МПа}$ , рабочая температура  $1000\text{--}1350^\circ\text{C}$ , термостойкость по режиму  $20 \rightleftharpoons 1\ 1350^\circ\text{C}$  составляет 50 циклов (без разрушения), излучательная способность  $\xi \geq 0,8$ .

Совместно с ФГУП «ЦИАМ» изготовлены: жаровая труба, кольца, цилиндры, рассекатели, лопасти из керамического композиционного материала ВМК-12П с реакционноотверждаемым покрытием (рис. 5 и 6).



Рис. 5. Фрагменты жаровой трубы (а), кольца (б) и цилиндрической заготовки (в)

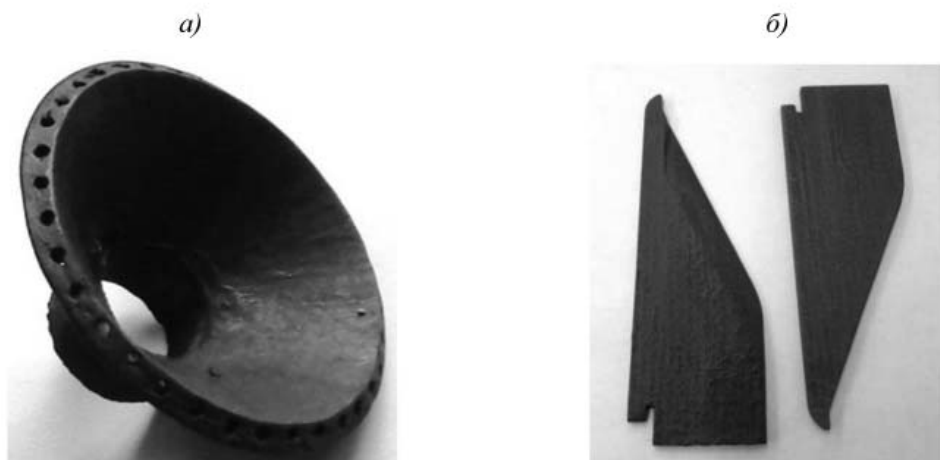


Рис. 6. Рассекатель (а) и лопасти (б)

Жаровая труба прошла испытания на стенде ФГУП «ЦИАМ» при температуре 1500°С в течение 30 мин с момента разогрева установки. Испытания прекратили вследствие неправильного крепления, что привело к неравномерному обогреву. Проведенные испытания свидетельствуют, что для высокотемпературных испытаний тонкостенных образцов и изделий из углеродокерамических композиционных материалов необходимо предусмотреть специальные приспособления с целью надежного закрепления испытуемых образцов; требуют усовершенствования и испытательные стенды.

Лопастей из материала ВМК-12П прошли высокотемпературные испытания на стенде Ц-16. Условия испытания: температура 1200°С, скорость напора потока 2М. Лопастей прошли испытания без разрушения. Установлено, что основной вклад в обеспечение защиты углеродных волокон от окисления при температуре 1200°С вносит жаростойкое гибридное реакционноотверждаемое покрытие, сочетающее слой, формируемый при температуре ниже рабочей, и слой покрытия холодного отверждения.

### Заключение

Создание композиционных материалов и покрытий с применением эффекта реакционного отверждения открывает новые возможности применения этих материалов при высоких и сверхвысоких температурах эксплуатации в конструкциях перспективной авиакосмической техники. Возможность получения высокого уровня характеристик композиционных материалов и покрытий объясняется формированием уникальной структуры материалов и покрытий в результате химических реакций окисления и стеклообразования между компонентами материала и кислородом атмосферы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. матер. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н., Солнцев С.С. Окситермосинтез – новый шаг к материалам для перспективной авиакосмической техники // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2002. С. 131–137.

4. Goldstein H.B. et al. Reaction cured borosilicate glass coatings for low-density fibrous insulation // Borate glasses. Structure, properties, application: plenum press. New-York, 1978. P. 623–634.
5. Garofalini S.H., Banas R., Creedon J. Development of high viscosity coatings for advanced Space Shuttle application // 11-th National SAMPE technical conference. Boston, 1979. P.114–124.
6. Солнцев С.С. Некоторые особенности покрытий для плиток многоразовой теплозащиты орбитальных космических кораблей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-1-1.
7. Еременко Л.П. Высокотемпературные покрытия для защиты материалов в экстремальных условиях эксплуатации // Современные проблемы неорганической химии. СПб.: Арт-Экспресс, 2016. С. 188–200.
8. Торопов Н.А., Бараковский В.К., Лапин В.В. и др. Диаграммы состояния силикатных систем: справочник. Л.: Наука, 1972. Вып. 3. Тройные силикатные системы. 448 с.
9. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. 2-е изд., доп. М.: Ленанд, 2016. 252 с.
10. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
11. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 196–206.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 129–141.
13. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических материалов и бериллиевых сплавов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 04.04.2016).
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кучеряев В.В., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Капитаненко Д.В. Термомеханическое поведение интерметаллидных сплавов систем Ni–Al–Co и Ni–Al–Nb при изотермической деформации // Письма о материалах. 2016. Т. 6. №3. С. 189–194. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-3-189-194.

15. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В., Швец Н.И., Ямщикова Г.А. Термоармирующие покрытия для тепловозвукпоглощающих материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.04.2016).
16. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
17. Бабин А.Н. Связующее полимерных композиционных материалов нового поколения. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2016).
18. Kablov E., Minakov V., Solntsev S., Rosenenkova V., Shvets N. Advanced inorganic structural fiber composites // CIMTEC 2002, 2002. VI. P. 163–167.
19. Каримбаев Т.Д., Афанасьев Д.В., Даньшин К.А., Николаева М.П., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Исследование квазипластичных высокотемпературных углерод-керамических нанокompозитов для «горячих» деталей авиационных двигателей // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века». М., 2010. С. 371–390.