



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-3-3

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

Ст.С. Солнцев

доктор технических наук

В.А. Розененкова

кандидат технических наук

Н.А. Миронова

Г.А. Соловьева

Январь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-3-3

Ст.С. Солнцев, В.А. Розененкова, Н.А. Миронова, Г.А. Соловьева

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

Рассматриваются высокотемпературные эрозионностойкие и функциональные покрытия для теплозащитных, теплоизоляционных, уплотнительных материалов и технологии покрытий. Показаны результаты испытаний и золь-гель технологии ремонтных, маркировочных и других функциональных покрытий.

Ключевые слова: *золь, гель, покрытия, эрозионная стойкость, ремонтное покрытие, плитка, теплозащита, теплоизоляция.*

St.S. Solntsev, V.A. Rozenenkova, N.A. Mironova, G.A. Solov'jova

HIGH-TEMPERATURE COATINGS ON BASIS OF SOL-GEL TECHNOLOGY

Consideration high-temperature erosion and functional of coatings for heat-protection, heat-insulation, pack condense materials and technology coatings. Demonstration results testings and effectiveness of sol-gel technology repairs, marking and other functional coatings.

Key words: *sol, gel, coatings, erosion stable, repair coatings, tile, heat-protection, heat-insulation.*

Авиационная промышленность остается наиболее высокотехнологичным сектором экономики, заинтересованным в наукоемкой продукции [1–3].

Перспективным направлением в работах по созданию наукоемкой продукции является синтез материалов и покрытий на основе золь-гель технологии [4–8].

Золь-гель технология и ее преимущества. При разработке новых высокоэффективных покрытий для гибкой и плиточной теплозащиты особое внимание уделяется ее упрочнению и повышению термохимической устойчивости, изысканию низкокатионных компонентов с высокой излучательной способностью, разработке способов оперативного ремонта и восстановления поврежденной поверхности теплоизоляции. При решении перечисленных задач ключевой технологией является золь-гель процесс, который применяют либо для прямого синтеза покрытий, либо для получения коллоидных порошковых волокнистых компонентов требуемой дисперсности и высокой чистоты.

Основные преимущества золь-гель метода получения стеклообразующих материалов по данным работ [5–9] состоят в следующем:

- использование особо чистых исходных веществ для синтеза, что обеспечивает присутствие в конечном продукте примесей в суммарном количестве не более $10^{-3}\%$ (по массе);
- взаимодействие исходных компонентов в растворе, т. е. на молекулярном уровне;
- возможность синтеза покрытий без применения высокотемпературных процессов.

Высокая химическая однородность и чистота материалов, полученных золь-гель методом, обеспечивают повышение их термохимической устойчивости и стабильность других характеристик. Кроме того, синтез стеклообразных материалов золь-гель методом не требует высокотемпературной обработки, как например, при получении покрытий по шликерно-обжиговой технологии и варке тугоплавких стекол, что приводит к значительной экономии энергоресурсов. В ВИАМ разработки высокотемпературных покрытий и стеклокерамических композиционных материалов по золь-гель технологии проводятся с конца 70-х годов прошлого века. Мощным импульсом развития этих работ послужили исследования по созданию многоразовой теплозащиты для орбитального космического корабля «Буран» [10–12].

Безобжиговое эрозионностойкое покрытие для гибкой теплоизоляции на рабочую температуру до 800°C. Необходимость проведения работ по созданию безобжиговых эрозионностойких защитных покрытий для гибкой теплоизоляции (ГТЗИ) вызвана тем, что гибкая теплозащита без эрозионностойкого покрытия обладает недостаточной стойкостью к воздействию высокоскоростного воздушного потока и к механическим повреждениям. Сложность этой задачи обусловлена тем, что покрытия не должны лишать теплоизоляцию гибкости [13, 14].

В результате проведенной работы разработаны составы фиксирующих и эрозионностойких безобжиговых покрытий на основе коллоидных полидисперсных порошковых систем и компонентов органического синтеза керамообразующих полимеров. Эти покрытия предназначены для гибкой теплоизоляции из высококремнеземного стекловолокна на рабочие температуры 650 и 800°C. Разработанное безобжиговое эрозионностойкое защитное покрытие марки ЭВГС-1 для гибкой теплоизоляции предназначено для предотвращения ее эрозионного разрушения при воздействии высокотемпературного скоростного воздушного потока.

Технические характеристики покрытия ЭВГС-1:

Температура эксплуатации, °C до 800;
Плотность, г/см³ (не более) 2;

Термостойкость, цикл (20↔800°С) >100.

Применение покрытий обеспечивает: повышение стойкости теплоизоляции к воздействию циклических термонагрузений в 2–5 раз, повышение устойчивости к сдвигу нитей в 1,5–2 раза и снижение осыпаемости нитей в 1,5–3 раза.

Безобжиговое эрозионностойкое покрытие для гибкой теплоизоляции на рабочую температуру до 1000°С. Необходимость создания безобжиговых эрозионностойких защитных покрытий для гибкой теплоизоляции (ГТЗИ) на рабочие температуры до 1000°С вызвана тем, что эта гибкая теплозащита изготавливается из ткани на основе кварцевого волокна, тогда как гибкая теплоизоляция на рабочие температуры до 650°С выполняется из стеклоткани на основе алюмосиликатного волокна, а на рабочие температуры до 800°С – применяется ткань из волокна на основе высококремнеземного стекла. С учетом того, что исходные стекла – а тем более волокна и ткани из них – весьма различаются по физико-химическим, теплофизическим свойствам и температуроустойчивости [11, 13], для каждого вида ГТЗИ потребовалось разрабатывать специальные покрытия на соответствующие рабочие температуры. Сложность задачи обусловлена еще и тем, что покрытия не должны лишать теплоизоляцию гибкости [5–8].

В качестве основных компонентов покрытий выбраны коллоидные растворы диоксида кремния, муллита, оксида алюминия с содержанием примесей 1–3%, ультрадисперсные порошки диоксида и карбида кремния, керамообразующие полимеры типа полисиланов и поликарбосиланов. Исследовали закономерности изменения качества покрытий в зависимости от технологических параметров их приготовления и нанесения. Покрытия наносили кистью, распылением из краскораспылителя, методом пропитки. В таблице приведены некоторые технологические свойства оптимальных составов покрытий.

Технологические параметры опытной партии покрытий

Условный номер партии	Вязкость по ВЗ-4, с	pH	Время перемешивания компонентов, с	Метод нанесения покрытия	Цвет суспензии	Качество покрытия
1	30	8,5	90	Краскораспылителем	Серый	Без дефектов
2	30	8,5	180	Кистью	Серый	Без дефектов
3	20	7,9	90	Пропиткой	Серый	Без дефектов

Установлено, что вязкость и плотность экспериментальных составов суспензий увеличиваются пропорционально концентрации дисперсионной фазы из диоксида кремния. Плотность возрастает от 1,2 до 1,4 г/см³ при содержании дисперсионной фазы 10 и 40% соответственно. При этом вязкость (по ВЗ-4) изменяется от 15 до 27 с.

Испытания покрытий показали, что температуроустойчивость их достигает 1000°C, термостойкость по режиму 20↔1000°C превышает 30 циклов (теплосмен); температурный коэффициент линейного расширения (КТЛР) составляет $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Применение покрытий обеспечивает: повышение стойкости гибкой теплоизоляции к воздействию циклических термонагрузений в 2–5 раз, повышение устойчивости к раздвижке нитей в 1,5–2 раза и снижение осыпаемости нитей в 1,5–3 раза. Усадка образцов не превышает 1%. Покрытие рекомендовано к использованию для гибкой теплоизоляции в изделиях типа гиперзвуковых летающих лабораторий (ГЗЛЛ-1, ГЗЛЛ-ВК).

Безобжиговое покрытие для плиточной теплозащиты. Одно из перспективных направлений разработки покрытий – применение синтетических боросиликатных материалов, полученных золь-гель методом (гель-фритт), для синтеза реакционноотверждаемых покрытий типа ЭВЧ и ЭВС [14–17].

Исследование гель-фритт методом вторичной эмиссионной масс-спектрометрии (ВЭМСД) показало отсутствие в них заметных примесей щелочных металлов. Для гель-фритт характерна высокая адгезия в сочетании с химической инертностью по отношению к подложке при рабочих температурах.

Стендовые испытания в условиях обтекания высокотемпературным диссоциированным воздушным потоком с $T_w=6000\text{--}8000^\circ\text{C}$ (стенд ВЧИ-63/5.28 ЛИИ им. М.М. Громова) подтвердили, что использование гель-фритты в качестве основы покрытия типа ЭВЧ обеспечивает его термохимическую устойчивость при температурах T_w до 1400°C. Кроме того, имеет место повышение термостабильности фазового состава, формы и размеров поверхности плиток теплозащитного материала (ПТЗМ) с покрытием в условиях эксплуатации, связанных с перегревами ПТЗМ, что затрудняет проникновение потока плазмы в межплиточное пространство и тем самым повышает надежность плиточной теплозащиты.

Каталитическая активность поверхности разработанных эрозионностойких покрытий в высокотемпературном потоке диссоциированного воздуха ($K_w=0,8\text{--}2,0 \text{ м/с}$ при $T_w=1000\text{--}1550^\circ\text{C}$) соответствует минимальной каталитичности, известной в настоящее время для кварцевого стекла.

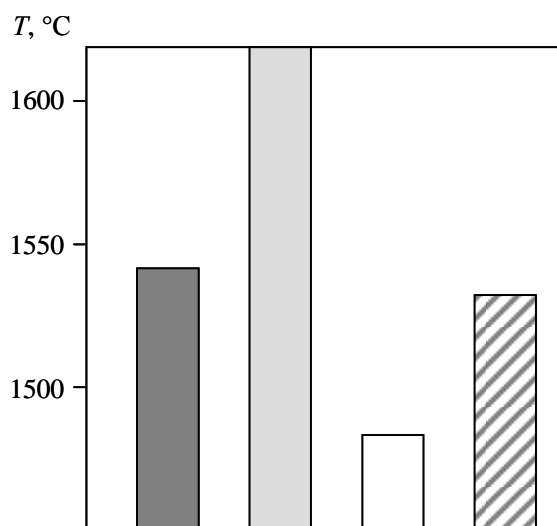


Рисунок 1. Влияние модифицирующих добавок (активирующей (■), пассивирующей (▒) и нейтральной (□)) на рабочую температуру покрытия: ▨ – покрытие-эталон ЭВЧ-4М1У-3

Применение золь-гель метода для синтеза компонентов покрытий позволяет вводить в их состав модификаторы, регулирующие каталитическую активность покрытий. При этом показана возможность как повышать, так и дополнительно снижать каталитическую активность покрытия. На рис. 1 приведены результаты сравнения температуры поверхности образцов ПТЗМ с различными терморегулирующими модификаторами в условиях конвективного нагрева высокотемпературным воздушным потоком ($T_w=7000^\circ\text{C}$). Покрытия имели излучательную способность $>0,85$ при температуре испытаний. Зафиксированные тепловые эффекты стабильны и сохраняются в течение длительных многоцикловых испытаний. При этом элементы-модификаторы в поверхностном слое покрытия сохраняются в начальных концентрациях (по данным ВЭМСД). Как показали эксперименты при различных значениях T_w эталонного покрытия ЭВЧ-4М1У-3 на стенде ВЧИ-63/5.28, указанные эффекты имеют место в широком диапазоне температур (рис. 2). Таким образом, подтверждается возможность регулирования рабочей температуры поверхности ПТЗМ, а зависимость может быть использована для создания стендовых и летных средств диагностики диссоциированных воздушных течений. Применение новых материалов (ультрадисперсионных порошков и волокнистых оксидных и бескислородных соединений) и золь-гель технологии позволило синтезировать эрозионностойкие покрытия нового типа – безобжиговые, формируемые при комнатной температуре. Преимуществом такого класса покрытий является возможность их получения без теплового воздействия на подложку, неизбежно влияющего на ее свойства, а также оперативного восстановления работоспособности поверхности ПТЗМ на обширных площадях в составе изделия, в том числе на труднодоступных участках аг-

регатов. Разработанное покрытие имеет высокую эрозионную и термохимическую устойчивость в высокотемпературном диссоциированном воздушном потоке до температуры 1450°C; заданную излучательную способность ($>0,85$) при температурах до 1300°C; низкую константу скорости гетерогенной рекомбинации $K_w=1-5$ м/с при $T_w=1000-1300^\circ\text{C}$ (стенд ВАТ-104-НИО-8, ЦАГИ). Каталитическая активность и излучательная способность покрытия практически не изменяются во времени при испытаниях длительностью ~ 1 ч и температуре $T_w=1000^\circ\text{C}$. Безобжиговые покрытия обладают высокими механическими характеристиками. При определении стойкости к растрескиванию покрытий на теплозащитном материале при ударе (по методике НПО «Молния») установлено, что значение энергии удара, вызывающего разрушение, для безобжигового покрытия более чем в 3 раза выше, чем для обжиговых покрытий типа ЭВЧ [9–12].

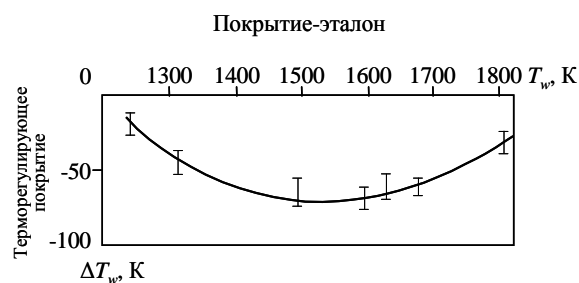


Рисунок 2. Снижение температуры покрытия с пассивирующей добавкой (по сравнению с эталоном)

Безобжиговые ремонтные покрытия. В процессе производства – особенно после приклейки на металлическую поверхность орбитального корабля – возникали дефекты на плитках с покрытием. Основной причиной дефектов были механические повреждения. В связи с этим предстояло не только разработать составы покрытий и технологию ремонта, но также оценить свойства ремонтных покрытий, в том числе провести стендовые испытания ПТЗЭ с покрытием. Особое внимание в работе уделялось поиску методов контроля ремонтных покрытий и изучению их структуры. Исследования показали, что кремнезоль, полученный из силиката натрия, не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к компонентам эрозионностойких покрытий по устойчивости к высокотемпературной кристаллизации. Низкая стойкость по отношению к высокотемпературной кристаллизации гелей, полученных из такого золя, обусловлена наличием примесей, главным образом оксида натрия.

Использовали золь диоксида кремния ОСЧ 6-3 (поставлялся ОЭЗ «ИРЕА»), в котором содержание основного вещества составляет 23,2–24,75% (по массе); рН при 25°C: 7,85–9,0. Исследования проводились на образцах из материалов ТЗМК-10 и ТЗМК-25.

В качестве исходных компонентов для приготовления покрытия использовали:

- порошки кварцевого (ТУ 1-596-153–82) и высококремнеземного стекла (ТУ 1-596-155–82);
- порошок тетраборида кремния (ТУ 1-596-64–82);
- диоксид кремния (ТУ 6-09-4989–83);
- синтетический диоксид кремния аморфный (СТП 6-09-11-29–79).

В результате исследований и испытаний экспериментальных составов в качестве оптимальных выбраны покрытия:

«черные»

ВРЧ-1 – для материала ТЗМК-10;

ВРЧ-2 – для материала ТЗМК-25;

«белые»

ВРС-1 – для материала ТЗМК-10;

ВРС-2 – для материала ТЗМК-25.

Примером составов покрытий может служить покрытие ВРС-1, содержащее стекло марки ТСМ-548 в количестве 29–31% (по массе), дискретное кварцевое волокно: 29–31% (по массе), золь-диоксид кремния: 37–41% (по массе).

Покрытия обеспечивают получение свойств, аналогичных свойствам ремонтируемого покрытия, при размерах дефектов площадью 9 см², длиной – до 6 см и глубиной – до 7 мм. На одной плитке количество дефектов не должно превышать 3 шт.

Маркировочные покрытия. Проводилась оценка возможности получения одноразовой и многоразовой маркировки на плитках с покрытием. Изыскание состава для маркировки осуществлялось в области органических композиций холодного отверждения, исключающих необходимость в дополнительной термообработке плиток.

В качестве одноразовой маркировки был выбран ацетонорастворимый краситель бордового цвета. Маркировочный состав наносился на плитку с покрытием, после чего плитка подвергалась испытаниям на термоциклирование по режиму 20±800°С. После первого термоцикла наблюдалось выгорание маркировочного состава, образующийся при этом желтоватый налет легко удалялся обдувом воздухом. После 10 термоциклов покрытие в местах нанесения маркировки исследовалось на содержание α-кристобалита. Установлено, что содержание кристобалита в покрытии с маркировкой и в покрытии-эталоне находится на одинаковом уровне и составляет <2%.

В качестве многоразовой маркировки исследовалась следующая композиция: лак ХБ-784 + шликер покрытия ЭВЧ-4М1У-3. После 10 термоциклов внешний вид марки-

ровки не изменяется. Содержание α -кристобалита в покрытии с маркировкой составляет <1% [18, 19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стекло-керамические покрытия и композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 359–368.
4. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А. Стеклокерамические электроизоляционные покрытия для толсто пленочных энергонасыщенных систем //Стекло и керамика. 2013. №7. С. 27–29.
5. Jones R.W. Sol-gel preparation of ceramics and glasses //Metals and Materials. 1988. December. P. 748–751.
6. Livage J. Sol-gel processing of metal oxides //Chemica Scripta. 1988. V. 28. P. 9–13.
7. Sumio Sakka. Sol-gel glasses and their future applications //Trans. of the Indian Ceramic Society. 1987. V. 46. №1. P. 1–11.
8. Solntsev St.S. High-Temperature Composite Materials and Coatings on the Basis of Glass and Ceramics for Aerospace Technics //Russian Journal of General Chemistry. 2001. V. 81. №5. P. 992–1000.
9. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для градиентных высокотемпературных теплозащитных материалов //Стекло и керамика. 2013. №1. С. 29–33.
10. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Соловьева Г.А. Высокотемпературные покрытия для волокнистых теплоизоляционных материалов //Стекло и керамика. 2013. №5. С. 27–31.
11. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы //Российский Химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 12–19.
12. Солнцев Ст.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики /В сб.: Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 90–99.

13. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 380–385.
14. Солнцев Ст.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение. 1984. 255 с.
15. Солнцев Ст.С. Защитные покрытия металлов при нагреве: Справочное пособ. 2-е изд. М.: Либроком. 2009. 248 с.
16. Солнцев С.С. Розененкова В.А. Миронова Н.А. Гаврилов С.Г. Теплозащитный материал на основе керамических армирующих наполнителей //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 22–25.
17. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Защитные технологические покрытия для термической обработки высокопрочных сталей типа ВКС //Стекло и керамика. 2011. № 10. С. 28–30.
18. Кондрашов Э.К., Козлова А.А., Малова Н.Е. Исследование кинетики отверждения фторполиуретановых эмалей алифатическими полиизоцианатами различных типов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 48–49.
19. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Тенденции развития в области конформных покрытий для влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа и элементов радиоэлектронной аппаратуры //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 50–52.

References list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i staley spetsial'nogo naznacheniya, zaschitnykh i teplozaschitnykh pokrytiy [Development strategy of heat-resistant alloys and special-purpose steels, protective and thermal-protective coatings] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 19–36.
3. Solntsev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie pokrytiya i kompozitsionnye materialy [High-temperature glass-ceramic coatings and composite materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 359–368.

4. Rozenenkova V.A., Solntsev St.S., Mironova N.A. Steklokeramicheskie elektroizolyatsionnye pokrytiya dlya tolstoplenochnykh energonasyshchennykh sistem [Glass-ceramic insulating coatings for thick-film energy-intensive systems] //Steklo i keramika. 2013. №7. S. 27–29.
5. Jones R.W. Sol-gel preparation of ceramics and glasses [Sol-gel preparation of ceramics and glasses] //Metals and Materials. 1988. December. P. 748–751.
6. Livage J. Sol-gel processing of metal oxides [Sol-gel processing of metal oxides] //Chemica Scripta. 1988. V. 28. P. 9–13.
7. Sumio Sakka. Sol-gel glasses and their future applications [Sol-gel glasses and their future applications] //Trans. of the Indian Ceramic Society. 1987. V. 46. №1. P. 1–11.
8. Solntsev St.S. High-Temperature Composite Materials and Coatings on the Basis of Glass and Ceramics for Aerospace Technics [High-Temperature Composite Materials and Coatings on the Basis of Glass and Ceramics for Aerospace Techniques] //Russian Journal of General Chemistry. 2001. V. 81. №5. P. 992–1000.
9. Rozenenkova V.A., Solntsev St.S., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Keramicheskie pokrytiya dlya gradientnykh vysokotemperaturnykh teplozaschitnykh materialov [Ceramic coatings for thermal-protective high-temperature gradient materials] //Steklo i keramika. 2013. №1. S. 29–33.
10. Solntsev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Solov'eva G.A. Vysokotemperaturnye pokrytiya dlya voloknistykh teploizolyatsionnykh materialov [High-temperature coatings for fibrous heat-insulating materials] //Steklo i keramika. 2013. №5. S. 27–31.
11. Schetanov B.V., Ivahnenko Yu.A., Babashov V.G. Teplozaschitnye materialy [Thermal-protective materials] //Rossiyskiy Himicheskiy zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 12–19.
12. Solntsev St.S. Vysokotemperaturnye kompozitsionnye materialy i pokrytiya na osnove stekla i keramiki [High-temperature composite materials and glass- and ceramic-based coatings] /V sb.: Aviatsionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007. Yubileynyj nauch.-tehnich. sb. M.: VIAM. 2007. S. 90–99.
13. Ivahnenko Yu.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinyakova E.V. Vysokotemperaturnye teploizolyatsionnye i teplozaschitnye materialy na osnove volokon tugoplavkih soedineniy [High-temperature heat-insulating and thermal-protective materials based on refractory compound fibers] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 380–385.
14. Solntsev Ct.C. Zashchitnye tehnologicheskie pokrytiya i tugoplavkie email [Protective processing coatings and refractory enamels]. M.: Mashinostroenie. 1984. 255 s.

15. Solntsev St.S. Zashitnye pokrytiya metallov pri nagreve [Protective coatings for metals at heating]: Spravochnoe posob. 2-e izd. M.: Librokom. 2009. 248 s.
16. Solntsev S.S. Rozenenkova V.A. Mironova N.A. Gavrilov S.G. Teplozaschitnyj material na osnove keramicheskikh armiruyuschih napolniteley [Thermal-protective material based on ceramic reinforcing fillers] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 22–25.
17. Solntsev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Zashitnye tehnologicheskie pokrytiya dlya termicheskoy obrabotki vysokoprochnyh staley tipa VKS [Protective coatings for thermal processing of VKS-type high-strength steels] //Steklo i keramika. 2011. №10. S. 28–30.
18. Kondrashov E.K., Kozlova A.A., Malova N.E. Issledovanie kinetiki otverzheniya ftorpoliuretanovykh emaley alifaticheskimi poliizotsianatami razlichnykh tipov [Kinetics study of fluoropolyurethane enamels curing by aliphatic polyisocyanates of various types] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 48–49.
19. Nefedov N.I., Semenova L.V. Tendentsii razvitiya v oblasti konformnykh pokrytiy dlya vlagozaschity i elektroizolyatsii plat pechatnogo montazha i elementov radioelektronnoy apparatury [Trends in the development of conformal coatings for moisture protection and electrical insulation of printed-circuit boards and radio equipment components] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 50–52.