



УДК 678.026

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ
ВОЛОКНИСТЫХ СУБСТРАТОВ**

Ст.С. Солнцев
доктор технических наук

В.А. Розененкова
кандидат технических наук

Н.А. Миронова

Г.А. Соловьева

Октябрь 2013

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.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№10, 2013 г.

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

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВОЛОКНИСТЫХ СУБСТРАТОВ

Рассматриваются высокотемпературные эрозионностойкие и функциональные покрытия для теплозащитных, теплоизоляционных и уплотнительных материалов из кварцевых, стеклянных и металлических волокон, нитевидных кристаллов, а также технологии получения покрытий.

Ключевые слова: *покрытие, эрозионная стойкость, обжиг, гибкая изоляция; высокотемпературные, теплоизоляционные материалы; белые и черные покрытия.*

St.S. Solntsev, V.A. Rozenenkova, N.A. Mironova, G.A. Solovyova

HIGH-TEMPERATURE COATINGS FOR FIBERS SUBSTRATUM

Consideration high-temperature erosion and functional of coatings for heat-protection, heat-insulation and pack condense materials made of quarts, glass and metallic fibers, filamentary crystals and technology coatings.

Key words: *coating, erosion resistance, heat-resistance, tile, flexible insulation; high-temperature, thermal insulation materials; white and black coatings.*

Материалы на основе различных волокон широко используются в авиационной, космической и многих других современных отраслях промышленности. Наряду с определенными достоинствами указанных материалов – низкие теплопроводность и плотность, в ряде случаев они не могут применяться из-за недостаточной эрозионной стойкости, прочности, температуроустойчивости, поглощения воды и других жидкостей, загрязняются пылевидными частицами и др. Применение весьма разнообразных покрытий способствует устранению либо существенному уменьшению влияния негативных факторов на эксплуатационные свойства теплозащитных, теплоизоляционных, звукопоглощающих и уплотнительных материалов. Указанные направления работ представляются весьма перспективными [1–5].

Термоармирующие покрытия (ТАП). Синтез наноразмерных термоармирующих покрытий осуществляли на основе диоксида, карбида и нитрида кремния. Термоармирующие покрытия сложного состава получали в результате процесса пиролитического разложения керамических полимеров с добавками термодинамически устойчивых тугоплавких нанодисперсных кислородных и бескислородных соединений, а также по золь-гель технологии [6–8].

Характерной особенностью технологического процесса получения термоармирующих покрытий из полимерных предшественников является твердофазный синтез керамического регламентированного слоя на поверхности волокон по всему объему материала. В качестве основы для получения упрочненного теплозащитного материала использовались: супертонкие кремнеземные, кварцевые и карбидокремниевые волокна в виде тканей и формованных нетканых матов, для уплотнительных пористых истираемых материалов – дискретные металлические волокна из стали X18H9T.

Образцы из кварцевых волокон обладали малой плотностью (120 кг/м^3), низкой теплопроводностью (при температуре 20°C : $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; при 1200°C : $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$), хорошей стойкостью к химическому и биологическому воздействию, что важно для авиакосмической техники. Нанесение покрытия на стекловолоконистый материал осуществляли методом вакуумной и свободной инфильтрации. С целью достижения максимального содержания керамообразующего полимера и его равномерного распределения по объему микропористого материала исследовали влияние последовательности операций взаимодействия с растворами разной концентрации.

Плотность образцов после пяти циклов обработки возрастает в 4 раза по сравнению с плотностью исходных образцов. Установлено, что с увеличением концентрации рабочих растворов плотность образцов возрастает пропорционально концентрации растворов и также пропорционально замедляется рост плотности по мере увеличения числа циклов обработки. Максимальная плотность образцов составила $300\text{--}500 \text{ кг/м}^3$. Формирование ТАП проводили в несколько стадий: низкотемпературное гелеобразование; низкотемпературное отверждение; низкотемпературное и высокотемпературное отверждение. После отверждения образцы подвергали пиролизу. Формирование покрытия осуществляли как в инертной среде, так и на воздухе при атмосферном давлении. Выход пиролитического остатка составлял 83–89%.

Исследована температуроустойчивость и термостойкость образцов из теплозащитных материалов (ТЗМ) с ТАП и без покрытия при температуре 750°C и

выдержке 750 ч, а также при температурах 1000–1500°C и выдержке 2 ч. На образцах ТЗМ без покрытия после 300 теплосмен появились трещины. Образцы с ТАП были сняты с испытаний без каких-либо признаков разрушения после 750 теплосмен. Применение ТАП позволило повысить термостойкость ТЗМ на основе стеклянных и кварцевых волокон в 2,5 раза. Стеклокерамический материал с термоармирующим покрытием температуроустойчив при температуре 1200°C в течение 1000 ч, механическая прочность ($\sigma_{в.сж}$, $\sigma_{в.н}$) образцов возрастает в 2–4 раза. Применение ТАП на пористом (90%) истираемом волокнистом металлическом материале позволило повысить рабочую температуру от 900 до 1200°C, термостойкость – в 5-7 раз при теплосменах 1200↔20°C (один цикл: 10 мин), при стойкости к абразивному износу 1500 и соотношении износа уплотнительного материала к износу лопаток при врезании 5:1.

«Белое» эрозионностойкое покрытие для плиточной теплозащиты. При орбитальных полетах в околоземном космическом пространстве поверхность летательного аппарата подвергается воздействию всего спектра солнечного излучения – от ультрафиолетовой до инфракрасной области. Основная доля передаваемой тепловой энергии приходится на инфракрасную часть спектра солнечного излучения. Процессы испускания и поглощения лучистой энергии проходят одновременно и независимо друг от друга, т. е. все тела могут одновременно как излучать, так и поглощать падающее на них электромагнитное излучение.

Известны данные [9–12] о системе «белых» керамических покрытий для теплозащитных плиток аппарата «Спейс Шаттл». Покрытие состоит из оптически регулируемого подслоя и защитного наружного покрытия и имеет высокую излучательную способность и низкую величину отношения $\alpha_s/\varepsilon=0,35$. Введение оксида алюминия в покрытие системы «SiC–кварцевое стекло» снижает коэффициент поглощения солнечного излучения α_s с 0,5 до 0,3 без существенного влияния на излучательную способность. Добавки диоксида титана приводят к дальнейшему снижению величины α_s . В качестве пигментов с низкой поглощательной способностью в терморегулирующих покрытиях применяются оксид цинка и ортотитанат цинка. Сообщалось о применении покрытия на основе диоксида кремния с добавками борного ангидрида. Для улучшения отражающей способности в это покрытие также вводят оксид алюминия. При выборе материалов с высокой отражательной способностью необходимо учитывать особенности подложки, для которой это покрытие предназначено. Для обеспечения термостойкости покрытия должны иметь

температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к аналогичной характеристике подложки.

Основой для создания покрытий с высокой отражательной способностью для плиток из материала ТЗМК-10 могут служить кварцевое стекло (содержание диоксида кремния: 99,9% (по массе)) и высококремнеземные стекла. По справочным данным интегральный коэффициент поглощения в видимой области спектра для кварцевого стекла равен 0,05–0,2, а интегральная степень черноты при температурах 20–500°C составляет 0,93. Отсюда следует, что кварцевое стекло удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для покрытий с высокой отражательной способностью. Высококремнеземные стекла также удовлетворяют этим требованиям [13–15].

Исследования проводились на образцах размером 50×50×46 мм и плитках размером 150×150×46 мм из материала ТЗМК-10, изготовленного на НПО «Технология» по ТУ 1-696-68–80.

В работе использовали следующие материалы:

- кварцевое стекло с содержанием $\text{SiO}_2 > 99,96\%$ (ТУ ШЛО 027);
- высококремнеземное стекло ТСМ-514(ОП-3), ТУ 1-578.0021–80;
- боросиликатное стекло ЛК-5 (ГОСТ 13240–67);
- высококремнеземные стекла С-14 и ТСМ-548(ВКС-49)М;
- Na_2CO_3 ;
- фритта ЭВТ-80 (ТУ 21 УССР 7–80 №3).

Химический состав по ТУ применяемых компонентов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стекол

Материал	Содержание компонентов, % (по массе)							
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	BaO	M_xO_y
ТСМ-514(ОП-3)	94–96	3,5–6,0	до 0,4	0,1–0,5	–	–	–	–
ТСМ-548(ВКС-49)М	93±0,5	6,3±0,5	0,35±0,2	0,35 ^{+0,02} _{-0,05}	–	–	–	0,01
С-14	89,4±1	9,8±0,5	0,3±0,1	0,5±0,2	–	–	–	5
Фритта ЭВТ-80	40	30	–	–	7	3	20	–

В табл. 2 приведен химический состав высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М – по данным ВИАМ и завода-поставщика (разброс значений связан с различными методиками химического анализа).

Химический состав высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М

Методика	Содержание компонентов, % (по массе)				
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	M _x O _y
ВИАМ	91–92	7–9	0,4–0,6	0,29–0,41	0,01–0,02
Завода-поставщика	–	6–6,5	0,41–0,56	0,26–0,37	0,0045–0,017

Покрытие получали следующим образом. Стекло дробили в пресс-форме из стали, просеивали через сита с размером ячейки 2,5; 1,6; 0,5 мм. Измельчение стекла осуществлялось в фарфоровых барабанах на валковой мельнице со скоростью вращения валков 160 об/мин. Полученные порошки просеивали через капроновое сито с размером ячейки 84 мкм. Нанесение водных шликеров осуществлялось методом пульверизации с помощью краскораспылителя марки СО-71А. Расстояние от сопла пульверизатора до плитки составляло 100–150 мм. Перед нанесением шликеров грунтового и наружного покрытий навески порошков разводили дистиллированной водой и перемешивали на магнитной мешалке при скорости вращения 1000 об/мин в течение 5–10 мин. Сушка покрытия проводилась по двухступенчатому режиму:

- выдержка плиток с покрытием на воздухе в течение 30 мин;
- выдержка плиток с покрытием в сушильном шкафу при температуре 80–90°С в течение 30 мин.

Обжиг покрытия проводился в электропечах сопротивления. Плитки помещали на поддон из нержавеющей стали, выложенный блоками из материала ТЗМК во избежание попадания окалины. На первом этапе работ обжиг проводили под колпаком из кварцевого стекла или в контейнере из Ниасита.

При выборе материалов для создания покрытий с высокой отражательной способностью необходимо учитывать особенности подложки, для которой это покрытие предназначено. Это связано с различным содержанием основных компонентов в составе высококремнеземного стекла ТСМ-514(ОП-3). При увеличении содержания оксида кремния с 93 до 95%, уменьшении содержания борного ангидрида с 4–5 до 1%, получить влагозащитное покрытие не представлялось возможным. Основным направлением синтеза стало создание покрытия на основе высококремнеземных стекол, обладающих стабильным составом и теплофизическими характеристиками в широком температурно-временном интервале.

Исследовались следующие композиции:

– высококремнеземное стекло ТСМ-514(ОП-3) с добавками фритты ЭВТ-80, боросиликатного стекла ЛК-5 и др. Выбор фритты ЭВТ-80 и боросиликатного стекла ЛК-5 объясняется малым содержанием в их составе щелочных оксидов, а также относительно невысокой температурой начала размягчения стекол (700°C). При повышенных температурах указанные добавки интенсифицируют спекание частиц высококремнеземного стекла ТСМ-514(ОП-3);

– высококремнеземные стекла С-14 и ТСМ-548(ВКС-49)М, полученные путем варки в гарнисажных печах;

– модифицированное высококремнеземное стекло ТСМ-514(ОП-3).

Модифицирование стекла проводили по следующей технологической схеме: выщелачивание стекла в кислоте, промывка в дистиллированной воде, сушка, обработка пористого стекла водным раствором борной кислоты и азотнокислого калия, сушка при температуре 100–200°C, спекание при температуре 950–1150°C, помол в шаровой мельнице. Модификация высококремнеземного стекла ТСМ-514(ОП-3) ионами бора и калия снижает температуру начала размягчения на 150–180°C. Опробовано 12 партий легированного высококремнеземного стекла.

На остальных партиях модифицированного высококремнеземного стекла сформировать влагозащитные покрытия при указанных в табл. 3 режимах не удалось. Имело место растрескивание покрытия после обжига.

Таблица 3

Зависимость качества покрытий от режима обжига

Легированное стекло	Режим обжига		Наличие дефектов	Влаго-стойкость	Термостойкость при 30 циклах (20±800°C)
	Температура, °C	Продолжительность, мин			
ВКС-2	1250	30	Трещин нет	Удовлетворительная	Трещин нет
	1270	20			
ВКС-4	1250	30			
	1300	8			
ВКС-10	1250	30			
	1270	20			
	1300	6			

Исследовали возможность получения покрытия на основе стекла С-14 и композиций из высококремнеземного стекла ТСМ-514(ОП-3)+стекла С-14. К недостаткам покрытий на основе стекла С-14 относятся высокое значение ТКЛР и его

(стекла) склонность к образованию α -кристобалита в процессе обжига. Вследствие этого наблюдается образование трещин в покрытии после обжига.

К преимуществам покрытия на основе высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М следует отнести более низкую по сравнению с другими композициями температуру обжига.

При анализе микроструктуры покрытий выявлено, что покрытие на основе высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М, представляющее собой однокомпонентную систему, имеет однородную структуру с небольшим количеством пор, а наиболее неоднородную структуру с большим количеством пор – покрытие на основе высококремнеземного стекла ТСМ-514(ОП-3) с добавкой фритты ЭВТ-80.

Применение покрытия на основе высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М позволило повысить выход годного от 40 до 70%, а после уточнения технологии приготовления и нанесения покрытия – более 90%.

Исследован широкий комплекс свойств покрытия на основе высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М (табл. 4).

Таблица 4

Свойства покрытия ЭВС-4 на основе высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М

Свойства	Значения характеристик	
	по ТЗ	покрытия ЭВС-4
Рабочая температура, °С	От -130 до +800	От -130 до +800
Плотность покрытия, г/см ³	>2,2	1,8±0,1
Диапазон толщины, мм	0,3±0,1	0,3±0,1
Термостойкость по режиму 20↔800°С, цикл	105	105
Отношение α_s/ϵ	Не более 0,4	0,18
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	–	0,8–1,2

В результате проведенных исследований разработано «белое» эрозионностойкое влагозащитное покрытие для материала ТЗМК-10, отвечающее требованиям технического задания. Покрытию присвоена марка ЭВС-4, оно состоит из грунтового слоя и наружного слоя из высококремнеземного стекла ТСМ-548(ВКС-49)М-1.

Определены характеристики покрытия ЭВС-4: коэффициент поглощения солнечного излучения $\alpha_s=0,14-0,17$; отношение $\alpha_s/\epsilon=0,18$, термopрочность, коррозионная стойкость, предел прочности при растяжении, модуль упругости, грибостойкость, стойкость к радиационному излучению, диэлектрическая

проницаемость $\varepsilon=1,24$, тангенс угла диэлектрических потерь: $\operatorname{tg}\delta=0,011$ при $f=10$ Гц. Климатические испытания не выявили каких-либо повреждений покрытия.

Покрyтия для плиток из нитевидных кристаллов нитрида кремния. Среди композиционных материалов различного назначения особое место занимают легкие неметаллические теплозащитные материалы на основе керамических волокон. Они обладают комплексом ценных свойств: низкими плотностью и теплопроводностью, высокой термостойкостью. Такими материалами являются теплозащитные материалы, получаемые на основе нитевидных кристаллов нитрида кремния (Si_3N_4). В настоящее время нитрид кремния находит все более широкое применение в качестве основы для получения огнеупорных изделий в составе композиционных керамических материалов вследствие его тугоплавкости, высокой стойкости против тепловых ударов, достаточно высокой жаростойкости. Однако при высоких температурах нитрид кремния способен окисляться. При 1000°C в течение 3 ч кислород окисляет 14,71% порошка Si_3N_4 , при 1300°C : 23,6%. На воздухе окисление начинается при 1000°C – степень разложения порошка составляет 0,11%, далее до температуры 1400°C степень разложения возрастает на 0,2–0,3% каждые 100°C . На воздухе нитрид кремния окисляется с образованием SiO_2 и выделением N_2 . При нагревании нитрида кремния в вакууме в интервале температур $800\text{--}1200^\circ\text{C}$ происходит его диссоциация на Si и N_2 .

При определенных условиях нитрид кремния может быть получен в виде нитевидных кристаллов, которые по свойствам несколько отличаются от порошкообразного материала (табл. 5).

Таблица 5

Свойства нитрида кремния

Вид материала	Плотность, г/см ³	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
Порошок	3,19	–	460–480	2,75
Нитевидные монокристаллы	3,19	30–35	3800–5100	2,5–3,5

Из данных табл. 5 видно, что нитевидные кристаллы Si_3N_4 обладают высокой прочностью при растяжении и более высоким модулем упругости, чем порошкообразный материал. Кроме того, нитевидные кристаллы Si_3N_4 более устойчивы к окислению при высоких температурах. Такое сочетание свойств позволяет применять их для создания легких теплозащитных материалов.

В ВИАМ разработан теплозащитный материала марки ВТНК на основе нитевидных кристаллов Si_3N_4 с использованием в качестве связующего аморфного диоксида кремния. Материал ВТНК имеет следующие свойства:

Плотность, г/см ³	0,15;
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при температуре, °С:	
100	0,09;
800	0,05;
Предел прочности при сжатии, МПа	3,7–5,8;
Модуль упругости при сжатии, ГПа	240.

Наряду с комплексом ценных свойств для высокопористых теплозащитных материалов характерна низкая эрозионная устойчивость к воздействию газовых потоков и высокое водопоглощение. Этим вызвана необходимость разработки защитных покрытий.

Для теплозащитного материала ВТНК на рабочие температуры до 1300–1400°С разработано эрозионностойкое влагозащитное покрытие марки ЭВЧ-5.

Установлено, что при длительном обжиге покрытия на воздухе при высоких температурах в материале ВТНК развивается экзотермическая реакция окисления Si_3N_4 , что приводит к «прогарам» образцов. В связи с этим определены допустимые температурно-временные режимы формирования покрытий на образцах материала ВТНК в воздушной атмосфере: при 1000°С длительность выдержки не ограничена; при 1200°С за время выдержки до 7 мин заметных изменений в материале не происходит.

Исследовано влияние химического состава покрытий на их влагозащитные свойства при допустимых температурно-временных режимах формирования. При указанных режимах формирования влагозащитные покрытия получены на основе высококремнеземного и боросиликатного стекол и тетраборида кремния.

Установлено, что для приготовления покрытия ЭВЧ-5 необходимо использовать порошки высококремнеземного и боросиликатного стекол с содержанием частиц с диаметром до 10 мкм – не менее 45% (по массе), с диаметром 30–40 мкм – не более 5% (по массе). Наиболее существенное влияние на формирование слоя покрытия при напылении оказывают условия подачи шликера из краскораспылителя на образец. Получение влагозащитного покрытия обеспечивается нанесением шликера при помощи краскораспылителя с расходом шликера 2 см³/с. Рост величины этого параметра приводит к формированию более рыхлого слоя покрытия.

В интервале температур 350–1400°С покрытие имеет степень черноты выше 0,87.

Проведены испытания покрытия:

– на стойкость к циклическим воздействиям температуры и давления в условиях ЦАГИ. После 10 циклов испытания с максимальной температурой 1300°C разрушения покрытия не обнаружено;

– на эрозионную стойкость в воздушной плазме при температуре поверхности 1350°C;

– на температуроустойчивость в вакууме при остаточном давлении $133,3 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре 1300°C.

Установлено, что покрытие обладает удовлетворительной эрозионной стойкостью и температуроустойчивостью в вакууме.

Рентгенофазовый анализ показал, что в объеме покрытия присутствует незначительное количество тетраборида кремния, а в поверхностном слое практически весь тетраборид кремния окисляется при обжиге [16–18].

ЛИТЕРАТУРА

1. Solntsev St.S. High-Temperature Composite Materials and Coatings on the Basis of Glass and Ceramics for Aerospace Technics //Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. P. 992–1000.
2. 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.
3. Солнцев Ст.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.
4. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стеклокерамические покрытия и композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 359–368.
5. 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. 24–29.
6. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 12–19.
7. Солнцев Ст.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение. 1984. 255 с.
8. Солнцев Ст.С. Защитные покрытия металлов при нагреве. Справочное пособие. 2-е изд. М.: ЛИБРОКОМ. 2009. 248 с.
9. Larson H.K. et al. Environmental testing for evolution of Space Shuttle thermal protection materials and systems //NASA TM X-2273. 1973. P. 301–333.
10. Freedom J.F. Coating development of Martin Marietta's reusable surface insulation (MAR-SI) for Space Shuttle applications /In: 18-th National SAMPE symposium and exhibition «New-horizons in materials and processing». 1973. P. 457–470.
11. Garofalini S.H., Banas R., Creedon J. Development of high viscosity coatings for advanced Space Shuttle applications /In: Proceedings of 11-th National SAMPE technical conference. Boston. 1979. P. 114–124.
12. Fletcher J.C. et al. Reaction cured glass and glass coatings: pat. 4093771 USA; опубли. 06.06.1978.
13. Солнцев Ст.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные

труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 90–99.

14. 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. №5. С. 380–385.
15. 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.
16. Шалин Р.Е., Солнцев Ст.С., Берсенев А.Ю. Исследование свойств покрытий плиточной теплозащиты для воздушно-космических летательных аппаратов /В сб. трудов первой Международной авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос». М.: Российская инженерная академия. Секц. «Авиакосмическая». 1995. Т. 5. С. 240–249.
17. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Теплозащитный материал с использованием оксидных армирующих наполнителей //Авиационные материалы и технологии. 2008. №4. С. 13–16.
18. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Каримбаев Т.Д., Даньшин К.А. Квазипластичные высокотемпературные углеродкерамические нанокompозиты для «горячих» деталей авиационных двигателей /В сб. Авиадвигатели XXI века. Материалы конф. М.: ЦИАМ. 2010. С.722–724.