

УДК 666.266.6

Г.А. Малинина¹, С.С. Солнцев¹, В.С. Денисова¹**ВЛИЯНИЕ НЕОКСИДНЫХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА
СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-109-117

Представлен обзор научно-технической литературы, в котором приведены примеры усовершенствования покрытий на основе стекла путем введения неоксидных модифицирующих добавок. Рассмотрены основные группы химических соединений, которые используются для улучшения свойств стеклокерамических покрытий. К таким веществам можно отнести соединения на основе бора, кремния и редкоземельных металлов. Сделан вывод, что эти добавки положительно влияют на следующие свойства покрытий: термостойкость, жаростойкость, механическую прочность, температуру формирования покрытия, температурный коэффициент линейного расширения и прочность сцепления с защищаемым материалом.

Ключевые слова: *стеклокерамические покрытия, модифицирующие добавки, борид, силицид, лантан, жаростойкость, формирование покрытия.*

G.A. Malinina¹, S.S. Solntsev¹, V.S. Denisova¹**INFLUENS OF NON-OXID ADDITIVS ON THE PROPERTIES
OF GLASS-CERAMIC COATING FOR PARTS
MADE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS (review)**

A review of the scientific and technical literature is presented, which provides examples of improving glass-based coatings by introducing non-oxide modifying additives. The main groups of chemical compounds that are used to improve the properties of glass-ceramic coatings are considered. Such substances include compounds based on boron, silicon and rare earth metals. It is concluded that these additives have a positive effect on the following properties of coatings: heat resistance, heat resistance, mechanical strength, coating formation temperature, temperature coefficient of linear expansion and adhesion strength to the protected material.

Keywords: *glass-ceramic coatings, modifying additives, boride, silicide, lanthanum, heat resistance, formation of the coating.*

¹Федеральное 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

Введение

Современное развитие авиастроения требует создания и внедрения двигателей нового поколения. Все более повышаются требования к новым материалам для авиационной промышленности.

Для защиты металлических деталей газотурбинных двигателей (ГТД) от высокотемпературной газовой коррозии используются защитные стеклокерамические покрытия, которые зарекомендовали себя как эффективное средство для защиты деталей и узлов из жаропрочных сплавов в условиях агрессивной среды при температурах до 1100 °С [1–3].

Необходимо усовершенствование составов и технологий производства современных защитных покрытий, что позволит исключить разупрочнение и деформацию защищаемых материалов, а также повысить эксплуатационные свойства покрытий.

Широкое распространение жаростойких стеклокерамических покрытий в авиакосмической технике обусловлено рядом преимуществ: технологичностью и отработанностью методов их нанесения, высокой прочностью сцепления с защищаемыми материалами, отсутствием пористости и исключением диффузии компонентов из газовой среды к сплаву и из сплава в покрытие, ремонтоспособностью и невысокой стоимостью. Преимущества шликерно-обжиговой технологии нанесения позволяют наносить покрытия на крупногабаритные детали сложной формы.

Традиционные стекла, используемые для изготовления серийных эмалевых покрытий, характеризуются снижением вязкости при повышении температуры и способностью к обратимым переходам из твердого состояния в жидкое и обратно. Для того чтобы покрытия на основе стекла могли работать при высоких температурах в агрессивной среде, применяются модифицирующие добавки.

Необходимо рассмотреть возможность усовершенствования жаростойких покрытий на основе стекла путем введения в их состав неоксидных добавок [4, 5].

Основы формирования высокотемпературных покрытий

Защитные покрытия, работающие в условиях высоких температур, получают в результате сложных химических превращений, протекающих как последовательно, так и параллельно.

Процесс протекает по механизму спекания в присутствии жидкой фазы, представляющей собой расплавленное стекло. При этом твердая фаза (силикаты, оксиды металлов подложки и др.) частично растворяется в жидкой. Заключительная стадия протекает по механизму твердофазного спекания.

Обязательными условиями формирования однородного прочного слоя покрытия, хорошо сцепленного с подложкой, являются:

- растворимость кристаллической фазы в стеклофазе;
- хорошая смачиваемость кристаллической фазы;
- растекаемость расплава по поверхности защищаемого материала;
- регламентированный размер частиц исходных компонентов;
- правильное соотношение стеклообразного сырья и добавок, а также однородность состава [5, 6].

Неоксидные модифицирующие добавки

Бескислородные стеклокерамические материалы применяют в теплонагруженных узлах и конструкциях в металлургии, авиакосмической и ядерной промышленности [5–7].

Следует рассматривать вещества, обладающие достаточной химической и термической стойкостью. Как правило, это соединения кремния, бора, редких и редкоземельных металлов (РЗМ). В основе таких соединений лежат ковалентные химические связи, что обеспечивает твердость, жаропрочность и стойкость к окислению. Данные материалы достаточно эффективно защищают поверхность от агрессивной кислородсодержащей среды в условиях высоких температур.

Рассматриваемые вещества могут быть исследованы в качестве неоксидных модифицирующих добавок в составе стеклокерамических покрытий для придания им необходимых эксплуатационных свойств [7].

Часто в качестве таких добавок используют силициды металлов, известные своей способностью сопротивляться окислению в кислородной среде вплоть до температуры 1500 °С. Наиболее хорошо изучен дисилицид молибдена (MoSi_2) [8–12].

Благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокие жаростойкость и коррозионная стойкость, дисилицид молибдена и материалы на его основе получили широкое распространение в огнеупорной, химической и электротехнической промышленности.

Не менее широкое распространение получили высокотемпературные керамические материалы на основе боридов циркония, гафния и кремния. Такие материалы устойчивы к окислению в условиях высоких температур и агрессивной среды и могут быть использованы в теплонагруженных элементах ГТД. С целью защиты боридов тугоплавких металлов от окисления их комбинируют с силицидами металлов.

Тетраборид кремния (SiB_4) является перспективным материалом для применения в составе композиционных высокотемпературных материалов и покрытий. Введение тетраборида кремния SiB_4 в состав эрозионностойких покрытий для теплозащиты отечественного орбитального корабля «Буран» позволило обеспечить их высокие эрозионную стойкость, температуроустойчивость и отражательную способность. Актуальным направлением в области создания высокотемпературных покрытий является разработка и исследование жаростойких покрытий с добавками тетраборида кремния SiB_4 для защиты жаропрочных никелевых сплавов. Тетраборид кремния имеет относительно высокую температуру плавления и низкую теплопроводность, что делает возможным его введение в покрытия, работающие в условиях высоких температур [13–20].

Лантан считается одним из наиболее распространенных редкоземельных элементов. На основе его солей (чаще всего хромата и алюмината) создаются высокотемпературные керамики. Для придания ему определенных свойств используется допирование солями или оксидами других РЗМ. Зачастую применению таких компонентов препятствует их высокая стоимость.

Силициды

Дисилицид молибдена представляет огромный интерес как перспективный высокотемпературный материал для развития композиционных материалов и покрытий. Из него изготавливают лопатки газовых турбин и сопла ракет. Благодаря инертности к окислителям при высоких температурах, дисилицид молибдена MoSi_2 используют для нанесения защитных слоев на тугоплавкие металлы с целью предотвращения их окисления.

Однако недостаточно высокие прочностные свойства дисилицида молибдена при высоких температурах не позволяют считать его конструкционным материалом в чистом виде. Тем не менее материалы на его основе способны сохранять коррозионную стойкость в агрессивной газовой среде при температурах до 1600–1700 °С. При этом дисилицид молибдена MoSi_2 может длительное время оказывать сопротивление действию коррозии благодаря образованию на поверхности устойчивой оксидной пленки. Именно свойства пленки определяют температуру и продолжительность эксплуатации изделий из композиционных материалов на его основе. Однако и дисилицид молибдена подвергается низкотемпературному окислению в интервале температур от 500 до 800 °С. Это связано с тем, что защитная пленка еще не успела сформироваться и поверхность разрушается с образованием оксида молибдена (MoO_3) [8–9].

Дисилицид молибдена, стойкий к воздействию высоких температур, имеет гексагональную структуру. Связи между атомами Mo и Si гораздо прочнее, чем между Si и Si.

Исследования фазового состава и свойств композиционных материалов на основе SiC/MoSi_2 показывают, что эти материалы обладают мелкозернистой структурой и проявляют высокие прочность при изгибе и трещиностойкость, по сравнению с монолитным MoSi_2 . При этом установлено, что карбид кремния и дисилицид молибдена присутствуют в составе композита в виде самостоятельных фаз, наблюдаются также следовые количества фазы $\text{Mo}_{4,8}\text{Si}_3\text{C}_{0,6}$ [10].

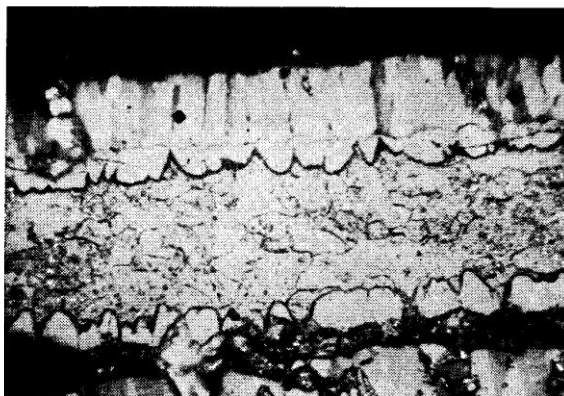


Рис. 1. Микроструктура ($\times 340$) слоя дисилицида молибдена гексагональной структуры на молибдене – сверху вниз: MoSi_2 , Mo_3Si и Mo [11]

Дисилицид молибдена известен именно тем, что до температур 1500–1800 °С материалы на его основе очень хорошо противостоят газовой коррозии в окислительных средах. Однако при более высоких температурах другие силициды оказываются не менее, а иногда и более устойчивыми к окислению. Кроме того, введение в состав, наряду с молибденом, более тугоплавкого вольфрама позволяет управлять такими важными свойствами, как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), сопротивление коррозии при различных температурах, механические свойства и т. д. В частности, возможно включение и силицида молибдена, и силицида вольфрама в состав композиционного материала. Такой материал обладает высокой стойкостью к термоударам, а также выдерживает большее количество циклов термоциклирования.

Композиционные материалы на основе систем Mo-W-Si и Mo-W-Si-C используются в качестве защитных покрытий на жаропрочных сплавах, углеродных и карбидокремниевых материалах, а также как высокотемпературный припой для соединения указанных материалов в любых сочетаниях.

Для возможности оценки особенностей включения силицидов в стекломатериалы на боросиликатной основе следует рассмотреть взаимодействия в системе Mo-Si-B . Многофазные сплавы данной системы имеют в основе фазы Mo_5SiB_2 , Mo и Mo_3Si . Благодаря этому материал обладает высокими температурой плавления, стойкостью к окислению и механической прочностью. Высокотемпературное окисление системы Mo-Si-B происходит в две основные стадии. Большое значение имеет первая из них – переходная, характеризующаяся испарением летучего оксида молибдена MoO_3 , который выделяется при окислении молибденосодержащих фаз. Для того чтобы улучшить свойства материалов на основе системы Mo-Si-B , необходимо минимизировать переходную стадию. Для этого разработана стратегия кинетического смещения, позволяющая использовать реакции между различными фазами для получения полезных продуктов реакции и композиций сплавов, которые эволюционируют в направлении устойчивого состояния совместимой системы.

В то время как среда горения содержит водяной пар, который может ускорить разрушение покрытий на основе кремнезема, покрытия на основе системы Mo-Si-B обеспечивают устойчивость к окислению в водяном паре и воздействию температур до 1500 °С [11, 12].

Бориды

Во ФГУП «ВИАМ» накоплен огромный опыт в области разработки защитных покрытий. Такие покрытия применялись в конструкции космического корабля «Буран». Коллективом сотрудников института разработаны технологии изготовления эрозионностойких покрытий на основе высококремнеземистых стекол и тетраборида кремния. Такие покрытия впоследствии названы реакционноотверждаемыми, так как

формируются при температурах, близких к рабочим. Это обусловлено использованием добавки тетраборида кремния – тугоплавкого химического соединения, которое при термообработке окисляется с образованием боросиликатного стекломатериала [13–15].

В работе [16] впервые рассмотрены процессы реакционного отверждения покрытий. В качестве модифицирующей добавки используется тетраборид кремния (SiB_4). Рассматривались также гексаборид кремния, бор, а также силициды бора и их смеси. Окисление SiB_4 происходит с образованием оксидов кремния и бора.

Установлено, что формирование таких покрытий в значительной мере обусловлено активным взаимодействием оксидов стеклофазы с тетраборидом кремния. Формирование жидкой фазы, в частности в композиционных материалах и покрытиях, при введении тетраборида кремния SiB_4 может способствовать самозалечиванию трещин при термической обработке. Полученные покрытия обеспечивают надежную защиту деталей из жаропрочных сплавов.

Установлено, что ведение в состав стеклокерамического покрытия тетраборида кремния позволяет снизить температуру формирования этого покрытия [17–18].

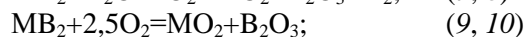
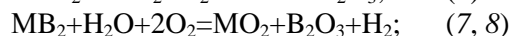
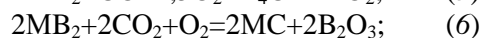
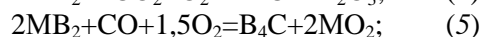
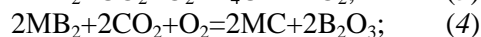
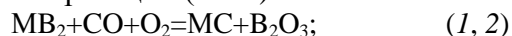
Известен также способ получения керамики на основе тетраборида кремния SiB_4 с использованием пропитки аморфного бора расплавом кремния [19]. Такой материал получается практически беспористым, имеет высокие плотность, твердость и трещиностойкость. На примере данного исследования продемонстрирована устойчивость Si/B-фаз в области высоких температур и давлений.

Данные сканирующей электронной микроскопии образцов таких керамик показывают: для состава тетраборида кремния, независимо от давления, образуется широкая область гомогенности ($\text{Si}_{1,1}\text{B}_{4,0}$; $\text{Si}_{1,2}\text{B}_{4,0}$; $\text{Si}_{1,4}\text{B}_{4,0}$; $\text{Si}_{1,45}\text{B}_{4,0}$), а содержание кремния в различных образцах для фазы SiB_4 может изменяться в интервале от 39,3 до 48,0% (по массе).

Изучение образцов покрытий на основе стеклофритты и тетраборида кремния показывает, что шероховатость верхнего слоя покрытия значительно уменьшается по мере увеличения процентного содержания тетраборида кремния SiB_4 в составе. Такой эффект достигается в результате окисления тетраборида кремния и формирования новой легкоплавкой боросиликатной фазы, которая является промежуточной в формировании покрытий. Получение высоких эксплуатационных свойств обусловлено формированием структуры, не характерной для высокотемпературных силикатных эмалей, которая является результатом химических реакций окисления и стеклообразования отдельных компонентов материала, компонентов между собой и кислородом воздушной среды. Представленные данные указывают на перспективность применения тетраборида кремния в качестве модифицирующей добавки для достижения высокого уровня эксплуатационных характеристик для различных покрытий [19–21].

Керамика на основе диборида циркония (ZrB_2) и диборида гафния (HfB_2) отличается стойкостью к окислению при высоких температурах. Однако по отдельности эти соединения по окислительной стойкости уступают керамике на их основе. Например, при легировании боридов, в частности ZrB_2 , дисилицидом молибдена жаростойкость материала повышается [22].

На рис. 2 показано, что термодинамический потенциал реакций окисления тетраборида гафния и тетраборида циркония <0 , что свидетельствует о высокой вероятности протекания данных реакций (1–10):



где М – это Zr или Hf.

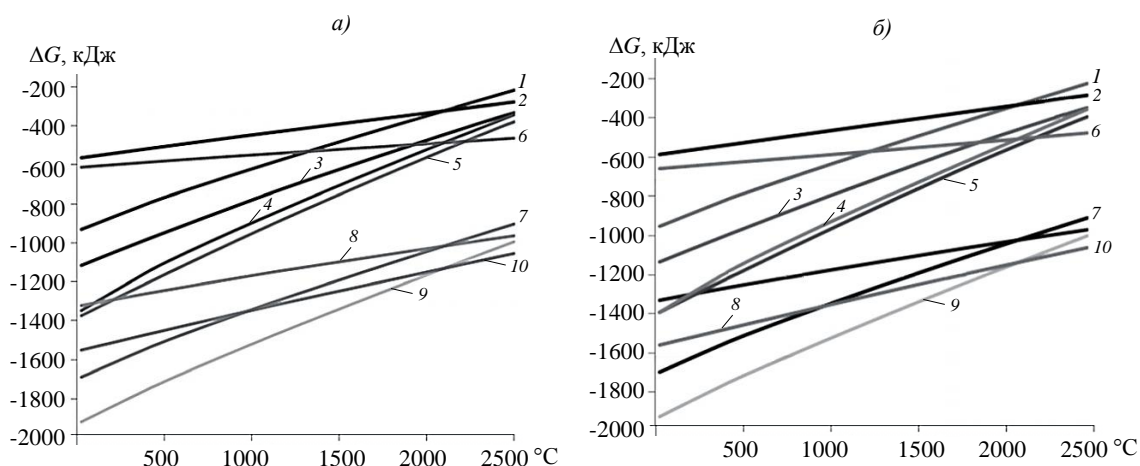


Рис. 2. Зависимости термодинамического потенциала реакций окисления диборида циркония (а) и диборида гафния (б) от температуры [23]

Наиболее вероятными выглядят реакции окисления диборидов кислородом – (9) и (10), протекающие с образованием оксида циркония (ZrO_2) или оксида гафния (HfO_2) и оксида бора (B_2O_3) [23]. В стеклокерамическом покрытии на основе боросиликатных стекол оксид гафния HfO_2 и оксид циркония ZrO_2 будут образовывать кристаллическую фазу, а оксид бора B_2O_3 войдет в состав стеклофазы, снижая ТКЛР такого покрытия.

Соединения лантана

Соединения лантана являются чрезвычайно тугоплавкими и химически стойкими. Керамика на их основе используется в различных областях производства и отличается высокими термостойкостью и химической стойкостью, а также низкой пористостью. Наиболее известными являются керамические материалы на основе хромитов и алюминатов лантана.

Соединения лантана имеют уникальное свойство менять электрическое сопротивление с изменением температуры. Введение их в состав стеклокерамических покрытий позволяет сочетать положительные свойства стеклоэмалей и керамики [24, 25].

На рис. 3 представлена плотная микроструктура керамического материала на основе алюминатов лантана и гадолиния, выполненная с использованием сканирующего электронного микроскопа.

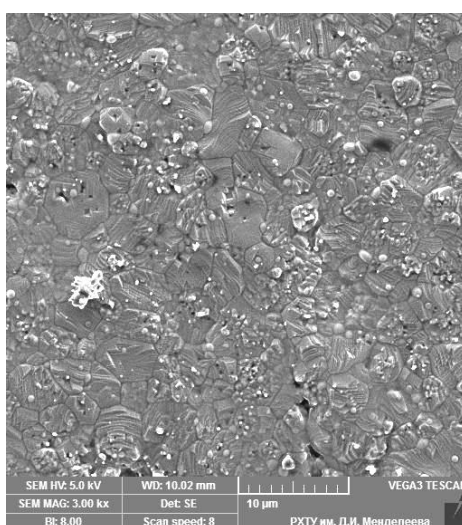


Рис. 3. Микроструктура поверхности керамического материала на основе алюминатов лантана и гадолиния $La_{0,6}Gd_{0,4}AlO_3$ [25]

Необходимо также упомянуть цирконаты и гафнаты РЗМ, имеющие структуру пироклора (например, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), поскольку они термически стабильны вплоть до температуры плавления ($\sim 2300^\circ\text{C}$) и обладают крайне низкой теплопроводностью и высокой коррозионной стойкостью.

Не менее перспективными материалами считаются флюориты (например, $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$), перовскиты (например, SrZrO_3) и сложные шпинели (например, $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$). При введении этих веществ в стеклоэмалевые покрытия они образуют кристаллическую фазу, устойчивую к окислению и механически прочную [26–29].

Алюминид никеля

Покрытия на основе интерметаллидов широко применяются в разных отраслях промышленности. Они способны работать в условиях высоких температур и агрессивной среды. Обычно в составе таких покрытий используют интерметаллидные сплавы на основе фаз покрытий – Ni_3Al и NiAl . Покрытие на основе Ni_3Al работает при температурах до 1100°C . В качестве покрытий на углеродистых сталях используются сплавы систем Al-Cr и Al-Cr-Ni , а на деталях из литейных никелевых сплавов – систем Ni-Cr-Al , Ni-Cr-Al-Y и Ni-Cr-Al-W-Si-C .

Однако алюминид никеля, как и другие интерметаллиды, подвержен охрупчиванию в широком диапазоне температур, что сильно ограничивает область его применения [30, 31].

Известны случаи включения интерметаллидных модифицирующих добавок в стеклокерамические покрытия. Введение модификаторов позволяет достичь высокой термостойкости, однако негативно сказывается на технологических свойствах покрытия, в частности на температуре формирования и прочности сцепления с защищаемым материалом [32, 33].

Заключения

Описано несколько групп веществ, которые могут быть введены в состав высокотемпературных стеклокерамических покрытий в качестве модифицирующих добавок. На основании данных научно-технической литературы можно сделать вывод о целесообразности применения неоксидных модифицирующих добавок при разработке защитных стеклокерамических покрытий.

Одной из наиболее перспективных добавок, при введении которой возможно значительно повысить рабочую температуру стеклокерамических покрытий, является дисилицид молибдена. Однако с повышением рабочей температуры также повышается температура обжига, что нежелательно. Введение в состав тетраборида кремния позволяет не только увеличить рабочую температуру покрытия, но и уменьшить температуру его формирования и таким образом исключить вероятность коробления металла подложки.

Использование соединений лантана и других редкоземельных элементов в научно-технической литературе встречается сравнительно редко, однако их свойства представляют интерес для дальнейших исследований.

В целом очевидно положительное влияние неоксидных добавок на жаростойкость, защитные свойства и механическую прочность полученных материалов. Кроме того, применение модифицирующих добавок позволяет повысить такие свойства покрытия, как температура формирования, ТКЛР, электропроводность и прочность сцепления с защищаемым материалом.

Библиографический список

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. Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. Тугоплавкие сплавы для авиационной техники // Труды ВИАМ. 2016. №10 (46). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5.
3. 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. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 23.11.2020).
4. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
5. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
7. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. №8 (68). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
8. Wang G., Jiang W., Bai G., Wu Li. Effect of Addition of Oxides on Low-Temperature Oxidation of Molybdenum Disilicide // Journal of American Ceramics Soc. 2003. Vol. 86. No. 4. P. 731–734.
9. Титов Д.Д., Каргин Ю.Ф., Попов Н.А., Лысенков А.С. Новые композиционные материалы на основе дисилицида молибдена // Перспективные материалы. 2011. №S13. С. 493–499.
10. Han X., Wang Y.-L., Xiong X., Li H. Microstructure, sintering behavior and mechanical properties of SiC/MoSi₂ composites by spark plasma sintering // Transaction of Nonferrous Metals Society of China. 2018. No. 28. P. 957–965. DOI: 10.1016/S1003-6326(18)64730-2.
11. Гнесин И.Б. Экспериментальное исследование структуры и свойств твердых растворов силицидов молибдена и вольфрама и их применение: дис. ... канд. техн. наук. Черноголовка: Институт физики твердого тела РАН, 2005. 24 с.
12. Гнесин И.Б., Гнесин Б.А., Некрасов А.Н. Исследование влияния примеси углерода на микротвердость, химический и фазовый составы двойных силицидных эвтектик Me₅Si₃–MeSi₂ системы Mo–W–Si на литых образцах // материаловедение. 2008. №8. С. 21–35.
13. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
14. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
15. Каблов Е.Н., Солнцев С.С. Окситермосинтез – новый шаг к материалам для перспективной авиакосмической техники // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 131–137.
16. Goldstein H.E., Leiser D.B., Katvala V. Reaction cured borosilicate glass coating for low density fibrous silica insulation // Borate Glasses. Materials science research: plenum press. New York; London, 1978. Vol. 12. P. 623–634.
17. Goldstein H.B. et al. Reaction cured borosilicate glass coating for low-density fibrous insulation // Borate glasses. Structure, properties, application: plenum press. New York, 1978. P. 623–634.
18. Garofalini S.H., Banas R., Creedon J. Development of high viscosity coatings for advances Space Shuttle application // 11th National SAMPE technical conference. Boston, 1979. P. 114–124.
19. Стратийчук Д.А. Пропитка аморфного бора расплавом кремния в условиях высоких давлений и температур // Доповіді Національної академії наук України. 2011. №3. С. 94–99.
20. Matsushita J., Komarneni S. High temperature oxidation of silicon hexaboride ceramics // Materials Research Bulletin. 2001. Vol. 36. No. 5–6. P. 1083–1089.
21. Tong Ch., Cheng L., Yin X. et al. Oxidation behavior of 2D C/SiC composite modified by SiB₄ particles in inter-bundle pores // Composites Science and Technology. 2008. Vol. 68. P. 602–607.

22. Прямилова Е.Н., Лямин Ю.Б. Ультравысокотемпературная керамика на основе боридов // Сборник материалов V Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Суздаль, 6–10 окт. 2014 г.). Суздаль, 2014. С. 447–448.
23. Прямилова Е.Н., Пойлов В.З., Лямин Ю.Б. Термохимическая стойкость керамики на основе боридов циркония и гафния // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. №4. С. 55–67.
24. Мазилин И.В., Балдаев Л.Х., Дробот Д.В., Ахметгареева А.М., Жуков А.О., Хисматуллин А.Г. Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана // Перспективные материалы. 2013. №7. С. 21–30.
25. Меркушкин А.О., Зо Е Мо У. Получение и свойства керамики из алюминатов лантана и гадолиния // Scientific Researches and Their Practical Application. 2012. Т. 32. №3. С. 8–9.
26. Стефановский С.В., Стефановская О.И., Семенова Д.В. Фазовый состав и структура стекломатериалов на натрийалюмофосфатной основе, содержащих оксиды редкоземельных элементов // Радиоактивные отходы. 2018. №1 (2). С. 97–101.
27. Galasso F.S. Structure, properties and preparation of perovskite-type compounds. Oxford: Pergamon Press, 1969. 209 p.
28. Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Влияние оксида лантана на свойства химически стойкой керамики, получаемой с использованием гальванического шлама // Международный научно-исследовательский журнал. Сер.: Технические науки. 2019. №10. С. 35–39. DOI: 10.23670/IRJ.2019/88/10/006.
29. Дудкин Б.Н., Бугаева А.Ю., Зайнуллин Г.Г. Особенности спекания ксерогеля состава «гексаалюминат лантана – оксид иттрия», полученного золь-гель способом // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. №2. С. 19–24.
30. Пячин А.С., Ершова Т.Б., Бурков А.А., Власова Н.М., Комарова В.С. Использование алюминидов титана для создания электроискровых покрытий // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. Известия вузов. 2015. №1. С. 55–61.
31. Карашаев М.М., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н. О технологических подходах к созданию композиционных материалов на основе моноалюминида никеля NiAl (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. №12 (84). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-55-66.
32. Баньковская Н.В. Создание нового поколения высокотемпературных стеклокерамических композиций и исследование их физико-химических свойств: дис. ... д-ра хим. наук. СПб.: Ордена Трудового Красного Знамени Институт силикатов имени И.В. Гребенщикова Российской академии наук, 2006. 297 с.
33. Васнев В.В. Разработка композиционных материалов на основе систем Al–Si–Ni с низким значением ТКЛР и технологии получения полуфабрикатов для изделий ракетно-космической техники: дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский институт авиационных материалов, 2017. 135 с.