

УДК 666.293.52:537.226.2

В.С. Денисова<sup>1</sup>, Г.А. Соловьева<sup>1</sup>**ЖАРОСТОЙКОЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ  
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ  
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-18-22

*Разработана технология получения жаростойкого стеклокерамического покрытия на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  и модифицирующих соединений для защиты от высокотемпературной газовой коррозии элементов камеры сгорания из высокожаропрочного сплава ВЖ171. Исследованы основные свойства жаростойкого стеклокерамического покрытия: прочность сцепления, термостойкость, жаростойкость. Показана эффективность защитного действия покрытия при рабочих температурах 1100–1150°C. Жаростойкое стеклокерамическое покрытие отличается технологичностью и не требует использования сложного оборудования.*

*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:** термостойкость, жаростойкость, покрытие, никелевый сплав, высокотемпературная газовая коррозия, стекло.

*The technology of fabrication of heat-resistant glass-ceramic coating based on glass frit in system  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  and modifying additives for protection of combustion chambers made of high-strength alloy VZH171 was obtained. Main properties of heat resistant glass-ceramic coating were investigated, e.g. bonding strength, thermal stress resistance, heat resistance. The efficiency of coating protection at 1100–1150°C was shown. Heat-resistant glass-ceramic coating is notable by its manufacturability and requires no complex equipment.*

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

**Keywords:** thermal stress resistance, heat resistance, coating, nickel alloy, hot corrosion, glass.

<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

**Введение**

В настоящее время прогресс в авиастроении во многом обусловлен свойствами материалов, используемых в конструкции летательных аппаратов [1, 2].

При эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) основным повреждением поверхности деталей (камер сгорания, форсажных камер, жаровых труб и др.) является высокотемпературная газовая коррозия, которая сопровождается процессом образования на поверхности металлов окислы, состоящей из фаз переменного состава, а также рыхлых подокисленных слоев и зон внутреннего окисления, что вызывает существенное изменение химического состава и снижение прочностных характеристик сплавов [3]. Потеря прочности сплавов происходит под действием как поверхностной, так и межкристаллитной коррозии. Для защиты поверхностей деталей из жаропрочных никелевых сплавов и коррозионноустойчивых сталей от высокотемпературной газовой коррозии при-

меняются жаростойкие эмалевые покрытия практически на всех отечественных авиационных ГТД. Высокая эффективность защитного действия жаростойких эмалей подтверждается многолетней практикой эксплуатации деталей камер сгорания, форсажных камер авиационных двигателей. Работоспособность и надежность камер сгорания ГТД обеспечиваются благодаря использованию высокотемпературных эмалевых покрытий [4].

В конструкции камер сгорания современного модифицированного двигателя ВК-2500М используется высокожаропрочный свариваемый деформируемый сплав ВЖ171 на основе системы Ni-Co-Cr [5, 6]. Для обеспечения надежной длительной эксплуатации теплонагруженных деталей камер сгорания разработано жаростойкое стеклокерамическое покрытие на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  и модифицирующих соединений, а также технология его получения. Высокий уровень эксплуатационных

характеристик жаростойкого покрытия достигнут путем оптимизации химического состава и технологии получения покрытия.

К жаростойким эмалевым покрытиям, предназначенным для защиты деталей ГТД при температурах 1000°C и выше, предъявляется ряд требований [7–11]. Так, жаростойкие покрытия должны иметь прочное сцепление с металлической подложкой, отличаться газоплотностью и стойкостью к газовой коррозии при высоких температурах.

Одним из способов увеличения термостойкости и жаростойкости покрытий является создание многофазной структуры повышенной вязкости, что позволяет получать стеклокерамические покрытия. В состав покрытий, основой которых являются тугоплавкие фритты, вводят модифицирующие керамические наполнители, способствующие повышению общей тугоплавкости системы покрытия.

Разработанное жаростойкое стеклокерамическое покрытие на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  и модифицирующих соединений имеет высокую прочность сцепления со сплавом ВЖ171, повышенные значения термостойкости и жаростойкости при температуре 1100°C, а также отличается технологичностью и не требует использования сложного оборудования при получении. Высокие защитные свойства жаростойкого стеклокерамического покрытия при температурах 1100–1150°C обеспечиваются оптимизацией химического состава и регулированием соотношения количества кристаллической и стеклообразной составляющих. Разработанное покрытие также отличается широким интервалом обжига, что важно при эмалировании крупногабаритных деталей.

Опытно-технологическое опробование жаростойкого стеклокерамического покрытия на узлах жаровой трубы из сплава ВЖ171 и дальнейшие высокотемпературные испытания свидетельствуют об эффективности использования жаростойкого покрытия для защиты сплава ВЖ171 и его технологичности, обеспечивающей возможность изоляции зон секций жаровой трубы для дальнейшей сварки.

#### Материалы и методы

Синтез фритты системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  проводили в высокотемпературной печи в корундовых тиглях при температуре >1500°C. Качество стекломассы контролировали путем вытягивания нити. Готовую фритту получали путем грануляции в воде. Контроль качества готовой фритты производили визуально – на предмет отсутствия непровара и шихтовых включений.

Шликер жаростойкого стеклокерамического покрытия изготавливали путем совместного мокрого помола синтезированной фритты и модифицирующих соединений до определенного размера частиц. Размер частиц контролировали с помо-

щью ситового анализа. Для получения необходимых реологических свойств водной суспензии шликера покрытия проводили старение суспензии в течение 24 ч. Водную суспензию шликера наносили на образцы из сплава ВЖ171 методом распыления. Обжиг образцов с нанесенной суспензией проводили в лабораторной печи. Контроль качества проводили визуально – покрытие должно быть сплошным, плотным, без дефектов и непокрытых мест. Для оценки прочности сцепления использовали копер для стандартного удара образцов с покрытием тарированным бойком заданной массы. Одновременное действие удара и деформации металла может приводить к скалыванию покрытия. Чем меньше площадь скола на эмалированной поверхности образца, тем выше сцепление покрытия с металлом. Термостойкость жаростойкого стеклокерамического покрытия при температуре 1100°C определена по ГОСТ 25535–82. Жаростойкость покрытия также оценивали при температуре 1100°C, при этом критерием оценки служила длительность выдержки образцов при указанной температуре до появления дефектов покрытия. Проведен рентгеноструктурный анализ шликера жаростойкого стеклокерамического покрытия после термообработки при рабочей температуре с помощью дифрактометра D/MAX-2500 с последующей расшифровкой с помощью специализированной программы и базы данных.

#### Результаты и обсуждение

Жаростойкие эмалевые покрытия получают по шликерно-обжиговой технологии, разработанной на основе физико-химических процессов при получении водных суспензий (шликеров), путем нанесения их на защищаемые сплавы и последующего высокотемпературного обжига [12–16].

При разработке технологии получения жаростойкого стеклокерамического покрытия одним из главных направлений исследований является выявление зависимости эффективности его защитного действия при длительной эксплуатации при повышенных температурах от технологических параметров получения, нанесения и формирования.

Основа жаростойкого стеклокерамического покрытия – фритта системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$ . Синтез фритты проводили путем изготовления шихты и последующей плавки в высокотемпературной печи при температуре >1500°C. Основным требованием к качеству исходной шихты для варки фритты является однородность и определенный гранулометрический состав, так как крупные фракции имеют недостаточно развитую реакционную поверхность и затрудняют процесс варки. С другой стороны, очень мелкие фракции имеют склонность к агрегации и пылению на этапе подготовки шихты. Степень химической однородности шихты зависит от технологических параметров ее подготовки. Готовую фритту получали

путем грануляции расплава в воде. Контроль качества готовой фритты производили визуально – на предмет отсутствия непровара и посторонних включений. Установлено, что варка фритты при температуре  $>1500^{\circ}\text{C}$  является основным условием получения качественной фритты без нежелательных шихтовых включений и дефектов стекломассы. Для повышения высокотемпературной вязкости и температуры размягчения стеклофритты целесообразно использование оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  как в качестве компонента стеклофритты, так и модифицирующего тугоплавкого наполнителя. В качестве тугоплавкого модифицирующего наполнителя в составе покрытий использован оксид хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Оксид хрома хорошо смачивается эмалевыми расплавами, что благоприятно влияет на технологические свойства покрытий, в частности на смачиваемость и кроющую способность.

Шликер жаростойкого стеклокерамического покрытия изготавливали путем совместного мокрого помола синтезированной фритты и модифицирующих соединений в фарфоровом барабане до определенного размера частиц. Размер частиц контролировали с помощью ситового анализа.

Эффективность защитного действия жаростойкого покрытия в значительной мере зависит от технологических параметров нанесения суспензии шликера покрытия. Согласно общим принципам шликерно-обжиговой технологии суспензия шликера должна при нанесении на изделие под механическим воздействием легко стекать с удалением излишков с поверхности изделия, и после удаления излишков и прекращения механического воздействия оставшийся слой должен обладать способностью к самофиксации, предотвращающей вторичное течение и оголение поверхности металлической подложки. Установлено, что для получения необходимых реологических свойств водной суспензии шликера покрытия и улучшения рабочих свойств шликера необходимо проводить старение (выдержку) суспензии в течение 24 ч. Полученная суспензия эмалевого шликера седиментационно устойчива. При определенных условиях гидросуспензия имеет свойства, присущие жидкости, а после нанесения на подложку из никелевого сплава приобретает характеристики почти твердого тела. Эмалевые шликеры относятся к классу структурированных полидисперсных коагуляционно-тиксотропных систем, чем и обусловлены указанные свойства суспензии.

Водную суспензию шликера наносили на образцы из сплава ВЖ171 методом распыления с помощью краскораспылителя с использованием сжатого воздуха. Обжиг образцов с нанесенной суспензией проводили в лабораторной печи. Контроль качества жаростойкого покрытия проводили визуально – покрытие должно быть сплошным, плотным, без дефектов и непокрытых мест.

К жаростойким эмалевым покрытиям, исполь-

зуемым в авиастроении, предъявляется целый ряд требований. Исключительную важность при обеспечении защиты жаропрочных сплавов и сталей имеет не только общая тугоплавкость всей системы покрытия, которая обеспечивает длительность эксплуатации при высоких температурах, но и прочное сцепление покрытий со сплавом за счет переходных диффузионных слоев, что 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. Во многих случаях сцепление определяется составом и свойствами переходного слоя, образующегося в результате взаимодействия покрытия с металлом. Большое значение для прочности сцепления имеет технология получения покрытия и контактирующей поверхности с покрытием. Прочность сцепления покрытия с защищаемой поверхностью в значительной мере определяет его термостойкость и жаростойкость в условиях эксплуатации при температурах  $>1000^{\circ}\text{C}$ . Сцепление покрытия с подложкой оценивали в процентах площади поверхности образца, с которой эмалевый слой не скололся в результате приложения ударной нагрузки. Для оценки прочности сцепления использовали копер для стандартного удара эмалированных образцов тарированным бойком заданной массы. В результате одновременного действия удара и деформации металла покрытие скалывается. Чем меньше площадь скола на эмалированной поверхности образца, тем выше сцепление покрытия с металлом. Определение прочности сцепления жаростойкого стеклокерамического покрытия со сплавом ВЖ171 осуществляли на копке марки В5113.303. В результате проведенных исследований установлено, что прочность сцепления стеклокерамического покрытия со сплавом ВЖ171 составляет 96%, что соответствует значениям прочности сцепления серийных жаростойких защитных покрытий класса ЭВК. Высокая прочность сцепления жаростойкого стеклокерамического покрытия со сплавом ВЖ171 обусловлена наличием переходного слоя, образующегося в результате взаимодействия покрытия с металлом при определенной подобранной температуре обжига покрытия.

Методом рентгеноструктурного анализа после термообработки образцов покрытия при температуре  $1190^{\circ}\text{C}$  в течение 3 мин наблюдается аморфное гало, характеризующее наличие стеклофазы, также присутствуют рентгеновские линии кристаллического  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . При термообработке образцов шликера покрытия при температурах  $1100$  и  $1150^{\circ}\text{C}$  установлено, что с увеличением времени выдержки проходит процесс кристаллизации: присутствуют кристаллические фазы тугоплавких силикатных соединений – кианит  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  и



Узел жаровой трубы с жаростойким стеклокерамическим покрытием

цельзиан  $Ba(Al_2Si_2O_8)$ , температура плавления которых составляет  $>1600^\circ C$ , что способствует повышению термостойкости и жаростойкости покрытия. Отмечено, что влияние процессов кристаллизации в процессе высокотемпературной обработки покрытия на эксплуатационные свойства (термостойкость, жаростойкость) требует дальнейшего исследования с целью моделирования свойств покрытия при температурах  $>1000^\circ C$ .

Термостойкость жаростойкого стеклокерамического покрытия при температуре  $1100^\circ C$  определена по ГОСТ 25535–82 путем термоциклирования. Установлено, что после 300 термоциклов по режиму  $1100 \pm 20^\circ C$  разрушения образцов не происходит, дефектов покрытия не наблюдается, отмечается незначительная матовость, что допускается при высокотемпературных испытаниях жаростойких покрытий, используемых для защиты деталей ГТД. Жаростойкость покрытия также оценивали при температуре  $1100^\circ C$ , при этом критерием оценки служила длительность выдержки образцов при указанной температуре до появления дефектов покрытия. Испытания проводили на образцах размером  $100 \times 150 \times 1,5$  мм. Статистические данные получены на основе испытаний 50 образцов. По результатам испытаний установлено, что после выдержки при температуре  $1100^\circ C$  в течение 100 ч покрытие сплошное, плотное и не имеет дефектов. Высокие значения термостойкости и жаростойкости покрытий обусловлены общей тугоплавкостью жаростойкого стеклокерамического покрытия, релаксацией термоупругих напряжений прослойками жидкой фазы при высоких температурах, а также обеспечены точным соблюдением технологических параметров получения покрытия.

Проведены опытно-технологические работы по опробованию разработанного состава и технологии получения жаростойкого стеклокерамического покрытия для защиты сплава ВЖ171 в условиях промышленного двигателестроительного производства (см. рисунок). Жаростойкое стекло-

керамическое покрытие наносили на узлы жаровой трубы из сплава ВЖ171 и проводили высокотемпературную термообработку, обеспечивающую формирование газоплотного, прочно сцепленного с металлом жаростойкого покрытия. Решена также проблема необходимости наличия зон секции жаровой трубы для обеспечения сварки секций при сборке жаровой трубы без нарушения целостности слоя жаростойкого стеклокерамического покрытия. Результаты проведенных работ и испытаний свидетельствуют, что жаростойкое стеклокерамическое покрытие может быть рекомендовано для защиты деталей из сплава ВЖ171 от высокотемпературной газовой коррозии при температурах эксплуатации  $1100\text{--}1150^\circ C$ .

#### Заключения

Для обеспечения надежной длительной эксплуатации теплонагруженных деталей камер сгорания разработано жаростойкое стеклокерамическое покрытие на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO\text{--}Al_2O_3\text{--}SiO_2$  и модифицирующих соединений, а также технология его получения. Высокий уровень эксплуатационных характеристик жаростойкого покрытия достигнут путем оптимизации химического состава и технологии получения покрытия.

Показано, что разработанное жаростойкое стеклокерамическое покрытие на основе тугоплавкой фритты системы  $BaO\text{--}Al_2O_3\text{--}SiO_2$  и модифицирующих соединений имеет высокую прочность сцепления со сплавом ВЖ171, повышенные значения термостойкости и жаростойкости при температуре  $1100^\circ C$ , а также отличается технологичностью и не требует использования сложного оборудования при получении.

Опытно-технологическое опробование жаростойкого стеклокерамического покрытия на узлах жаровой трубы из сплава ВЖ171 и дальнейшие высокотемпературные испытания свидетельствуют об эффективности использования жаростойкого покрытия для защиты сплава ВЖ171.

## 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., Солнцев С.С., Розенкова 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: 13.01.2016).
3. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
4. 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.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 52–57.
6. Овсепян С.В., Лукина Е.А., Филонова Е.В., Мазалов И.С. Формирование упрочняющей фазы в процессе высокотемпературного азотирования свариваемого жаропрочного деформируемого сплава на основе системы Ni–Co–Cr // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 3–8.
7. Солнцев С.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 90–99.
8. Солнцев С.С. Высокотемпературные стеклокерамические материалы и покрытия – перспективное направление авиационного материаловедения // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2009. №1. С. 26–37.
9. Солнцев С.С., Денисова В.С., Розенкова В.А. Жаростойкие эмали для защиты никелевых сплавов и сталей // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №1. С. 22–28.
10. Денисова В.С., Солнцев С.С., Соловьева Г.А. Стеклоэмалевые покрытия для защиты коррозионноустойчивых сталей от высокотемпературной газовой коррозии: свойства и области применения (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №5. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2016). DOI: 10.18577/23071-6046-2015-0-5-5-5.
11. Денисова В.С., Солнцев С.С., Соловьева Г.А., Малинина Г.А. Современное состояние исследований в области жаростойких ресурсных покрытий для никелевых и титановых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2016). DOI: 10.18577/23071-6046-2015-0-4-2-2.
12. 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: 13.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-1-1.
13. Солнцев С.С., Розенкова В.А., Миронова Н.А., Соловьева Г.А. Высокотемпературные покрытия на основе золь-гель технологии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-3-3.
14. Солнцев С.С., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Армированные жаростойкие стеклоэмали для камер сгорания газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №1. С. 26–29.
15. Солнцев С.С., Розенкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стеклокерамические покрытия и композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 359–368.
16. Солнцев С.С., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Жаростойкое покрытие для защиты высокопрочных сложнолегированных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №6. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4.