



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-2-2

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ ЖАРОСТОЙКИХ РЕСУРСНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ НИКЕЛЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

В.С. Денисова

С.Ст. Солнцев

Г.А. Соловьева

Г.А. Малинина

Апрель 2015

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: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-2-2

В.С. Денисова¹, С.Ст. Солнцев¹, Г.А. Соловьева¹, Г.А. Малинина¹

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЖАРСТОЙКИХ РЕСУРСНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ НИКЕЛЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

Рассмотрены современные направления создания и исследования жаростойких ресурсных покрытий для жаропрочных никелевых и титановых сплавов с температурой эксплуатации до 1000°C. Показаны результаты проводимых в настоящее время исследований и пути улучшения свойств ресурсных эмалевых покрытий. Рассмотрен опыт ФГУП «ВИАМ» по созданию жаростойких ресурсных покрытий, способных обеспечить длительную эффективную работу деталей из никелевых и титановых сплавов при повышенных температурах эксплуатации.

Ключевые слова: жаростойкость, покрытие, никелевые сплавы, стойкость к коррозии, стекло.

V.S. Denisova, S.S. Solntsev, G.A. Solovyeva, G.A. Malinina

CURRENT STATE OF INVESTIGATIONS IN THE FIELD OF HEAT-RESISTANT COATINGS FOR NICKEL AND TITANIUM ALLOYS (REVIEW)

Current development and research trends in the field of producing and investigating of long-life heat-resistant coatings for nickel and titanium alloys with working temperature up to 1000°C are considered. The results of investigations currently taken place and the ways of improving the properties of long-life enamel coatings are shown. The FSUE «VIAM» experience on the heat-resistant coatings development capable to provide long term effective operation of the nickel and titanium parts in high operational temperatures is considered.

Keywords: heat resistance, coating, Ni alloys, corrosion resistance, glass.

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

Проблемы эффективной защиты и улучшения эксплуатационных свойств разрабатываемых жаропрочных сплавов являются особенно актуальными в связи с повышенными требованиями к материалам и конструкциям летательных аппаратов [1–3]. Для продолжительной эксплуатации деталей газотурбинных двигателей при температуре до 1000°C разработаны жаростойкие ресурсные покрытия на основе стеклофритт различных стеклообразующих систем и модифицирующих тугоплавких наполнителей [4–6]. Стекло- и стеклокерамические ресурсные покрытия являются перспективными объектами для изучения, и в настоящее время исследования ученых посвящены проблемам увеличения температур эксплуатации покрытий на основе стеклофритт до 1200°C, а также поиску технологических решений, способствующих улучшению свойств ресурсных покрытий, таких как стойкость к сульфидно-оксидной коррозии, прочность сцепления покрытия с подложкой, стойкость покрытий к механическим воздействиям.

В обзоре показаны результаты исследований последних лет, приводятся данные о химическом составе стекол, являющихся основой новых жаростойких покрытий для защиты никелевых и титановых жаропрочных конструкционных сплавов. Рассмотрен опыт ВИАМ по созданию жаростойких ресурсных покрытий, обеспечивающих длительную эффективную работу деталей из никелевых и титановых сплавов при температурах до 1000°C [7].

Разработки в области защиты современных жаропрочных никелевых сплавов

Высокотемпературная газовая коррозия крайне агрессивна ввиду воздействия повышенных температур эксплуатации и конденсированных фаз Na_2SO_4 и NaCl . Стеклоэмалевые жаростойкие покрытия позволяют повысить стойкость материала подложки к воздействию агрессивных сред. Так, в работе [8] показана высокая стойкость стеклоэмалевого покрытия на основе стекол системы BaO-MgO-SiO_2 (табл. 1) к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 1000°C. В качестве подложки использован никелевый сплав АЕ 435.

Таблица 1

Состав стеклофритты покрытия, синтезированной в системе BaO-MgO-SiO_2

| Содержание компонентов, % (по массе) | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| SiO_2 | BaO | CaO | MgO | ZnO | MoO_3 |

| | | | | | |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 40–45 | 40–45 | 2–6 | 2–3 | 2–8 | 2–8 |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|

Эксперимент проведен в солевом расплаве и парах соли состава: 80% (по массе) Na_2SO_4 +20% (по массе) NaCl – в течение 35 ч. Установлено, что максимальное значение потерь массы образцов наблюдается при испытаниях в парах солей и составляет $\sim 7,5 \text{ мг/см}^2$. При этом коррозионное воздействие сильнее проявляется в газовой фазе, так как происходит на молекулярном уровне с участием более термически заряженных частиц, чем в жидкой фазе.

В рамках работы [9] создано стеклокомпозиционное покрытие на основе фритты системы SiO_2 – Al_2O_3 – ZnO – CaO (табл. 2) и тугоплавкого наполнителя α - Al_2O_3 (до 30% (по массе)), которое применяется для защиты никелевого сплава K38G при температуре эксплуатации до 1000°C .

Таблица 2

Состав стеклофритты покрытия, синтезированной в системе SiO_2 – Al_2O_3 – ZnO – CaO

| Содержание компонентов, % (по массе) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| SiO_2 | Al_2O_3 | ZnO | CaO | ZrO_2 | TiO_2 | B_2O_3 | Na_2O | KNO_3 |
| 58,26 | 5,98 | 9,00 | 3,66 | 5,29 | 2,75 | 4,66 | 3,40 | 7,00 |

Установлено, что предварительная пескоструйная обработка поверхности материала подложки влияет на кинетику окисления сплава, при этом пескоструйная обработка предпочтительнее, чем механическая полировка изделия. Показано, что покрытие позволяет снизить привес материала при температуре 1000°C почти в 20 раз. Ввиду кристаллизации стеклофазы и межфазной реакции стеклофазы и наполнителя, после термообработки наблюдается появление кристаллических фаз в виде остаточного оксида алюминия (α - Al_2O_3), ганита (ZnAl_2O_4), циркона (ZrSiO_4) и виллемита (Zn_2SiO_4). Методами энергодисперсионной спектроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлено наличие оксидного промежуточного слоя, обеспечивающего стойкость материала к окислению.

Изучен современный метод формирования покрытий путем нагрева СВЧ-излучением [10]. Основа покрытия – стеклофритта системы MgO – Al_2O_3 – TiO_2 (табл. 3). Установлено, что использование данного метода способствует значительному повышению твердости в нанодиапазоне и модуля упругости.

Таблица 3

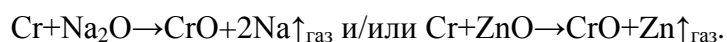
Состав стеклофритты покрытия, синтезированной в системе MgO – Al_2O_3 – TiO_2

| Содержание компонентов, % (по массе) | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| SiO_2 | Na_2O | K_2O | TiO_2 | B_2O_3 | MgO | CaO | Al_2O_3 |
| 32 | 2 | 5 | 13 | 10 | 12 | 2 | 24 |

Установлено, что и при нагреве СВЧ-излучением, и при традиционном способе нагрева образуются кристаллические фазы в виде титанатов и силикатов магния и алюминия, при этом нагрев СВЧ-излучением позволяет получать частицы кристаллической фазы меньшего размера. Максимальная величина нанотвердости для покрытий, полученных при нагреве СВЧ-излучением, составляет 6,12 ГПа.

В работе [11] изучены физические характеристики и реакции взаимодействия между сплавом подложки и стеклофазой покрытия. В качестве подложки использовали никелевый сплав К38Г. Покрытие наносят в виде газовой суспензии распылением при комнатной температуре, сушат при 250°C в течение 15 мин и обжигают при 1000°C в течение 30 мин. Образцы с покрытием исследовали методом электронной микроскопии для изучения строения поверхности, при помощи спектроскопии – для определения фазового состава.

Исследования показали, что при 1000°C между покрытием на основе системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO--CaO}$ и никелевым сплавом К38Г протекают следующие межфазные реакции:



Расчет энергии Гиббса для этих реакций показывает, что при вышеуказанных условиях они происходят самопроизвольно. Чтобы избежать бурления стеклянного покрытия при выделении газообразных продуктов Zn и/или Na в состав вводят частицы глинозема повышенной высокотемпературной прочности для увеличения вязкости стекла. В случае композиционных покрытий на основе стекла/глинозема, участие глинозема в межфазных реакциях негативно сказывается на качестве покрытия. Для предотвращения этого выделение газообразных продуктов подавляется при помощи увеличения давления.

В настоящее время для получения покрытий активно применяется золь-гель технология, обеспечивающая высокие однородность получаемых покрытий и степень чистоты, пониженные температуры синтеза, что уменьшает потери улетучиваемого материала, а также энергетические затраты. Золь-гель метод открывает возможности для синтеза стеклокристаллических материалов новых составов. В работе [12] представлена технология получения покрытия на основе системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ для никелевого сплава золь-гель методом. Экспериментально определена технология получения покрытия: предварительное окисление сплава при 900°C в течение 5 ч – для создания условий для прочного сцепления покрытия; нанесение покрытия при соотношении $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=5:1$;

кальцинация при 650°C в течение 2 ч. После испытаний на термостойкость при температуре 1000°C в течение 8 циклов потеря массы покрытия составила 0,03%.

**Разработки в области защиты
современных жаропрочных титановых сплавов**

Титановые сплавы вследствие малой плотности, высокого предела прочности при разрыве и жесткости являются важными конструкционными материалами в авиастроении. Однако они склонны к окислению и охрупчиванию при высоких температурах. При создании покрытий для титановых сплавов важнейшим аспектом является прочность сцепления покрытия и сплава.

В работе [13] установлено, что прочная связь покрытия с поверхностью титанового сплава обеспечивается благодаря растворению оксида титана в стеклофазе при температуре обжига и последующей реакции титана из сплава со стеклом с образованием промежуточного слоя Ti_5Si_3 . Показана эффективность применения жаростойких покрытий на основе стекол системы $SiO_2-Al_2O_3-ZnO-CaO$. Кинетика окисления титанового сплава с покрытием и без покрытия при 800°C приведена на рисунке, а.

Привес массы образцов титанового сплава с покрытием после термообработки при температуре 800°C в течение 230 ч составил 1,755 мг/см², что является незначительным.

В рамках работы [14] изучено стеклокерамическое покрытие на основе стеклофритты системы $B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ (табл. 4) и наполнителя в виде аморфного оксида кремния (до 30% (по массе)).

Таблица 4

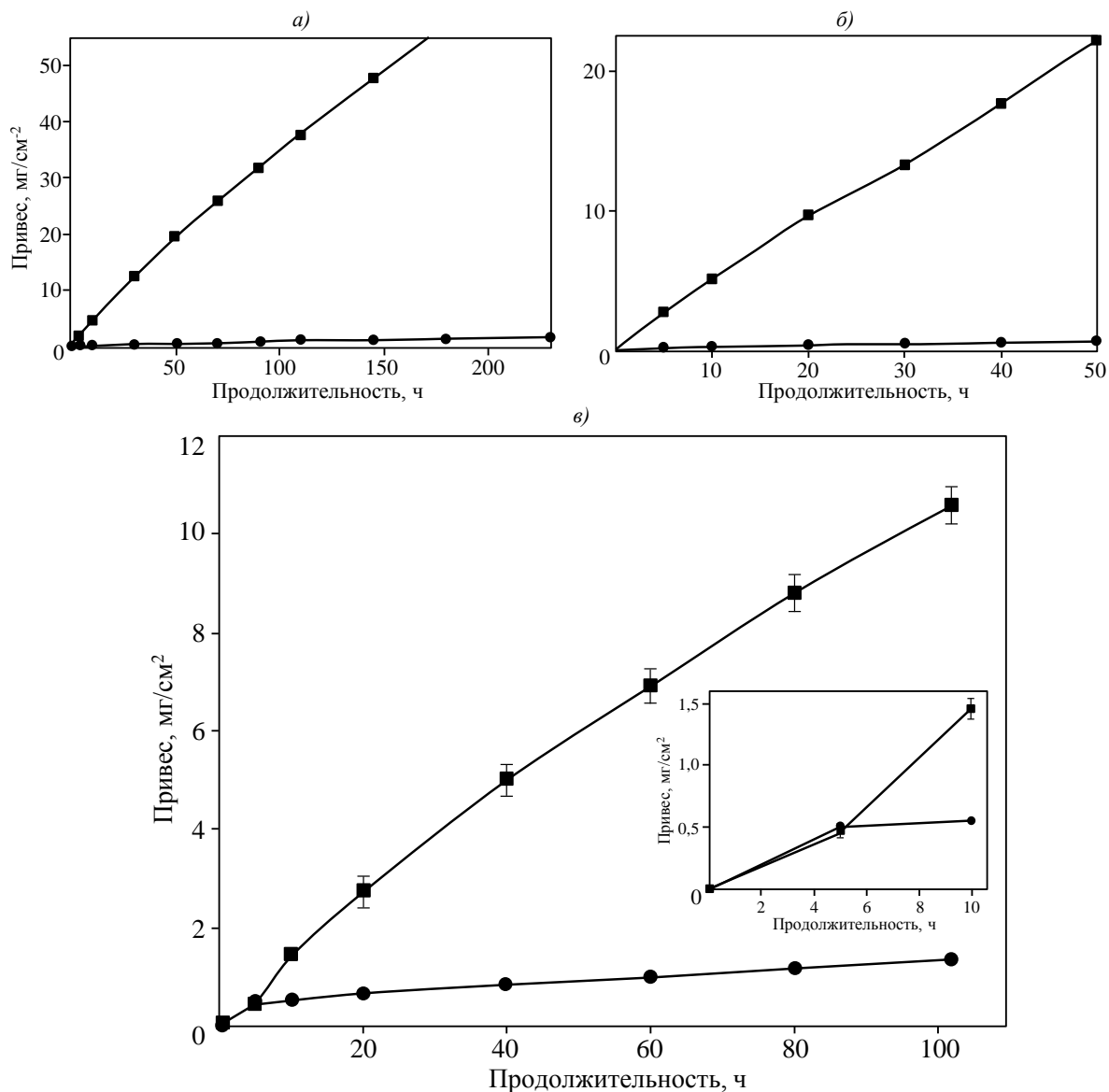
Состав стеклофритты покрытия, синтезированной в системе $B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$

| Содержание компонентов, % (по массе) | | | | | |
|--------------------------------------|---------|----------|-------|-------|-----------|
| SiO_2 | Na_2O | B_2O_3 | MgO | CaO | Al_2O_3 |
| 35–40 | 10–15 | 25–30 | 5–10 | 5–10 | 2–5 |

Обжиг покрытия проведен при температуре 850°C с целью сохранения механических свойств титанового сплава. Методом сканирующей электронной микроскопии установлены достаточная прочность сцепления покрытия со сплавом, а также отсутствие промежуточного слоя. Относительно низкая температура обжига исключает фазовые превращения в сплаве. Кинетика окисления сплава с покрытием и без покрытия при 800°C, свидетельствующая об эффективности защитного действия покрытия, представлены на рисунке, б.

Для защиты титановых сплавов при температурах эксплуатации до 1000°C наиболее перспективными являются стеклокерамические композиционные покрытия с модифицирующими наполнителями, способствующими улучшению его механических и эксплуатационных свойств [15, 16]. При создании стеклокерамического покрытия [15] в качестве наполнителей использовали α -Al₂O₃, способствующий увеличению жаростойкости покрытия вследствие малого коэффициента диффузии, а также SiC, применяемый для защиты С/С-материалов от окисления. Подобранны оптимальный химический состав покрытия и режимы термообработки, способствующие формированию плотного слоя покрытия, сохранению механических свойств титанового сплава и высокой жаростойкости покрытия. Для получения покрытия наполнители диспергируют в растворе силиката калия (жидкое стекло) для получения шликера в пропорции SiC: α -Al₂O₃=10:5 (масс. ч.) на 50 масс. ч. раствора силиката калия. Методом распыления наносят покрытие толщиной ~25–30 мкм, затем покрытие отверждают в течение 12 ч при комнатной температуре. После отверждения покрытие последовательно спекают при 70°C в течение 12 ч, при 120°C – в течение 10 ч и при 260°C – в течение 5 ч. Для получения плотного слоя покрытие обжигают при 900°C в течение 60 мин.

Технология получения покрытий данного класса более трудоемкая, но позволяет защитить титановые сплавы при температурах эксплуатации до 1000°C. Кинетика окисления сплава с покрытием и без покрытия при 1000°C, также свидетельствующая об эффективности защитного действия покрытия, представлена на рисунке, в.



Кинетика окисления сплава с покрытием (●) и без покрытия (■) при 800 (а, б) и 1000°С (в)

Опыт ВИАМ по созданию жаростойких ресурсных покрытий для сталей и сплавов

Для защиты теплонагруженных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов при температурах эксплуатации до 1000°С применяют стеклоэмалевые покрытия (типа ЭВК-103 на основе стеклофритт системы BaO–Al₂O₃–SiO₂), отличающиеся технологичностью, прочностью химических связей, газоплотностью и др. Эти свойства обеспечивают стабильность системы «покрытие–металл» в агрессивных высокоскоростных газовых потоках, прочность сцепления с подложкой, жаростойкость и термостойкость при температурах эксплуатации до 1000°С. Применение ресурсных покрытий снижает окисляемость сплавов в 6–8 раз. Стеклокристаллические покрытия,

разработанные в ВИАМ, отличаются стойкостью к топливу и продуктам его сгорания. Применение покрытий способствует повышению надежности и ресурса изделий в 1,5–2 раза. Кроме того, жаростойкие покрытия применяют для защиты силовых деталей из жаропрочных никелевых сплавов ЭП-202, ЖСЗДК (ротор, статор и др.) энергетических установок в среде окислительного генераторного газа при температурах 600–800°С [17–21].

Для защиты железоникелевых сплавов и коррозионностойких сталей от воздействия газовой коррозии при температурах эксплуатации до 900°С серийно применяются стеклоэмалевые покрытия типа ЭВ-300-60М, ЭВ-86 и ЭВ-86-1. Данные покрытия также могут использоваться в качестве электроизоляционных. Применение указанных жаростойких покрытий снижает окисление коррозионностойких сталей и железоникелевых сплавов в 6–8 раз, коксоотложение – в 10–15 раз, науглероживание – в 6–8 раз.

Разработанные покрытия класса ЭВР предназначены для ремонта механических повреждений ресурсных жаростойких покрытий. Данный класс покрытий позволяет оперативно восстанавливать поврежденный слой покрытий в условиях холодного отверждения. Покрытия выдерживают до 50 термоциклов и снижают окисляемость сплавов при наличии дефектов до 2 раз.

Перспективы развития работ в области ресурсных жаростойких покрытий обусловлены свойствами новейших конструкционных жаропрочных сплавов. Разработан жаропрочный сплав ВЖ171, предназначенный для эксплуатации при температурах до 1200°С. Серийные покрытия типа ЭВК при указанных температурах переходят в вязкотекучее состояние и не могут обеспечивать защиту сплава. Таким образом, основной задачей при разработке ресурсных покрытий для жаропрочных сплавов является обеспечение надежной защиты деталей газотурбинных двигателей при температурах эксплуатации свыше 1000°С.

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. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
3. 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.

4. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №1 (materialsnews.ru).
5. Солнцев С.С. Высокотемпературные стеклокерамические материалы и покрытия – перспективное направление авиационного материаловедения //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №1. С. 26–37.
6. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение. 1984. 256 с.
7. 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.
8. Das S., Datta S., Basu D., Das G.C. Hot corrosion of glass coating on nickel base superalloy //Ceramics International. 2008. V. 34. P. 1215–1222.
9. Minghui Chen, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang, Xiaolan Wang. Effect of sand blasting and glass matrix composite coating on oxidation resistance of a nickel-based superalloy at 1000°C //Corrosion Science. 2013. V. 73. P. 331–341.
10. Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Evaluation of microwave processed glass-ceramic coating on nimonic superalloy substrate //Ceramics International. 2010. V. 36. P. 1125–1130.
11. Minghui Chen, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Comparative study of interfacial reaction between superalloy substrate and glass coating with and without alumina particles incorporation //Applied Surface Science. 2013. V. 271. P. 228–233.
12. Xiaowei Niu, He Zhang, Xiaojun Hu, Wei Han. Synthesis of well-adhered SiO₂–Al₂O₃ glass-ceramic coating on NiCrFe alloy supports //Applied Surface Science. 2013. V. 268. P. 265–269.
13. Minghui Chen, Wenbo Li, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Glass-ceramic coating on titanium alloys for high temperature oxidation protection: Oxidation kinetics and microstructure //Corrosion Science. 2013. V. 74. P. 178–186.
14. Zinqi Xiao, Fatang Tan, Wei Wang, Fazhe Sun, Hongfei Lu, Xiaolin Qui, Jianguo Chen, Xueliang Qiao. Oxidation protection of Ti–6Al–4V alloy using a novel glass-amorphous silica composite coating //Ceramics International. 2014. V. 40. P. 3503–3509.
15. Wenbo Li, Minghui Chen, Mingyu Wu, Shenglong Zhu, Cheng Wang, Fuhui Wang. Microstructure and oxidation behavior of a SiC–Al₂O₃–glass composite coating on Ti–47Al–2Cr–2Nb alloy //Corrosion Science. 2014. V. 87. P. 179–186.
16. Wenbo Li, Minghui Chen, Cheng Wang, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Preparation and oxidation behavior of SiO₂–Al₂O₃–glass composite coating on Ti–47Al–2Cr–2Nb alloy //Surface & Coatings Technology. 2013. V. 218. P. 30–38.

17. Солнцев С.Ст., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Жаростойкое покрытие для защиты высокопрочных сложнелегированных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 04 (viam-works.ru).
18. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Соловьева Г.А. Высокотемпературные покрытия для волокнистых субстратов //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 03 (viam-works.ru).
19. Солнцев С.Ст., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Многоцелевое стеклоэмалевое покрытие для защиты литых фасонных деталей газотурбинных двигателей //Труды ВИАМ. 2014. №3. Ст. 04 (viam-works.ru).
20. 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.
21. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стеклокерамические покрытия и композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 359–368.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih perera-botki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S., Sevast'janov V.G. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Perspective high-temperature ceramic composite materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. С. 20–24.
3. Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinjakova E.V. Vysokotemperaturnye teploizoljacionnye i teplozashhitnye materialy na osnove volokon tugoplavkih soedinenij [High-temperature heatinsulating and heat-protective materials on the basis of fibers of high-melting connections] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 380–385.
4. Kablov E.N., Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Sovremennye polifunkcional'nye vysokotemperaturnye pokrytija dlja nikelovyh spлавov, uplotnitel'nyh metallicheskih voloknistyh materialov i berillievyh spлавov [Modern multifunctional high temperature coatings for nickel alloys, sealing metal fibrous materials and beryllium alloys] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika. 2013. №1 (materialsnews.ru).
5. Solncev S.S. Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie materialy i pokrytija – perspektivnoe napravlenie aviacionnogo materialovedenija [High-temperature steklokeramichesky materials and coverings – the perspective direction of aviation materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2009. №1. С. 26–37.
6. Solncev S.S. Zashhitnye tehnologicheskie pokrytija i tugoplavkie jemali [Protective technological coverings and high-melting enamels]. М.: Mashino-stroenie. 1984. 256 s.

7. Solncev S.S., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solov'eva G.A. Armirovannye zharostojkie steklojemali dlja kamer sgoranija gazoturbinyh dvigatelej [Reinforced heat resisting stekloemali for combustion tubes of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 26–29.
8. Das S., Datta S., Basu D., Das G.C. Hot corrosion of glass coating on nickel base superalloy //Ceramics International. 2008. V. 34. P. 1215–1222.
9. Minghui Chen, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang, Xiaolan Wang. Effect of sand blasting and glass matrix composite coating on oxidation resistance of a nickel-based superalloy at 1000°C //Corrosion Science. 2013. V. 73. P. 331–341.
10. Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Evaluation of microwave processed glass-ceramic coating on nimonic superalloy substrate //Ceramics International. 2010. V. 36. P. 1125–1130.
11. Minghui Chen, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Comparative study of interfacial reaction between superalloy substrate and glass coating with and without alumina particles incorporation //Applied Surface Science. 2013. V. 271. P. 228–233.
12. Xiaowei Niu, He Zhang, Xiaojun Hu, Wei Han. Synthesis of well-adhered SiO₂–Al₂O₃ glass-ceramic coating on NiCrFe alloy supports //Applied Surface Science. 2013. V. 268. P. 265–269.
13. Minghui Chen, Wenbo Li, Mingli Shen, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Glass-ceramic coating on titanium alloys for high temperature oxidation protection: Oxidation kinetics and microstructure //Corrosion Science. 2013. V. 74. P. 178–186.
14. Zinqi Xiao, Fatang Tan, Wei Wang, Fazhe Sun, Hongfei Lu, Xiaolin Qui, Jianguo Chen, Xueliang Qiao. Oxidation protection of Ti–6Al–4V alloy using a novel glass-amorphous silica composite coating //Ceramics International. 2014. V. 40. P. 3503–3509.
15. Wenbo Li, Minghui Chen, Mingyu Wu, Shenglong Zhu, Cheng Wang, Fuhui Wang. Microstructure and oxidation behavior of a SiC–Al₂O₃–glass composite coating on Ti–47Al–2Cr–2Nb alloy //Corrosion Science. 2014. V. 87. P. 179–186.
16. Wenbo Li, Minghui Chen, Cheng Wang, Shenglong Zhu, Fuhui Wang. Preparation and oxidation behavior of SiO₂–Al₂O₃–glass composite coating on Ti–47Al–2Cr–2Nb alloy //Surface & Coatings Technology. 2013. V. 218. P. 30–38.
17. Solncev S.St., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solov'eva G.A. Zharostojkoe pokrytie dlja zashhity vysokoprochnyh slozhnolegirovannyh nikelovyh splavov ot vysokotemperaturnoj gazovoj korrozii [Heat resisting covering for protection of high-strength complex-alloyed nickel alloys against high-temperature gas corrosion] //Trudy VIAM. 2014. №6. St. 04 (viam-works.ru).
18. Solncev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Solov'eva G.A. Vysokotemperaturnye pokrytija dlja volknistykh substratov [High temperature coatings for fibrous substrates] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 03 (viam-works.ru).
19. Solncev S.St., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solov'eva G.A. Mnogocelevoe steklojemalevoe pokrytie dlja zashhity lityh fasonnykh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Multi-purpose stekloemali for combustion tubes of gas turbine engines] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 03 (viam-works.ru).

malevy covering for protection of cast shaped details of gas turbine engines] //Trudy VIAM. 2014. №3. St. 04 (viam-works.ru).

20. Solncev St.S. Vysokotemperaturnye kompozicionnye materialy i pokrytija na osnove stekla i keramiki [High-temperature composite materials and coverings on the basis of glass and ceramics] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnich. sb. M.: VIAM. 2007. S. 90–99.
21. Solncev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie pokrytija i kompozicionnye materialy [High-temperature steklokeramichesky coverings and composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 359–368.