



УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-4-4

**МНОГОЦЕЛЕВОЕ СТЕКЛОЭМАЛЕВООЕ ПОКРЫТИЕ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛИТЫХ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

С.Ст. Солнцев

В.В. Швагирева

кандидат технических наук

Н.В. Исаева

Г.А. Соловьева

Март 2014

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

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

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

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

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-4-4

С.С. Солнцев, В.В. Швагирева, Н.В. Исаева, Г.А. Соловьева

МНОГОЦЕЛЕВОЕ СТЕКЛОЭМАЛЕВОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛИТЫХ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Содержатся сведения о составе, свойствах, назначении, эффективности стеклоэмалевого покрытия для защиты литых фасонных деталей горячего тракта ГТД из железоникелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии.

Покрытие сохраняет высокую термостойкость, жаростойкость, прочность сцепления как в процессе многостадийной термообработки: закалка при температуре 1120°C, в течение 3 ч, старение при 750°C, 15 ч, так и при эксплуатации при температуре от 700 до 900°C, что обеспечивает снижение окисляемости сплавов в 25–30 раз.

Ключевые слова: *стеклоэмалевое покрытие, железоникелевые сплавы, высокотемпературная газовая коррозия, защита, термостойкость, жаростойкость.*

S.St. Solncev, V.V. Shvagireva, N.V. Isaeva, G.A. Solovyeva

MULTIPURPOSE GLASS-ENAMEL COATING FOR PROTECTION OF CAST PARTS OF GAS TURBINE ENGINES

Contains information about the composition, properties, purpose, effectiveness glass-enamel coating for protection of cast parts hot tract of gas turbine engines of iron-nickel alloys, from high-temperature gas corrosion.

The coating retains its high temperature resistance, heat-resistance, durability of coupling in the process of multistage heat treatment: hardening at temperature 1120°C – 3 hours, aging at 750°C – 15 hours, and during operation at temperature of 700 to 900°C, which reduces the oxidation of alloys in 25–30 times.

Key words: *glass-enamel coating, iron-nickel alloys, high-temperature gas corrosion, protection, thermal stability, heat resistance.*

Жаростойкие эмалевые покрытия для защиты деталей горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых, высокохромистых и железоникелевых

сплавов занимают особое место в обеспечении работоспособности, ресурса и надежности изделий авиационной техники. Покрытия регламентируют окисление поверхности металлов и являются барьером на пути компонентов агрессивной газовой среды и продуктов сгорания топлива. Высокотемпературные защитно-технологические, ресурсные покрытия находят широкое применение в промышленности для защиты от окисления и обезуглероживания узлов и деталей из металлов и сплавов при термомеханических обработках, от высокотемпературной газовой коррозии – при ресурсных применениях, что обеспечит ресурс и надежность изделий авиационно-космической техники в 1,5–2 раза [1–3].

Дальнейшее развитие работ по жаростойким эмалевым покрытиям определяется повышением уровня рабочих параметров жаропрочных сплавов и обеспечением работоспособности двигателей современных и перспективных авиационных ГТД [4–6]. Основные направления базовой технологии получения составов тугоплавких жаростойких эмалевых покрытий для коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов основаны на принципах синтеза поликристаллических стекломатериалов с использованием модифицирующих оксидов, тугоплавких соединений и эффекта реакционного отверждения [7, 8].

В настоящее время для защиты деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов от высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 1000°C серийно применяются эмалевые (стеклокристаллические, реакционноотверждаемые) покрытия на основе тугоплавких стеклофритт.

С целью экономии дорогостоящих и дефицитных компонентов жаропрочных сплавов на никелевой основе для литья фасонных деталей газотурбинных двигателей применяются жаропрочные литейные свариваемые сплавы на железоникелевой основе типа ВЖЛ-19, которые, обеспечивая необходимый уровень прочностных характеристик, обладают недостаточной стойкостью к высокотемпературной газовой коррозии, что приводит не только к безвозвратным потерям металла, но также к снижению механических характеристик сплавов. Сплавы обладают достаточно высоким уровнем жаропрочности при температурах от 700 до 900°C и являются конкурентоспособными сплавам на никелевой основе, однако их склонность к активному окислению требует применения защитных покрытий [9, 10].

Отличительной особенностью стеклоэмалевого покрытия для сплава типа ВЖЛ-19 является его многоцелевое назначение, а именно, способность сохранять высокие защитные характеристики как в процессе многостадийной термообработки (за-

калка при 1120°C в течение 3 ч; старение при 750°C, 15 ч), так и длительной эксплуатации при температурах от 700 до 900°C. Кроме того, учитывая, что фасонные литые детали, как правило, разнотолщинные, сложной конфигурации, одним из требований, предъявляемым к покрытию для данного вида сплавов, являются сравнительно низкая температура формирования, не превышающая 1120°C, и широкий температурный интервал размягчения [11].

Относительно низкая температура формирования покрытия, при которой происходит его оплавление и образование защитной пленки, определяется процессами, происходящими при окислении сплава при нагревах, что напрямую связано с прочностью сцепления покрытия и сплава [12–14]. Прочность сцепления покрытий зависит от окисляемости сплава, состава и свойств образующейся окалины и особенности взаимодействия ее с покрытием. В процессе нагрева сплава ВЖЛ-19 при температурах от 700 до 900°C образуется рыхлый слой окалины, фазовый состав которой представляет совокупность оксида железа и легирующих элементов: (FeNi)O, (CrFe)₂O₃ и др. Окисляемость сплава ускоряется в связи с возможностью образования трехоксида молибдена (MoO₃) и его взаимодействием с компонентами сплава.

В процессе создания покрытия для сплавов типа ВЖЛ-19 исследовалась возможность обеспечения высоких защитных характеристик покрытия путем сочетания процессов катализированной кристаллизации, введения жаростойкого наполнителя и взаимодействия фритт различной тугоплавкости. Возможность получения таких покрытий заложена в физико-химической природе стеклообразного состояния покрытий, в котором процессы плавления и затвердевания происходят постепенно в широком температурном интервале [15, 16]. Разработка многоцелевого покрытия проводилась на основе композиций фритт систем: SiO₂–Al₂O₃–BaO, SiO₂–Al₂O₃–B₂O₃ с различной температурой размягчения – от 600 до 700°C, а также помольных добавок, что позволяет обеспечить высокие защитные свойства в широком температурно-временном интервале. Механизм формирования и защитного действия многоцелевого покрытия определяется его составом. Наиболее активно процессы химического взаимодействия протекают в покрытиях на стадии длительной термообработки железоникелевых сплавов при температуре 1120°C. При этой температуре формируется сплошное покрытие, находящееся в вязкотекучем состоянии. Формирование покрытия обеспечивается плавлением легкоплавкой фритты системы SiO₂–Al₂O₃–B₂O₃. Высокие защитные характеристики многоцелевого покрытия на стадии термообработки при температурах от 1100 до 1120°C и

последующей эксплуатации при температурах от 700 до 750°C обусловлены следующими факторами:

- активным взаимодействием легкоплавкой фритты $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ с тугоплавкой фриттой $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--BaO}$, которое приводит к усреднению распределения тугоплавких фаз в структуре покрытия, удалению пор, гомогенизации покрытия;

- высокочислообразной микрогетерогенной структурой, основу которой составляют стеклообразная аморфная матрица с равномерно распределенными в ней частицами оксида хрома, а также силикатов алюминия и бария. Следует отметить, что фазовая стабильность многоцелевого покрытия сохраняется постоянной как в процессе длительной термообработки, так и при эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1

Результаты рентгенофазового анализа покрытия

Режим термообработки	Обнаруженные фазы		
	Основные	Сопутствующие	Следы
1120°C, 3 ч	Cr_2O_3	Al_2SiO_5	CrO_3
1120°C, 3 ч+700°C, 100 ч+750°C, 16 ч	Cr_2O_3	Al_2SiO_5 , $\text{BaAl}_2\text{S}_2\text{O}_8$	CrO_3
1120°C, 5 мин+700°C, 100 ч	Cr_2O_3	Al_2SiO_5 , $\text{BaAl}_2\text{S}_2\text{O}_8$	CrO_3

Очевидно, что микрогетерогенность покрытия обусловлена присутствием в его составе кристаллических фаз, а также наличием частиц тугоплавкой фритты $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--BaO}$ в стеклообразной аморфной матрице. Наличие частиц тугоплавкой фритты позволяет предположить, что временной интервал сохранения защитных функций имеет две стадии. Первая стадия обусловлена взаимодействием двух фритт, причем при полном усреднении состава стеклообразной аморфной матрицы ее защитные функции достигают своего пика и стабилизируются. Далее наступает вторая стадия, когда защитные свойства покрытия определяются в полной мере процессами кристаллизации и агрегации кристаллических фаз [17].

Эффективность защитного действия многоцелевого эмалевого покрытия подтверждена данными по изучению кинетики окисления сплава, а также металлографическими исследованиями. Установлено, что окисляемость сплавов с покрытием при температурах испытания 1120 и 700°C снижается в 25–30 раз (рис. 1). Применение покрытия полностью исключает окисление и обезлегирование сплава, в то время как глубина обедненного легирующими элементами слоя сплава без защиты составляет 120 мкм (рис. 2). Кроме того, эффективность применения покрытия подтверждена испытаниями механических свойств сплава: ударная вязкость сплава с покрытием после термообра-

ботки составляет 70 Дж/см^2 , в то время как у сплава без покрытия это значение: 50 Дж/см^2 .

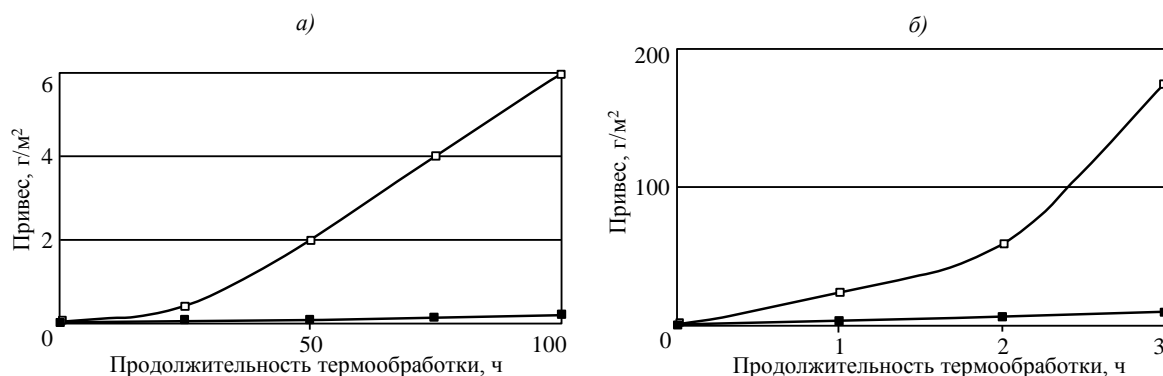


Рисунок 1. Кинетика окисления железоникелевого сплава при температурах 700°C (а) и 1120°C (б) без покрытия (□) и с покрытием (■)

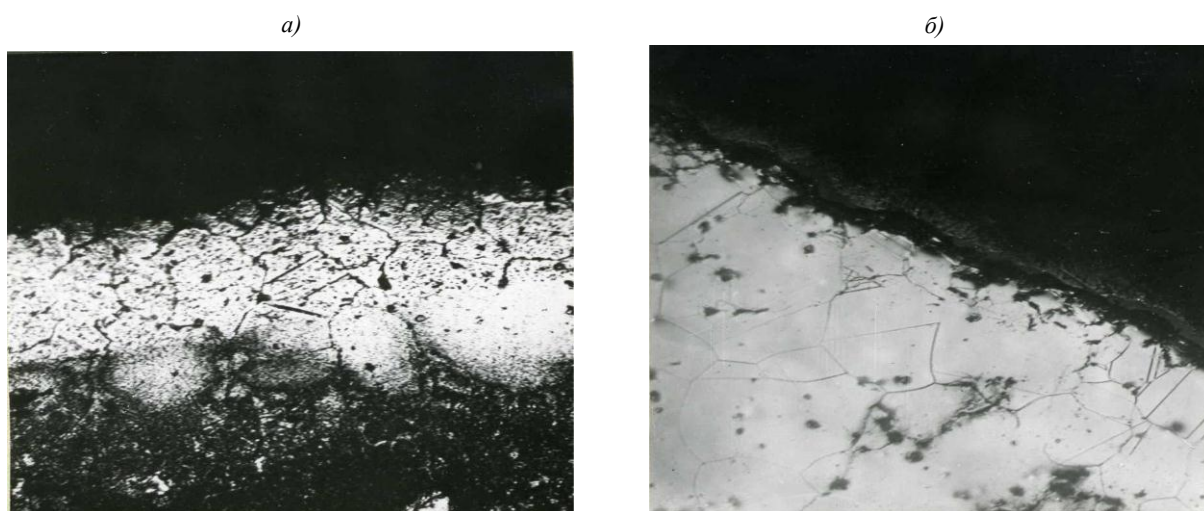


Рисунок 2. Микроструктура железоникелевого сплава без покрытия (а) и с покрытием (б), термообработанного по режиму: 1120°C , 3 ч + 700°C , 100 ч и состаренного при 750°C в течение 16 ч

Исследованы термостойкость и жаростойкость многоцелевого эмалевого покрытия на железоникелевом сплаве. Критерий оценки термостойкости – наличие дефектов в покрытии: отслоения, уколы, сколы до металла, выгорание эмалевого покрытия и др. Получены положительные результаты при испытаниях покрытия по режиму: нагрев образцов с покрытием при температурах от 700 до 900°C в течение 5 мин с последующим охлаждением на воздухе, количество циклов: 500 при $700 \pm 20^\circ\text{C}$, 250 при $900 \pm 20^\circ\text{C}$. Жаростойкость эмалевого покрытия оценивали по изменению массы образ-

цов при нагреве при температурах от 700 до 900°С в течение 100 ч. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Защитные характеристики многоцелевого эмалевого покрытия

Материал подложки	Жаростойкость		Термостойкость	
	Температура испытания, °С	Привес *, г/(м ² ·ч)	Режим испытания, °С	Количество циклов
Железникелевый сплав	700	0,06/0,003	700↔20	500
	900	0,18/0,024	900↔20	250

*В числителе – без покрытия, в знаменателе – с покрытием.

В результате проведенных исследований разработано многоцелевое стеклоэмалевое покрытие типа ЭВК-127 для защиты от высокотемпературной газовой коррозии литых фасонных деталей из сплава на железникелевой основе как в процессе длительной эксплуатации при температурах от 700 до 900°С, так и при термообработке по режиму: 1120°С, 3 ч+старение при 750°С в течение 16 ч. Покрытие применяется для деталей из сплавов, температура нагрева которых ограничена либо режимом термической обработки сплава, либо конструкцией детали (фасонное литье, тонкостенные, крупногабаритные изделия).

Применение многоцелевого стеклоэмалевого покрытия ЭВК-127 снижает окисляемость железникелевых сплавов при температурах 1120 и 700°С в 25–30 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Солнцев С.С. Высокотемпературные стеклокерамические материалы и покрытия – перспективное направление авиационного материаловедения //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №1. С. 26–37.
4. 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.

5. Ваганова М.Л., Щеголева Н.Е., Гращенко Д.В. Перспективы развития высокотемпературных керамических композиционных материалов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №5. С. 8–14.
6. Солнцев С.С., Исаева Н.В., Швагирева В.В., Максимов В.И. Высокотемпературные покрытия для защиты сплавов и углеродкерамических композиционных материалов от окисления //Конверсия в машиностроении. 2004. №4. С. 77–81.
7. Солнцев С.С., Исаева Н.В., Швагирева В.В., Соловьева Г.А. Жаростойкие эмалевые покрытия для защиты коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов от воздействия агрессивных сред //Авиационные материалы и технологии. 2008. №1. С. 29–31.
8. Солнцев С.С., Исаева Н.В., Швагирева В.В., Соловьева Г.А. Высокотемпературные жаростойкие эмалевые покрытия для защиты от коррозионного воздействия продуктов сгорания топлива теплонагруженных элементов из коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2008. №4. С. 16–18.
9. Каблов Е.Н., Мубояджан С.А. Жаростойкие теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
10. Мубояджан С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 68–78.
12. 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.
13. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 3–8.
14. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение. 1984. 255 с.

15. Химическая технология стекла и ситаллов /Под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1983. 432 с.
16. Аппен А.А. Температурустойчивые неорганические покрытия. М.-Л.: Химия. 1976. 107 с.
17. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Исаева Н.В. Разработка и применение в авиакосмической технике стеклокерамических покрытий и материалов /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 99–107.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh splavov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i teplozashhitnyh pokrytij [The development strategy of superalloys and special steel, protective and thermal barrier coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 19–36.
3. Solncev S.S. Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie materialy i pokrytija – perspektivnoe napravlenie aviacionnogo materialovedenija [High-temperature glass-ceramic materials and coatings – a promising direction aviation materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2009. №1. S. 26–37.
4. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composites] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S 20–24.
5. Vaganova M.L., Shhegoleva N.E., Grashhenkov D.V. Perspektivy razvitija vysokotemperaturnyh keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Prospects for the development of high-temperature ceramic composites] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2013. №5. S. 8–14.
6. Solncev S.S., Isaeva N.V., Shvagireva V.V., Maksimov V.I. Vysokotemperaturnye pokrytija dlja zashhity splavov i uglerodkeramicheskikh kompozicionnyh materialov ot okislenija [High-temperature protective coatings for alloys and carbon-ceramic composite materials from oxidation] //Konversija v mashinostroenii. 2004. №4. S. 77–81.
7. Solncev S.S., Isaeva N.V., Shvagireva V.V., Solov'eva G.A. Zharostojkie jemalevyje pokrytija dlja zashhity korrozionnostojkikh stalej i zharoprochnyh splavov ot vozdejstvija

- agressivnyh sred [Heat-resistant enamel coatings for corrosion protection of steel and heat resisting alloys from corrosion] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №1. S. 29–31.
8. Solncev S.S., Isaeva N.V., Shvagireva V.V., Solov'eva G.A. Vysokotemperaturnye zharostojkie jemaleyve pokrytija dlja zashhity ot korrozionnogo vozdeystvija produktov sgoranija topliva teplonagruzhennyh jelementov iz korrozionnostojkih stalej i zharoprochnyh splavov [High-temperature heat-resistant enamel coatings for protection against corrosion effects of the combustion products of thermally loaded components of corrosion resistant steels and superalloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №4. S. 16–18.
 9. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Zharostojkie teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant heat-protective coatings for high-pressure turbine blades looking GTE] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 60–70.
 10. Mubojadzhan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Preparation of ceramic thermal barrier coatings for turbine blades of aircraft GTE magnetron sputtering] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 3–8.
 11. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Osobennosti tehnologii vyplavki i razlivki sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnyh nikelovyh splavov [Technology features modern smelting and casting casting nickel-base superalloys] //Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Mashinostroenie. 2011. №SP2. S. 68–78.
 12. Solncev S.S., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solov'eva G.A. Armirovannye zharostojkie steklojemali dlja kamer sgoranija gazoturbinyh dvigatelej [Reinforced heat resistant vitreous for combustors of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 26–29.
 13. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Keramicheskie pokrytija dlja zashhity vysokoprochnoj stali pri termicheskoj obrabotke [The ceramic coating to protect the high-strength steel during heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 3–8.
 14. Solncev S.S. Zashhitnye tehnologicheskie pokrytija i tugoplavkie jemali [Protective technological coatings and refractory enamel]. M.: Mashinostroenie. 1984. 255 s.

15. Himicheskaja tehnologija stekla i sitallov [Chemical technology of glass and ceramics] /Pod red. N.M. Pavlushkina. M.: Strojizdat. 1983. 432 s.
16. Appen A.A. Temperaturostojchivye neorganicheskie pokrytija [Thermally stable inorganic coatings]. M.-L.: Himija. 1976. 107 s.
17. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Isaeva N.V. Razrabotka i primenenie v aviakosmicheskoy tehnikе steklokeramicheskikh pokrytij i materialov [Development and application in aerospace engineering glass-ceramic coatings and materials] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007. M.: VIAM. 2007. S. 99–107.