

УДК 629.7.023.224

Д.С. Кашин<sup>1</sup>, П.Е. Дергачева<sup>1</sup>, П.А. Стехов<sup>1</sup>

## ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ, НАНОСИМЫЕ ШЛИКЕРНЫМ МЕТОДОМ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75

*Представлен обзор современных научных публикаций, посвященных разработке и изучению жаростойких покрытий, наносимых шликерным методом. Рассмотрены различные системы металлических и эмалевых покрытий, получаемые шликерным методом, а также результаты испытаний образцов с покрытиями на жаростойкость. Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом, применяются для защиты от высокотемпературной газовой коррозии не только сталей, жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов, но и для защиты от окисления неметаллических материалов, таких как графит и углеродсодержащие композиционные материалы.*

**Ключевые слова:** покрытия, шликерный метод, эмали, жаростойкость, коррозионная стойкость, алюминидные покрытия, диффузионные покрытия, сплавы на основе никеля, графит.

D.S. Kashin<sup>1</sup>, P.E. Dergacheva<sup>1</sup>, P.A. Stekhov<sup>1</sup>

## HEAT RESISTANT SLURRY COATINGS (review)

*The work is an overview of modern scientific publications devoted to the development and study of refractory coatings applied by the slurry method. In the article various systems of metallic and enamel coatings obtained by the slurry method are considered, as well as the results of testing samples with coatings for heat resistance. Heat resistant coatings applied by the slurry method are used to protect against high-temperature gas corrosion not only of steels, heat-resistant nickel and cobalt alloys, but also to protect against oxidation of nonmetallic materials such as graphite and carbon-containing composite materials.*

**Keywords:** coatings, slurry method, enamels, heat resistance, corrosion resistance, aluminate coatings, diffusion coatings, nickel-based alloys, graphite.

---

<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 для повышения ресурса теплонагруженных конструктивных элементов широкое распространение получили различные жаростойкие и коррозионностойкие покрытия. Нанесение покрытий может осуществляться такими методами, как ионно-плазменный, атмосферно-плазменный, термодиффузионный, шликерный и т. п. [1–6]. Шликерный метод позволяет выполнять нанесение покрытий на крупногабаритные детали и детали сложной формы, а также осуществлять локальный ремонт покрытия без удаления всего покрытия и повторного нанесения по всей защищаемой поверхности [7, 8], что обеспечивает высокую экономическую эффективность. Шликерный метод характеризуется также относительной простотой и доступностью технологического оборудования, что обеспечивает широкое применение шликерных покрытий в различных отраслях промышленности для повышения жаростойкости различных материалов, включая неметаллические [9–14]. В данной статье рассмотрены различные системы покрытий, наносимых шликерным методом.

Во ФГУП «ВИАМ» разработка шликерных покрытий и технологий их нанесения ведется в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие коррозионные и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

В работах [16–19] и патенте [20] представлены шликерные покрытия, которые наносятся на различные группы сталей.

Исследование влияния концентрации алюминия в шликерном Al–Si покрытии на коррозионную стойкость образцов из аустенитной стали, работающих в контакте с расплавом Pb–Bi при температуре 600°C в течение 3000 ч, представлено в статье [16]. Показано, что при концентрации Al в поверхностном слое от 3–6 до 10–12% (по массе) образуется устойчивый оксидный слой – предположительно шпинельный  $FeOAl_2O_3$ , и сохраняется стойкость к окислению в течение всего периода проведения испытаний.

В работе [17] подобрано коррозионностойкое покрытие, обеспечивающее высокие защитные свойства при температурах до 450°C. Данное покрытие наносится на высокопрочные мартенситостареющие конструкционные стали. Проведены испытания на общую коррозионную стойкость, жаростойкость, ускоренные циклические испытания на коррозионную стойкость, испытания в камере солевого тумана и показано, что лучшим комплексом свойств обладает покрытие на основе Al–Si с алюмохромфосфатным связующим.

В статьях [18, 19] исследовано алюминидное шликерное покрытие, обеспечивающее защиту деталей паровых турбин. Данное покрытие наносили на ферритно-мартенситную сталь марки P92 и подвергали выдержке при температуре 650°C под воздействием пара при атмосферном давлении. Показано, что данное покрытие работоспособно в течение >40000 ч (рис. 1, а). Результаты испытаний на термоциклирование образцов с алюминидным шликерным покрытием и без него при температуре 650°C представлены на рис. 1, б.

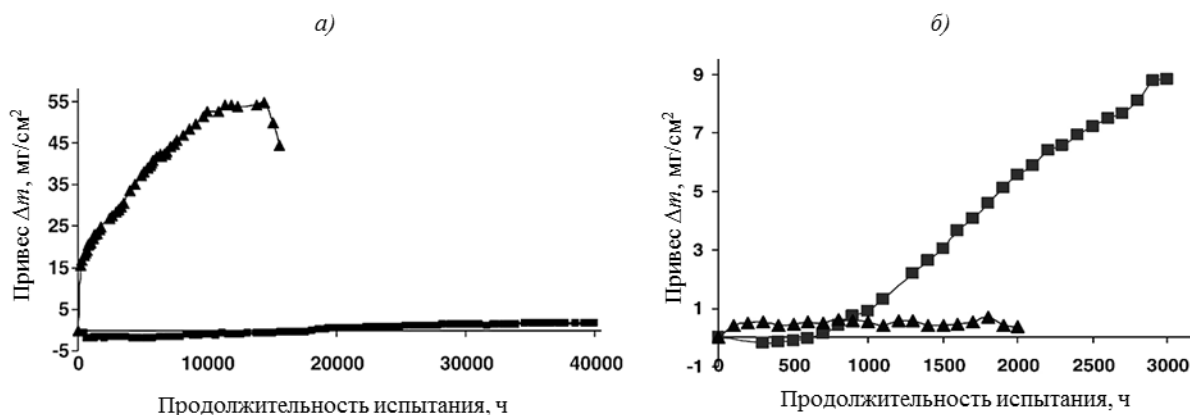


Рис. 1. Кинетические кривые изменения массы образцов из стали марки P92 без покрытия (▲) и с покрытием (■) при воздействии пара при 650°C (а) и циклических нагревах до 650°C на воздухе (б)

Патент [20] посвящен способу защиты низкоуглеродистой и нержавеющей сталей от коррозии при повышенных температурах в агрессивных средах. Предложено покрытие системы  $M-Cr-Al-X-Si-T$ , где  $M$  – никель, кобальт, железо или их смесь;  $X$  – иттрий, гафний, цирконий, лантан, скандий или их комбинация;  $T$  – тантал, титан, платина, палладий, рений, молибден, вольфрам, ниобий, бор или их смесь. Для получения шликера к порошку добавляют органическое связующее и растворитель.

Работы [21–26] посвящены шликерным покрытиям, которые наносятся на никелевые, железоникелевые и кобальтовые сплавы.

В статье [21] предложено эмалевое жаростойкое покрытие для литых свариваемых фасонных деталей на железоникелевой основе. Состав данного покрытия основан на системах  $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--BaO}$  и  $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ . В статье приведены результаты испытаний образцов с покрытиями на жаростойкость эмалевого покрытия при выдержке 100 ч, а также термостойкость до появления дефектов в покрытии (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики защитного эмалевого покрытия

Температура испытания, °С	Жаростойкость		Термостойкость	
	Привес, г/(м <sup>2</sup> ·ч)		Режим, °С	Количество циклов
	без покрытия	с покрытием		
700	0,06	0,003	700±20	500
900	0,18	0,024	900±20	250

Установлено, что окисляемость сплавов с покрытием меньше, чем без него в 25–30 раз при температурах 700°С после выдержки 100 ч и 1120°С после выдержки 3 ч (рис. 2). Кроме того, данное покрытие может использоваться как технологическое, т. е. для защиты деталей от окисления при термообработке.

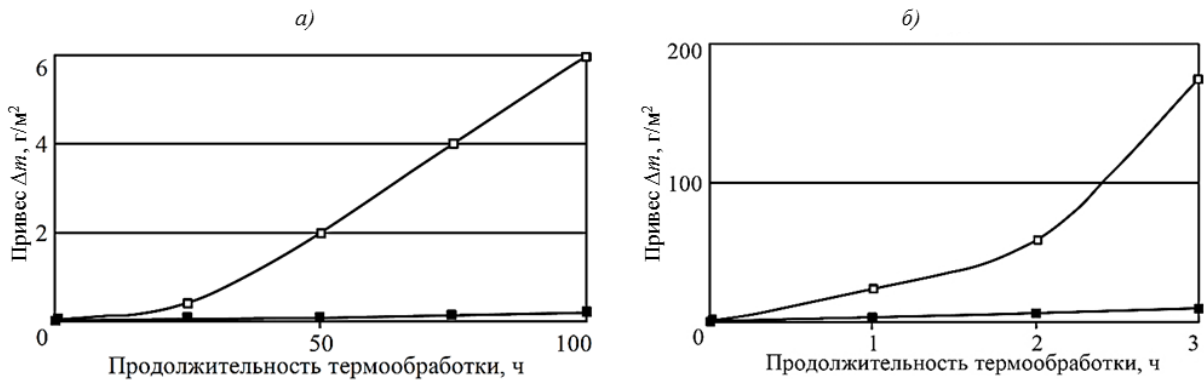


Рис. 2. Кинетика окисления железоникелевого сплава при температурах 700 (а) и 1120°С (б) без покрытия (□) и с покрытием (■)

В работе [22] разработаны жаростойкие покрытия системы  $\text{SiC--Si}_3\text{N}_4\text{--SiO}_2$ , которые могут использоваться для нанесения на уплотнительные истираемые материалы состава  $\text{Fe(Ni)--Cr--Al--Y}$ , работающие при температурах до 1100°С. Испытания на жаростойкость представлены на рис. 3, основные характеристики защитного покрытия – в табл. 2.

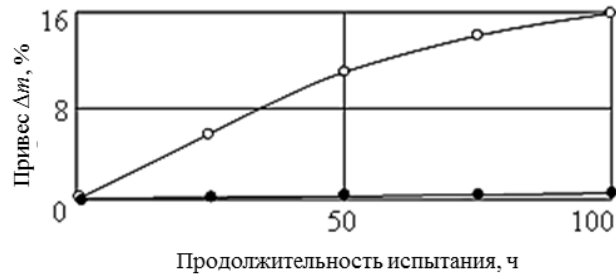


Рис. 3. Жаростойкость образцов уплотнительного материала системы  $\text{Fe(Ni)--Cr--Al--Y}$  с покрытием (●) и без покрытия (○)

Таблица 2

Основные характеристики уплотнительного материала с покрытием и без него

Свойства	Значения свойств для материала	
	с покрытием	без покрытия
Рабочая температура, °С	1100	900–950
Плотность, г/см <sup>3</sup>	≤2,2	≤2,1
Истираемость – соотношение износа уплотнительного материала к износу торца лопатки при врезании (температура испытания 1100°С)	5:1	Материал неработоспособен
Жаростойкость (привес после 100 ч работы), %	≤1,5	≥6
Термостойкость – количество циклов $T_{\text{раб}} \leftrightarrow 20^{\circ}\text{C}$ без видимых разрушений (1 цикл: 1 мин)	100	<100
Пористость, %	≥60	62

Статья [23] посвящена изучению жаростойких эмалевых покрытий системы  $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  с повышенным содержанием Al (20–30% (по массе)) для защиты жаропрочных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии (табл. 3).

Таблица 3

Составы исследуемых шликерных покрытий

Условный номер состава	Содержание $\text{Al}_2\text{O}_3$ в составе стекла, % (по массе)	Содержание модифицирующих добавок, введенных в состав шликера, % (по массе)		
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiB}_4$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$
1	30	–	–	5
2	30	–	1	
3	20	15	–	
4	20	15	1	

Результаты испытаний на жаростойкость образцов без покрытия и с покрытием составов 2 и 4 (табл. 3) представлены на рис. 4.

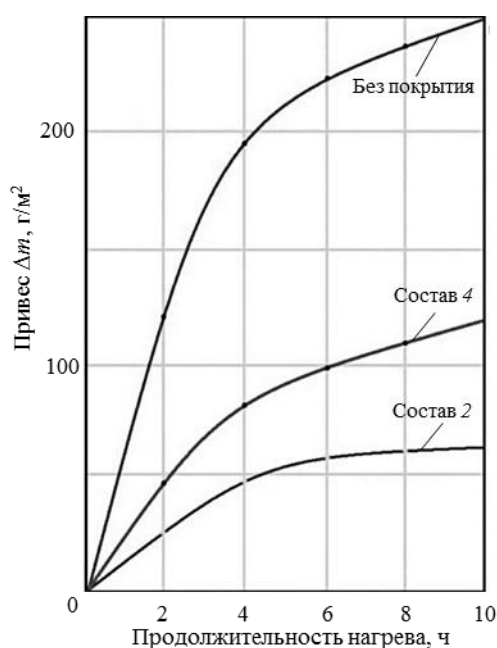


Рис. 4. Окисляемость образцов с покрытием и без покрытия при температуре 1200°С

Согласно полученным результатам, наиболее эффективным способом повышения высокотемпературной вязкости системы покрытия и, соответственно, температуры эксплуатации является введение тугоплавких модифицирующих добавок в состав фритт. При этом окисляемость сплава с покрытием на основе тугоплавких фритт почти в 2 раза меньше, чем сплава с покрытием с повышенным содержанием тугоплавких модифицирующих добавок – в данном случае оксида алюминия (рис. 4). Таким образом, основываясь на результатах исследований эффективности защитного действия синтезированных покрытий, можно сделать вывод о перспективности ресурсных стеклокристаллических эмалевых покрытий на основе стекол системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  для защиты жаропрочных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии при повышенных температурах эксплуатации летательных аппаратов. Применение покрытий позволяет снизить окисляемость жаропрочных никелевых сплавов почти в 4 раза, что позволит обеспечить работоспособность узлов и деталей газотурбинных двигателей современных летательных аппаратов.

В работе [24] представлены результаты исследований жаростойких покрытий на основе алюминидов железа, кобальта и никеля, которые наносятся на лопатки газовых турбин диффузионными методами. Изучены основные виды дефектов покрытий и пути их предотвращения. Подобрано оптимальное процентное соотношение Al и Si в алюмосилицидных шликерных покрытиях, обеспечивающее их жаростойкость, пластичность и вязкость разрушения. Кроме того, отмечено положительное влияние бора. Результаты испытаний на термоциклирование покрытий разных составов представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Влияние циклических нагревов на растрескивание покрытий**

Содержание элемента в покрытии, % (по массе)			Сплав-основа	Количество циклов до появления первой трещины при температуре, °С		Количество трещин на единицу длины периметра шлифа после 25 циклов, мм <sup>-1</sup> , при температуре, °С	
Al	Si	B		900	1100	900	1100
35	–	–	ЖС6У	1	1	6,2	6,7
28–30	5	–	ЖС6У	5	5	2,7	4,2
28–30	3–4	–	ЧС70	7	5	1,9	3,8
26–28	2	–	ЖС6У	8	5	1,2	3,5
26–28	2	–	ЧС70	10	5	0,7	2,5
26–28	2	1–2	ЖС6У	10	5	0,5	1,9
26–28	2	1–2	ЧС70	10	8	0,2	1,3
18	10	–	ЖС6У	1	1	6,5	8,7

В патенте [25] предложено алюминидное покрытие для нанесения на детали газотурбинных двигателей из никелевых и кобальтовых сплавов. В разработке получено покрытие, сохраняющее равномерность толщины слоя во время эксплуатации и предназначенное для защиты от высокотемпературного окисления. Шликер состоит из порошка Cr–Al, в котором от 50 до 80% (по массе) Cr и от 0,3% (по массе) активатора LiF, органического связующего и растворителя.

В работе [26] получены жаростойкие стеклокерамические покрытия на основе системы  $BaO-Al_2O_3-SiO_2$  для защиты камеры сгорания из сплава ВЖ171 от высокотемпературной газовой коррозии. Проведены испытания на жаростойкость и обнаружено, что после 100 ч при температуре 1100°С покрытие сплошное и не имеет дефектов. Кроме того, после испытаний на термостойкость при 1100±20°С (300 циклов) разрушения образцов и дефектов в покрытии не наблюдается.

В работах [7, 27, 28] и патентах [8, 29] предложены шликерные покрытия, которые наносятся на различные жаропрочные сплавы.

Статья [7] посвящена разработке целой группы стеклоэмалевых покрытий для деталей из никелевых, железоникелевых и высокохромистых сплавов, наносимых по

традиционной шликерно-обжиговой технологии. Для защиты сплавов типа ВЖ98 и ЭП648 применяют стеклоэмалевые покрытия типа ЭВК-103. Данные покрытия способны защитить детали от высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 1000°C. Их использование снижает окисление сплавов в ~7 раз, повышает ресурс и надежность изделий в 1,5–2 раза. Для коррозионностойких сталей и различных железоникелевых сплавов часто используют покрытия ЭВ-300-60М, ЭВ-86 и ЭВ-86-1. Данные покрытия применяют для защиты от высокотемпературной газовой коррозии при температурах от 600 до 900°C. Они снижают окисление в 6–8 раз и науглероживание – в ~7 раз. В статье [7] также рассмотрены эмалевые покрытия для оперативного ремонта – типа ЭВР, не требующие высокотемпературного обжига. Основные характеристики серийных стеклоэмалевых покрытий представлены в табл. 5.

*Таблица 5*

**Основные свойства стеклоэмалевых покрытий типа ЭВР**

Свойства	Значения свойств
Рабочая температура, °С	До 1000 (длительно)
Температура формирования, °С	860–1200
Толщина, мкм	60–120
Прочность сцепления, %	98
Термостойкость – количество циклов по режиму 1000±20°C	Более 250
Коррозионная стойкость	Снижение удельной потери массы образцов в 5–10 раз, работоспособность во всех климатических условиях
Жаростойкость, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	0,034–0,058

Покрытия марок ЭВК-75, ЭВК-103, ЭВК-103М, ЭВК-127 и др. часто применяются для защиты различных деталей из жаропрочных сплавов. Они отличаются хорошим сцеплением с подложкой, высокими показателями жаро- и термостойкости и устойчивостью в скоростных агрессивных потоках: длительно – при 900–1100°C и кратковременно – при 1200°C [27].

В статье [28] представлено развитие диффузионной модели эволюции распределения концентраций легирующих элементов в зоне диффузионного взаимодействия на границе «сплав–покрытие» и во внешней зоне покрытия на примере шликерных алюминидных покрытий для лопаток газовых турбин, обеспечивающих защиту от высокотемпературного окисления и сульфидной коррозии. Данные покрытия можно использовать для двигателей второго и третьего поколений ДЖ-59 и ДГ-90, работающих при температуре не более 870 и 1070°C соответственно. Суспензия основана на растворе коллоксилина в амилацетате и содержит порошки: 680 г/л Al, 114 г/л Si и 139 г/л Cr.

В патенте [8] предложен способ восстановления поврежденных высокотемпературных кремнийсодержащих покрытий на деталях из жаропрочных конструкционных материалов, работающих при температурах 1300–2000°C. Шликер включает в себя порошки (табл. 6) и связующее – золь кремниевой кислоты в объемном соотношении с порошком сплава от 1:3 до 3:1.

*Таблица 6*

**Состав шликерного ремонтного покрытия**

Элемент	Ti	Mo	Y	B	Si
Содержание, % ( по массе)	15,0–40,0	5,0–30,0	0,1–1,5	0,5–2,5	26,0–79,4

Шликерные покрытия могут применяться в качестве функциональных слоев в многослойных покрытиях [29]. В данной разработке шликерное покрытие является частью трехслойного теплозащитного покрытия, которое используется для нанесения на

крупногабаритные изделия со сложной конфигурацией, работающие при высоких температурах. Шликер содержит мелкодисперсный порошок на основе алюминия (40–60% (по массе)) и алюмохромфосфатное связующее (остальное). Порошок, в свою очередь, состоит из кремния (0,5–15% (по массе)) и алюминия (остальное), а также может содержать иттрий (0,1–1,3% (по массе)).

Шликерные покрытия для защиты титановых сплавов и влияние щелочноземельных оксидов на свойства стеклоподобных покрытий систем  $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O--R}^{2+}\text{O}$  и  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--K}_2\text{O--R}^{2+}\text{O}$  (где  $\text{R}^{2+}$  – катионы щелочноземельных металлов (Be, Mg, Ca, Sr, Ba)) изучены в статье [30]. Проведены исследования покрытий разных составов на способность защитить титановый сплав от высокотемпературной коррозии (рис. 5).

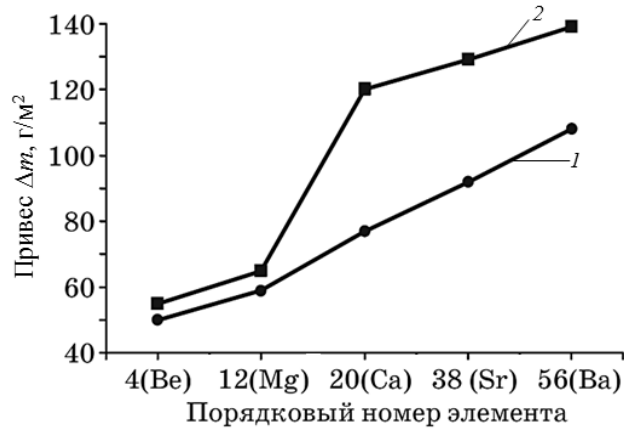


Рис. 5. Зависимость привеса образцов стеклопокрытий от природы щелочноземельного металла при температуре 1200°C для составов, % (по массе):

1 –  $48\text{SiO}_2+20\text{B}_2\text{O}_3+12\text{K}_2\text{O}+20\text{RO}$ ; 2 –  $64\text{SiO}_2+16\text{K}_2\text{O}+20\text{RO}$

Установлено, что введение щелочноземельных оксидов в состав покрытий снижает вязкость и защитные свойства тем больше, чем больше ионный радиус вводимого металла. С увеличением содержания щелочноземельных оксидов до 20% (по массе) поверхностное натяжение увеличивается во всех случаях. Наибольшее увеличение вызывает введение оксида магния, а наименьшее – оксида бария.

Шликерные покрытия могут применяться не только для различных металлических сплавов, но и для неметаллических материалов, например, таких как графит [9–14].

В работе [9] предложены и изучены покрытия на основе систем « $\text{ZrB}_2$ –кремнийсодержащее соединение (Si,  $\text{SiO}_2$ , SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )», которые в дальнейшем могут применяться для нанесения на графитовые изделия. Компактные образцы получали методом холодного прессования, а покрытия – по шликерно-обжиговой технологии. При формировании материалов использовали изотермический (образцы помещали в нагретую печь) и неизотермический (образцы нагревали с печью) режимы. Составы исследованных композиций представлены в табл. 7. Результаты испытаний при температуре 1350°C в течение 10 ч представлены на рис. 6.

Таблица 7

Составы исследуемых композиций покрытий

Условный номер образца	Состав образца, % (по массе)		
	$\text{ZrB}_2$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\text{SiO}_2$ (из золя)
1	90	10	–
2	90	10	10
3	50	50	–
4	50	50	10

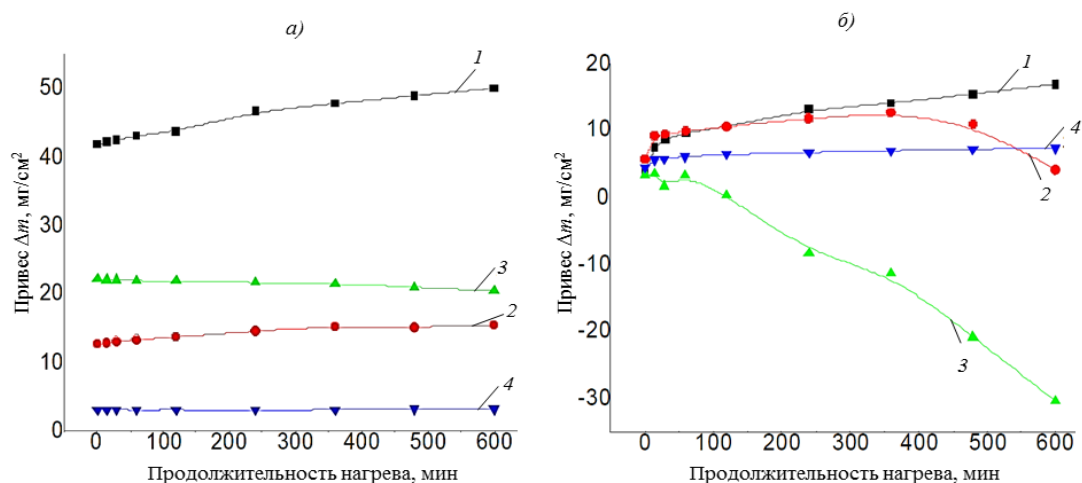


Рис. 6. Кинетические кривые окисления образцов из графита с покрытиями (составы 1–4 – см. табл. 7), сформированными по неизотермическому (а) и изотермическому (б) режимам и термообработанными при 1350°C в течение 10 ч

При изучении жаростойкости покрытий (рис. 6) установлено, что покрытия, сформированные по неизотермическому режиму, защищают графит от окисления при 1350°C не менее 10 ч. Введение 10% (по массе) золя SiO<sub>2</sub> (составы 2 и 4) существенно повышает жаростойкость при неизотермическом режиме, а при изотермическом режиме уже через 100–200 мин наблюдается убыль массы, связанная с образованием трещин в покрытиях, вызванных недостаточной термостойкостью стекломатрицы.

Статья [10] также посвящена исследованию покрытий на основе ZrB<sub>2</sub>–Si–B (табл. 8), которые наносят на графит. Проведены испытания на жаростойкость образцов без покрытий и с покрытиями различного состава при 1000 и 1300°C (рис. 7 и 8).

Таблица 8

Составы исследуемых образцов

Условный номер образца	Состав образца, % (по массе)		
	Si	B	ZrB <sub>2</sub>
1	70	30	–
2	70	–	30
3	70	10	20

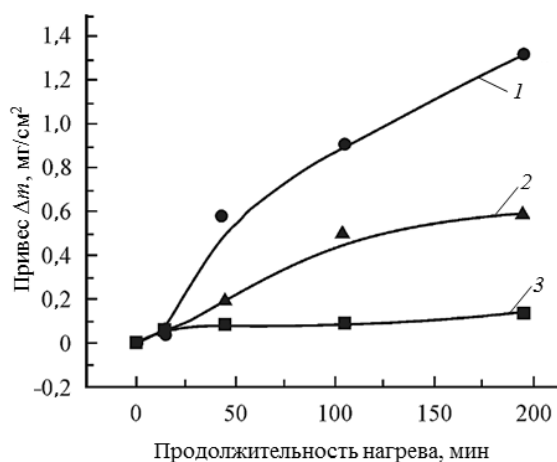


Рис. 7. Кинетические кривые окисления образцов из графита с покрытиями (составы 1–3 – см. табл. 8) при температуре 1000°C в течение 200 мин

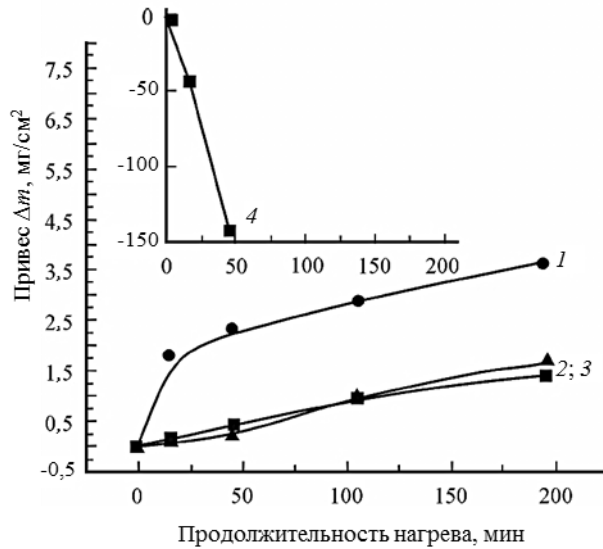


Рис. 8. Кинетические кривые окисления образцов из графита без покрытия (4) и с покрытиями (составы 1–3 – см. табл. 8) при температуре 1300°C в течение 200 мин

За 200 мин прирост массы во всех случаях не превышает 1,5 мг/см<sup>2</sup>, причем наименьший прирост наблюдается в составах, содержащих борид циркония. При 1300°C прирост массы не превышает 3,5 г/м<sup>2</sup>, в то время как графит без покрытия полностью выгорает за несколько минут.

В работе [11] рассмотрены покрытия системы ZrB<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub> с добавлением золя SiO<sub>2</sub>, наносимые на углеродные материалы. Результат исследования жаростойкости образцов с покрытием состава 70% (по массе) ZrB<sub>2</sub>+30% (по массе) MoSi<sub>2</sub>+золь SiO<sub>2</sub> представлен на рис. 9.

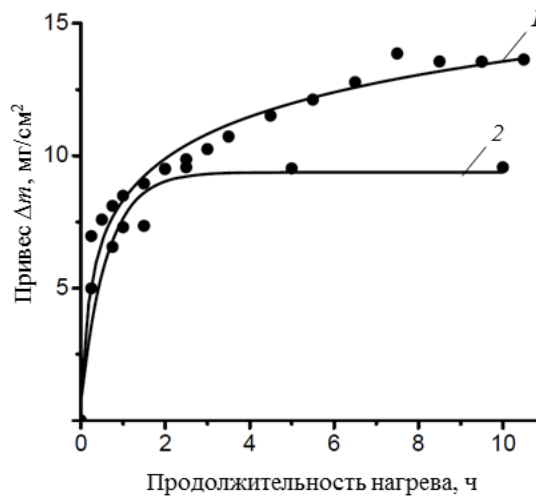


Рис. 9. Кинетические кривые изменения массы материалов с покрытием состава 70% (по массе) ZrB<sub>2</sub>+30% (по массе) MoSi<sub>2</sub>+золь SiO<sub>2</sub> при температурах 1100 (1) и 1400°C (2)

Наилучшими характеристиками обладают покрытия системы ZrB<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub> с добавлением наноразмерных золь SiO<sub>2</sub>, причем чем меньше размеры частиц оксида кремния, тем выше скорость образования герметизирующего защитного слоя. Установлено, что оптимальной температурой формирования покрытия является 1400°C. При

1100°C образование герметизирующего слоя происходит медленнее, однако покрытие выполняет защитную функцию – выгорания графита не происходит (рис. 9).

Покрытия, нанесенные шликерным методом, могут применяться в качестве жаро- и эрозионностойких [12, 13]. Так, автор работы [12] предлагает шликерные покрытия на основе систем Si–TiSi<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub>–B–Y (марка Д5У МАИ) и Si–TiSi<sub>2</sub>–MoSi<sub>2</sub>–B–Y с нитевидными кристаллами SiC (марки М1 МАИ, М2 МАИ, М3 МАИ). Данные покрытия предназначены для нанесения на углеродсодержащие композиционные материалы, работающие при воздействии механических нагрузок и высокотемпературных потоков кислородсодержащих сред. Защитное покрытие марки Д5У МАИ обеспечивает защиту от высокотемпературной газовой коррозии и эрозии при температурах 300–2100 К. Данное покрытие наносится на тугоплавкие и композиционные углеродные материалы и имеет состав, % (атомн.): 9,7–36,0 Ti; 1,6–13,5 Mo; 1,4–9,96 B; 0,03–0,73 Y; Si – остальное.

В статье [14] разработан материал покрытия для угольного анода алюминиевого электролизера, температура на поверхности которого составляет 700–950°C. В состав шликера входили порошки, а именно: борная кислота или оксиды бора и алюминия, связующее – вода. Результаты испытаний покрытий на разрушаемость при продувке углекислым газом (при 950°C) в течение 3 ч с расходом газа 50 дм<sup>3</sup>/мин представлены в табл. 9. Проведенный сравнительный микроскопический анализ подтвердил эффективность защитных покрытий.

Таблица 9

Разрушаемость образцов с покрытием системы В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>–Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub> (в % (по массе))

Газовая среда CO <sub>2</sub>					
Покрытие	Без покрытия	50В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> +50Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	25В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> +75Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	9В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> +91Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	
Удельное изменение массы Δm, мг/(см <sup>2</sup> ·ч)	2,63	0,63	1,48	2,16	
Газовая среда CO <sub>2</sub> +AlF <sub>3</sub>					
Покрытие	Без покрытия	14Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	25Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	35Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>	50Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub>
Удельное изменение массы Δm, мг/(см <sup>2</sup> ·ч)	4,06	0,14	0,15	0,77	2,44

### Заключения

Шликерный метод нанесения покрытий обладает такими преимуществами, как простота и доступность технологического оборудования, возможность нанесения покрытий на изделия сложной формы, практически неограниченные габариты покрываемых изделий, ремонтпригодность покрытия, широкий спектр защитных свойств. Шликерные покрытия могут применяться как в качестве окончательных жаростойких покрытий, так и в качестве технологических покрытий [21], в том числе и для неметаллических материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs // Russian metallurgy (Metally). 2012. No. 1. P. 1–7.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. 2007. №5. С. 23–34.

3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 60–70.
4. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 17–20.
5. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
6. Артеменко Н.И., Симонов В.Н., Власова Д.В. Исследование процесса осаждения нитрида титана на установке ионно-плазменного напыления МАП-3 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №12 (60). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-11-11.
7. Гращенко Д.В., Солнцев С.С., Исаева Н.В. и др. Эмали и керамика // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №5. С. 35–42.
8. Способ восстановления высокотемпературного кремнийсодержащего защитного покрытия на жаропрочных конструкционных материалах: пат. 2437961 Рос. Федерация; заявл. 29.07.10; опубл. 27.12.11.
9. Коловертнов Д.В. Процессы окисления стеклокерамических композиций на основе боридов циркония и кремнийсодержащих соединений: дис. ... канд. хим. наук. СПб., 2012. 215 с.
10. Баньковская И.Б., Васильева И.А., Коловертнов Д.В. Процессы окисления композиции кремний-бор-борид циркония в интервале температур 1000–1300 °С // *Физика и химия стекла*. 2012. Т. 38. №3. С. 409–416.
11. Плотникова А.С. Закономерности гетерогенных взаимодействий при синтезе реакционно-связанных защитных покрытий для углеродных материалов // *I Междисциплинарная школа-семинар «Химия неорганических материалов и наноматериалов»*: сб. тез. докл. М., 2006. С. 28–31.
12. Астапов А.Н. Разработка высокотемпературных защитных покрытий на углеродсодержащие композиционные материалы применительно к особотеплонагруженным элементам конструкций авиакосмической и ракетной техники: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 207 с.
13. Терентьева В.С., Жестков Б.Е. Многофункциональные высокотемпературные покрытия Д5 МАИ и М1 МАИ // *Химическая физика*. 2009. Т. 28. №5. С. 64–70.
14. Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П., Фризоргер В.К. Защита поверхности анода алюминиевого электролизера от окисления // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2010. №3. С. 272–283.
15. 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.
16. Голубева О.В., Марков В.Г., Яковлев В.А., Чикиряка А.В. Метод повышения сопротивления окислению в теплоносителе свинец–висмут // *Вопросы материаловедения*. 2008. №4 (56). С. 106–115.
17. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°С // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
18. Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S. Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components // *Surface & Coatings Technology*. 2005. No. 200. P. 1219–1224.
19. Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components // *Surface & Coatings Technology*. 2007. No. 201. P. 6253–6260.

20. Protective system for high temperature metal alloy products: pat. US 6682780 B2; publ. 27.01.04.
21. Солнцев С.Ст., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Многоцелевое стекломалевоое покрытие для защиты литых фасонных деталей газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №3. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-4-4.
22. Розененкова В.А., Солнцев Ст.С., Миронова Н.А. Тонкопленочные покрытия для уплотнительных истираемых материалов на основе дискретных волокон для проточного тракта ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2018).
23. Денисова В.С., Соловьева Г.А., Орлова Л.А. Синтез ресурсных жаростойких эмалевых покрытий на основе стекол барийалюмосиликатной системы для никелевых сплавов // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. XXVIII. №8. С 39–42.
24. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. №3. С. 51–82.
25. Slurry compositions for diffusion coatings: pat. 6110262 US; publ. 29.08.00.
26. Денисова В.С., Соловьева Г.А. Жаростойкое стеклокерамическое покрытие для защиты деталей камер сгорания газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 18–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-18-22.
27. Солнцев С.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики для авиакосмической техники // Российский химический журнал. 2010. №1. С. 25–33.
28. Ачимов А.А., Толмачев И.М., Удовиченко С.Ю. Исследование жаростойкого диффузионного покрытия на лопатках газотурбинных двигателей из жаропрочного никелевого сплава // Вестник Тюменского государственного университета. 2014. №7. С. 105–111.
29. Способ нанесения покрытия: пат. 2214475 Рос. Федерация; заявл. 27. 11.01; опубли. 20.10.03.
30. Карасик Т.Л. Влияние оксидов щелочноземельных металлов на свойства жаростойких покрытий // Збірник наукових праць ПАТ «Укрнді вогнетривів ім. А.С. Бережного». 2013. №113. С. 240–245.