

УДК 621.438-226.739.6

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом

В.М. Самойленко¹, Г.Т. Пашенко², Е.В. Самойленко¹,
В.В. Шестаков³

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
г. Москва, Россия

³Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО»
г. Лыткарино, Россия

Аннотация: Развитие современного газотурбостроения предъявляет все более высокие требования к свойствам применяемых сплавов, связанных с повышением температуры газа перед турбиной. Однако применяемые никелевые сплавы имеют низкую жаростойкость при высоких температурах. Решения этой проблемы добиваются путем совместного применения жаропрочного сплава, воспринимающего нагрузки при высоких температурах, и нанесением защитных покрытий для обеспечения жаростойкости. Покрытие и жаропрочный сплав образуют сложную систему. Каждый компонент системы выполняет основную и второстепенную функции в работе, а система должна удовлетворять эксплуатационным требованиям. Выбор применяемого покрытия и технологии нанесения достаточно сложен, так как его структура и толщина зависят от многих факторов, в частности от состава исходных компонентов, температурно-временных параметров нанесения и т. д. Это оказывает влияние на работоспособность сформированного покрытия в условиях эксплуатации. В последние годы за рубежом и в нашей стране успешно развиваются шликерные методы нанесения покрытий и, в частности, формируемые из водных суспензий. Такой метод технически прост и экономичен. Качество формируемого из водной суспензии покрытия определяется процентным содержанием состава суспензии, ее реологическими и физическими свойствами, соблюдением технологии ее нанесения и обработки на детали. С целью понимания механизма формирования покрытия из водной суспензии необходимо представлять воздействие параметров суспензии на свойства покрытия. В статье представлены результаты проведенного исследования расчетным методом влияния параметров водной суспензии на качество получаемого покрытия. Показана зависимость толщины покрытия от размеров частиц порошков, вводимых в суспензию. Представлены расчеты плотности и толщины получаемого покрытия от соотношения твердой и жидкой фаз водной суспензии. Указывается, что в реальной суспензии влияние параметров водной суспензии на показатели формируемого покрытия являются более сложными, чем при проведении расчетов. Это в первую очередь связано с тем, что в реальной суспензии присутствуют частички порошков различного диаметра, в частности алюминия. Кроме того, взаимодействие ортофосфорной кислоты с вводимыми оксидами алюминия, кремния и другими, имеющими молекулярную дисперсность, их химическое взаимодействие усложняют учет всех этих факторов при расчетах. Однако полученные результаты исследования позволяют сделать оценку влияния параметров состава водной суспензии на технологические и служебные свойства покрытия, получаемого из такой суспензии шликерным методом.

Ключевые слова: водная суспензия, параметры суспензии, толщина покрытия, твердая и жидкая фазы суспензии.

Для цитирования: Самойленко В.М. Влияние параметров суспензии на свойства покрытия, получаемого шликерным методом / В.М. Самойленко, Г.Т. Пашенко, Е.В. Самойленко, В.В. Шестаков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 53–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

The effect of suspension parameters on the properties of the coating obtained by the slip method

V.M. Samoylenko¹, G.T. Paschenko², E.V. Samoylenko¹,
V.V. Shestakov³

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

²*A. Lyulka Experimental Design Bureau – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Moscow, Russia*

³*Lytkarinsky Machine-Building Plant – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Lytkarino, Moscow, Russia*

Abstract: The development of modern gas turbine engineering imposes increasingly high requirements for the properties of the alloys used, associated with an increase in gas temperature before the turbine. However, the applicable nickel alloys have low heat resistance at high temperatures. The solution to this problem is achieved through the joint use of a heat-resistant alloy that takes loads at high temperatures, and the application of protective coatings to ensure heat resistance. The coating and the heat-resistant alloy form a complex system. Each component of the system performs the primary and secondary functions in the operation, and the system must meet operational requirements. The choice of the applied coating and its application technology are quite complicated, since its structure and thickness depend on many factors, in particular, on the composition of the original components, temperature, and time parameters of its application, etc. This affects the performance of the formed coating under operating conditions. In recent years, slip coating methods specifically formed from aqueous suspensions have been successfully developed abroad and in our country. This method is technically simple and economical. The quality of the coating formed from the aqueous suspension is determined by the percentage of the suspension composition, its rheological and physical properties, compliance with the technology of its application and processing of parts. In order to understand the mechanism of coating formation from the aqueous suspension, it is necessary to imagine the effect of the suspension parameters on the coating properties. The article presents the results of the study carried out by the computational method of the influence of the aqueous suspension parameters on the quality of the coating obtained. The dependence of the coating thickness on the particle sizes of the powders introduced into the suspension is shown. Calculations of the density and thickness of the obtainable coating from the ratio of the solid and liquid phases of the aqueous suspension are presented. It is indicated that in a real suspension, the influence of the aqueous suspension parameters on the coating parameters being formed is more complex than when performing calculations. This is primarily associated with the fact that in a real suspension there are powder particles of various diameters, in particular aluminum. In addition, the interaction of orthophosphoric acid with the introduced oxides of aluminum, silicon, etc., having molecular dispersion, their chemical interaction complicates considering all these factors in calculations. However, the obtained results of the study allow us to assess the influence of the aqueous suspension composition parameters on the technological and service properties of the obtainable coating obtained by the slip method from this suspension.

Key words: aqueous suspension, suspension parameters, coating thickness, solid and liquid phases of suspension.

For citation: Samoylenko, V.M., Paschenko, G.T., Samoylenko, E.V. & Shestakov, V.V. (2022). The effect of suspension parameters on the properties of the coating obtained by the slip method. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 53–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-53-61

Введение

С целью повышения жаростойкости, а значит, и долговечности лопаток турбины газотурбинного двигателя (ГТД), при их производстве и ремонте используется большой арсенал алюминидных покрытий: диффузионные (порошковые, шликерные, газоциркуляционные, алитирование в расплавах), конденсационные (электронно-лучевое, плазменное, лазерное, магнетронное и катодное

распыление), а также комбинированные и комплексные покрытия [1, 2].

Для получения этой широкой гаммы покрытий используют специальные дорогостоящие установки, поэтому при ремонте лопаток турбины ГТД жаростойкие алюминидные покрытия наносят более простым – шликерным методом (метод красок), основы которого были разработаны В.И. Просвириным [3, 4] еще в 1970-х годах.

В последние годы развиваются технологии получения защитного покрытия из вод-

ных суспензий. Так, американская фирма Sermatech Inc разработала ряд жаростойких покрытий Sermalloy J, Sermalloy W и других, наносимых из водной суспензии методом покраски, которые рекомендуется применять для защиты горячего тракта ГТД (в том числе и для внутренней поверхности лопаток турбины) морских судов. Покрытие Sermalloy J широко применяется английской фирмой «Ролс-Ройс» для защиты лопаток, изготовленных из сплава Jn 738 LC.

В Российской Федерации данное направление успешно развивал профессор Е.Г. Иванов. Им разработан ряд покрытий [5, 6], наносимых шликерным методом, включая и новые покрытия, формируемые из водных суспензий [7, 8].

Поэтому необходимо понимать механизм формирования получаемого нового покрытия из водных суспензий и определить влияние параметров суспензии на его качество.

Результаты расчета и их обсуждение

Новая суспензия для нанесения покрытия состоит из фосфатно-хроматной связки на водной основе и активной составляющей порошков алюминия и кремния. Активная часть суспензии – система алюминий-кремний после удаления воды при повышенной температуре образует легкоплавкий расплав с эвтектической составляющей [9].

Формирование покрытия из водной суспензии протекает с экзотермическими реакциями [10], что требует определения соотношения жидкой и твердой фазы, а также ее влияния на плотность $\rho_{\text{п}}$ и толщину $h_{\text{п}}$ получаемого покрытия.

Для проведения расчета сделаем следующие допущения.

Строение исходной суспензии будем принимать как твердую фазу, состоящую из шариков (частиц порошка) одинакового размера ($A = \text{const}$), и жидкую фазу одинаковой толщины h , осевшую на твердых шариках (рис. 1). При испарении воды толщина жидкой фазы уменьшается от h до X . При этом структура покрытия становится подобной структуре суспензии. Толщина оксидной пленки на каждом шарике (частичке порошка) остается постоянной (X).

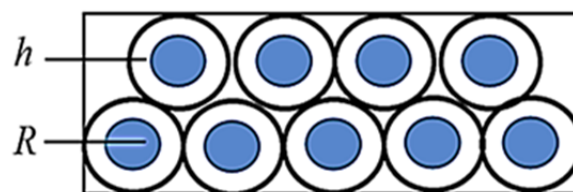


Рис. 1. Микроструктура оксидно-металлического покрытия: h – толщина пленки, R – радиус частицы

Fig. 1. Microstructure of the oxide-metal coating: h is the thickness of the film, R is the radius of the particle

1. Плотность твердой частицы порошка по ее сечению постоянна.

2. Изменениями объема оксидной пленки, вызванными химическими взаимодействиями, пренебрежем.

Объем и массу одной твердой частицы можно рассчитать:

$$V' = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (1)$$

и
$$m' = V' \rho = \frac{\pi d^3}{6} \rho. \quad (2)$$

Объем жидкой среды (V''), который будет приходиться на одну частицу твердой фазы, можно определить:

$$V'' = \frac{4}{3}\pi[(R + h)^3] = \frac{\pi}{3}(3d^2h + 6h^2d + 4d^3), \quad (3)$$

а весь объем жидкой фазы V определим:

$$V = V''N_{\text{частиц}} = V' \frac{m_{\text{т}}}{m'} = \frac{2m_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} \left(\frac{3d^2h + 6h^2d + 4d^3}{d^3} \right), \quad (4)$$

где m_T и ρ_T – масса и плотность твердой фазы,

m_T' – масса одной частицы твердой фазы.

Весь объем жидкой фазы в данной суспензии состоит из объема воды V_b и объема оксидов V_o :

$$V = V_b + V_o. \quad (5)$$

То есть, подставив значения объемов, получим

$$\frac{m_{ж}}{\rho} = \frac{m_{ж}K_{H2O}}{\rho_{H2O}} + \frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o}, \quad (6)$$

где K_{H2O} – массовая доля воды в суспензии,

ρ_o – плотность оставшихся оксидов.

Определим плотность оставшихся оксидов:

$$\rho_o = \frac{100 - K_{H2O}}{\frac{100}{\rho} - K_{H2O}}. \quad (7)$$

Подставим значение $V_o = \frac{4}{5}\pi[(R + X)^3 - R^3]$ в уравнение (1) и определим X (рис. 2):

$$V_b = \frac{4}{3}\pi \left[\left(d + h - \sqrt[3]{\frac{(100 - K_{H2O})m_{ж}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} \right)^3 - \frac{d^3}{8} \right]. \quad (10)$$

Чтобы найти весь объем воды, испарившейся из суспензии, необходимо испарившийся объем воды с одной частицы умножить на количество частиц, находящихся в суспензии. Тогда получим

$$V_b^* = \frac{8m_{ж}}{d^3\rho_{ТВ}} \left[d + h - \sqrt[3]{\frac{(100 - K_{H2O})m_{ж}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} \right]^3 - \frac{d^3}{8}. \quad (11)$$

После удаления воды образуется покрытие, состоящее из твердых частиц и конденсированных на них оксидов, что обеспечивает прочное покрытие (цементированное), которое можно транспортировать (рис. 3).

Тогда плотность покрытия можно определить:

$$\rho_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{m_{ТВ} + V_o^*\rho_o}{V_{ТВ} + V_o^*} = \rho_{ТВ} \cdot \frac{m_{ТВ} + V_o^*\rho_o}{m_{ТВ} + V_o^*\rho_{ТВ}}, \quad (12),$$

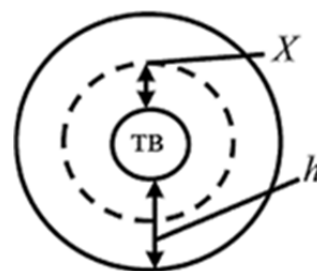


Рис. 2. Уменьшение толщины пленки от h (исходная толщина) до X (толщина оксидов) в процессе удаления воды

Fig. 2. Reduction of film thickness from h (initial thickness) to X (thickness of oxides) during water removal

$$\frac{4}{3}\pi[(R + X)^3 - R^3] = \frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o}m, \quad (8)$$

$$X = \sqrt[3]{\frac{100 - K_{H2O}}{\rho_o} \cdot \frac{3}{4}\pi + \frac{d^3}{8}} - \frac{d}{2}. \quad (9)$$

Объем воды, испарившейся с одной частицы, получится

где V_o^* – объем конденсированных оксидов, а ρ_o – их плотность.

Толщину покрытия можно получить из пропорции

$$\frac{V_{\text{сусп}}}{h_{\text{сусп}}} = \frac{V_{\Pi}}{h_{\Pi}} \rightarrow h_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}h_{\text{сусп}}}{V_{\text{сусп}}}. \quad (13)$$

После подстановки и преобразования получаем

$$h_{\Pi} = \frac{m_{\text{ТВ}} + V_0^* \rho_0}{\frac{\rho_{\Pi}(d+2h)}{V_{\text{суп}}}}. \quad (14)$$

Результаты расчета влияния соотношения твердой и жидкой фаз суспензии и диаметра частицы твердой фазы на толщину и плотность покрытия, а также объем выделившейся воды сведен в табл. 1.

С точки зрения получения качественного покрытия одним из значимых параметров является его получаемая толщина. Известно [11, 12], что от толщины покрытия зависит его работоспособность, так как она определяет количество содержащегося в покрытии алюминия. Однако значительное увеличение толщины покрытия и содержания алюминия в покрытии приводит к снижению пластичности такого покрытия и увеличению разнотолщинности, что приводит к сколам и растрескиванию такого покрытия, а значит, снижению его работоспособности [13–15].



Рис. 3. Внешний вид покрытия лопаток после сушки при температуре 50...70 °С – 15 минут
Fig. 3. Appearance of the blade coating after drying at a temperature of 50...70 °C – 15 minutes

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета влияния соотношения фаз суспензии и диаметра частицы твердой фазы на плотность и толщину получаемого покрытия
The results of calculating the effect of the ratio of the suspension phases and the diameter of the solid phase particle on the density and thickness of the obtainable coating

$m_{\text{ТВ}}/m_{\text{ж}}$	d , мкм	$V_{\text{в}}^*$, %	V_0^* , %	$V_{\text{суп}}$, %	ρ_{Π} , г/см ³	h_{Π} , мкм
80/20	1	1,4	35,0	98,6	2,165	1,15
	5	1,8	34,6	98,2	2,169	5,75
	10	1,5	34,9	98,5	2,166	11,5
	15	1,9	34,8	98,1	2,169	17,9
60/40	1	11,2	50,9	88,8	1,811	1,24
	5	11,8	50,8	88,2	1,815	6,11
	10	11,3	50,7	88,7	1,812	12,52
	15	11,9	50,1	88,1	1,819	20,7
40/60	1	18,3	61,1	81,7	1,496	1,64
	5	19,0	60,5	81,0	1,499	6,91
	10	18,7	60,7	81,3	1,498	13,8
	15	19,1	60,3	80,9	1,197	20,7
20/80	1	27,5	63,7	72,5	1,312	1,64
	5	28,0	63,2	72,0	1,313	8,17
	10	27,8	63,3	72,2	1,312	16,35
	15	28,1	63,2	72,9	1,313	24,5
1/99	1	25,2	74,3	74,8	1,218	4,8
	5	25,3	74,3	74,7	1,218	24,0
	10	25,0	74,6	75,0	1,218	48,1
	15	25,0	74,6	75,0	1,218	72,1

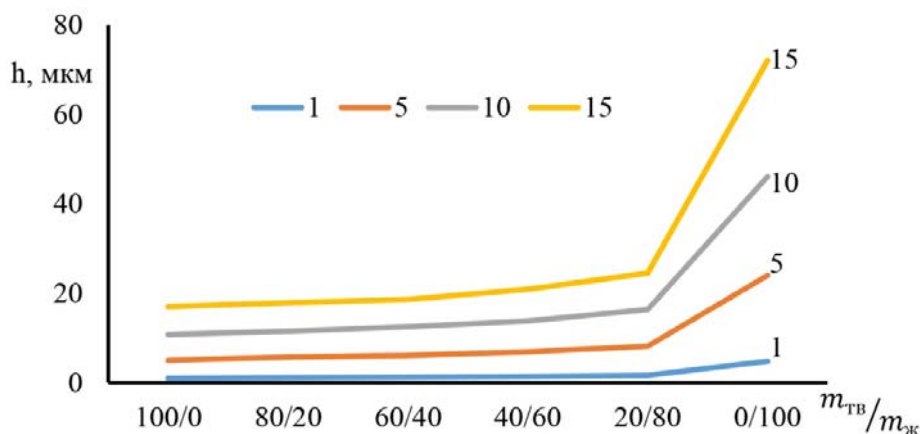


Рис. 4. Влияние диаметра частиц алюминия и отношения твердой и жидкой фаз на толщину формируемого покрытия
Fig. 4. Influence of the aluminum particles diameter and the ratio of solid and liquid phases on the thickness of the coating under formation

Как видно из полученных расчетов (табл. 1 и рис. 4) толщина покрытия возрастает с увеличением диаметра частиц алюминиевого порошка в суспензии. Для уменьшения толщины покрытия, а также разнотолщинности покрытия на конкретной детали, следует в суспензии использовать высокодисперсные порошки.

Некоторое увеличение толщины покрытия с ростом жидкой фазы можно объяснить более рыхлой структурой оксидной фазы в сравнении с металлической фазой.

Плотность покрытия (табл. 1) не зависит от диаметра частицы алюминиевого порошка, но монотонно возрастает с увеличением его концентрации в водной суспензии.

Количество выделяемой воды (табл. 1) практически не зависит от размеров порошка металлической составляющей суспензии и определяется в основном содержанием жидкой фазы суспензии. Для получения более качественного (без пор) покрытия, формируемого из водной суспензии, содержащей повышенное количество жидкой фазы, процесс ее удаления следует вести более осторожно, чем при формировании покрытия с меньшим содержанием жидкой фазы. Большое содержание жидкой фазы требует медленного увеличения температуры сушки, так как при быстром нагреве происходит резкое испарение воды, приводящее к образованию пор

и растрескиванию образующегося в процессе сушки твердого слоя покрытия (рис. 5).

Реальная новая водная суспензия содержит кроме частичек порошка алюминия и кремния частицы хромового ангидрида, который под воздействием кислоты растворяется. Частицы вводимых порошков имеют различные размеры и не всегда являются шарообразными. Кроме того, при приготовлении водной суспензии протекает ряд химических реакций с образованием оксидов, имеющих молекулярную дисперсность, а также другие процессы, влияющие на механизм формиро-

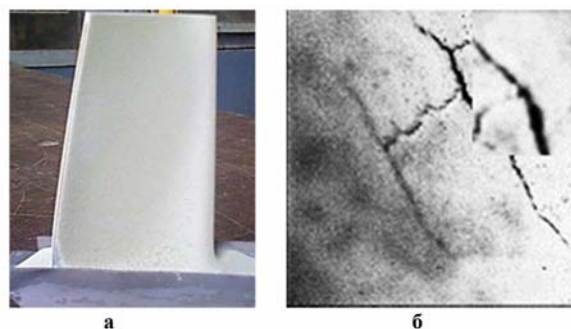


Рис. 5. Внешний вид лопатки турбины ГТД после нанесения и сушки водной суспензии (а) и участок растрескивания твердого слоя покрытия при быстрой сушке (б)
Fig. 5. Appearance of the GTE turbine blade after applying and drying the aqueous suspension (a) and the cracking area of the solid coating layer during rapid drying (b)

Fig. 5. Appearance of the GTE turbine blade after applying and drying the aqueous suspension (a) and the cracking area of the solid coating layer during rapid drying (b)

вания покрытия [16–18]. Это усложняет проведение расчета с учетом указанных факторов, поэтому был введен ряд допущений. Однако полученные расчеты показывают влияние основных параметров новой водной суспензии на параметры формируемого покрытия, что дает возможность управлять процессом образования защитного покрытия начиная со стадии подготовки исходной новой суспензии.

Выводы

1. На основании проведенных расчетов установлена зависимость толщины формируемого защитного покрытия от соотношения твердой и жидкой фаз в исходной новой суспензии.

2. Количество жидкой фазы не влияет на толщину покрытия, но оказывает влияние на технологический параметр сушки покрытия, а именно скорость удаления воды из твердого осадка покрытия, нанесенного на деталь.

3. Параметры реальной водной суспензии оказывают более сложное влияние на качество формируемого покрытия, которые необходимо учитывать в процессе его нанесения.

Список литературы

1. **Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С.** Химико-термическая обработка жаростойких сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 622 с.

2. **Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A.** Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising GTEs // Russian metallurgy (Metally). 2012. No. 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1134/S0036029512010089

3. Скоростные процессы химико-термической обработки с применением паст и суспензий: сборник статей / Под ред. проф. В.И. Просвирина. Рига: РКИИГА, 1972. 110 с.

4. **Просвирин В.И.** Диффузионная металлизация с использованием паст и суспензий // МиТОМ. 1972. № 12. С. 40–48.

5. **Иванов Е.Г.** Получение многокомпонентных покрытий при восстановлении

элементов из оксидов // Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского. 1976. С. 46–51.

6. **Иванов Е.Г.** Суспензия для алюмосилицирования металлических деталей. Патент RU № 2032764 С1, 10.04.1995.

7. **Иванов Е.Г.** Новое жаростойкое покрытие / Е.Г. Иванов, А.В. Зоричев, В.М. Самойленко, Г.Т. Пащенко // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 22–24.

8. **Иванов Е.Г.** Применение покрытий из водной суспензии для защиты деталей ГТД от коррозии / Е.Г. Иванов, В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, М.А. Петрова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217. С. 46–50.

9. **Шанк Ф.А.** Структура двойных сплавов: справочник / Пер. с англ. А.М. Захарова, В.С. Золоторевского, П.К. Новика, Ф.С. Новика, под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. М.: Металлургия, 1973. 760 с.

10. **Лякишев Н.П.** Алюминотермия / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, Г.Ф. Игнатенко, С.И. Лаппо. М.: Металлургия, 1978. 424 с.

11. **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. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2014. № 7. С. 105–111.

12. **Tzatzov K.K.** Protective system for high temperature metal alloy products / K.K. Tzatzov, A.S. Gorodetsky, A. Wysieki-erski, G.A. Fisher. Patent US, no. 6682780 B2, 27.01.2004.

13. **Коломыцев П.Т.** Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1991. 239 с.

14. **Agüero A.** Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components / A. Agüero, R. Muelas, A. Pastor, S. Osgerby // Surface & Coatings Technology. 2005. Vol. 200, iss. 5-6. Pp. 1219–1224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.080

15. **Зайцев Н.А.** Прогнозирование ресурса комплекса «жаропрочный сплав – жаростойкое покрытие» на основе оценки струк-

турной стабильности / Н.А. Зайцев, А.В. Логунов, В.М. Самойленко, А.А. Шатульский // Вестник Московского государственного открытого университета. Москва. Серия: техника и технология. 2012. № 2. С. 5–17.

16. Agüero A. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components / A. Agüero, R. Muelas, M. Gutierrez, R. Van Vulpen, S. Osgerby, J.P. Banks // *Surface & Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, iss. 14. Pp. 6253–6260. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.033

17. Мушкамбаров Н.Н. Физическая и коллоидная химия. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2001. 384 с.

18. Иванов Е.Г., Пащенко Г.Т., Самойленко В.М. Жаростойкое покрытие для деталей турбины ГТД, получаемое из водной суспензии // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 4. С. 51–53.

References

1. Abraimov, N.V. & Eliseev, Yu.S. (2001). [*Thermochemical treatment of heat-resisting steels and alloys*]. Moscow: Internet Inzhiniring, 622 p. (in Russian)

2. Kablov, E.N. & Muboyajyan, S.A. (2012). *Heat-resistant coatings for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines*. Russian metallurgy (Metally), no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1134/S0036029512010089

3. Prosvirin, V.I. (Ed.). (1972). [*High-speed processes of thermochemical treatment using pastes and suspensions: collection of articles*]. Riga: RKIIGA, 110 p. (in Russian)

4. Prosvirin, V.I. (1972). [*Diffusion metalization using pastes and suspensions*]. MiTOM, no. 12, pp. 40–48. (in Russian)

5. Ivanov, E.G. (1976). [*Obtaining multi-component coatings during the reduction of elements from oxides*]. Trudy VVIA im. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 46–51. (in Russian)

6. Ivanov, E.G. (1995). [*Suspension for aluminosilicizing metal parts*]. Patent RU, no. 2032764 C1, April 10. (in Russian)

7. Ivanov, E.G., Zorichev, A.V., Samoylenko, V.M. & Pashchenko, G.T. (2008). [*New*

heat-resistant coating]. Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress, no. 3, pp. 22–24. (in Russian)

8. Ivanov, E.G., Samoylenko, V.M., Ravi-
ilov, R.G. & Petrova, M.A. (2015). *Application of the aqueous coating suspension for the protection of gas turbine engine parts from corrosion*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 217, pp. 46–50. (in Russian)

9. Shank, F.A. (1973). [*The structure of double alloys: Handbook*]. Translation from English by Zakharov A.M., Zolotorevskiy V.S., Novik P.K., Novik F.S., in Novikov I.I., Rogelberg I.L. (Ed.). Moscow: Metallurgiya, 760 p. (in Russian)

10. Lyakishev, N.P., Pliner, Yu.L., Ignatenko, G.F. & Lappo, S.I. (1978). [*Aluminothermy*]. Moscow: Metallurgiya, 424 p. (in Russian)

11. Achimov, A.A., Tolmachev, I.M. & Udovichenko, S.Yu. (2014). *The study of heat-proof diffusion coating on heat-resistant nickel alloy GTE blades*. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no. 7, pp. 105–111. (in Russian)

12. Tzatzov, K.K., Gorodetsky, A.S., Wysiekierski, A. & Fisher, G.A. (2004). *Protective system for high temperature metal alloy products*. Patent US, no. 6682780 B2, January 27.

13. Kolomytsev, P.T. (1991). [*High-temperature protective coatings for nickel alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 239 p. (in Russian)

14. Agüero, A., Muelas, R., Pastor, A. & Osgerby, S. (2005). *Steam oxidation test under prolonged exposure and mechanical properties of suspension aluminide coatings for steam turbine components*. Technology of surfaces and coatings, vol. 200, issue 5-6, pp. 1219–1224. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.080

15. Zaitsev, N.A., Logunov, A.V., Samoylenko, V.M. & Shatul'skiy, A.A. (2012). [*Forecasting the resource of the complex "heat-resistant alloy – heat-resistant coating" based on the assessment of structural stability*]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. Moskva. Seriya: tekhnika i tekhnologiya, no. 2. pp. 5–17. (in Russian)

16. Agüero, A., Muelas, R., Gutierrez, M., Van Vulpen, R., Osgerby, S. & Banks, J.P. (2007). *Cyclic oxidation and mechanical behavior of slurry aluminide coatings for steam turbine components*. Surface & Coatings Technology, vol. 201, issue 14, pp. 6253–6260. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.033

17. Mushkambarov, N.N. (2001). [*Physical and colloidal chemistry*]. Moscow: GEOTAR-MED, 384 p. (in Russian)

18. Ivanov, E.G., Pashchenko, G.T. & Samoylenko, V.M. (2007). *Aqueous slurry-based heat-resistant coating for turbine components of gas-turbine engines*. All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight"), no. 4, pp. 51–53. (in Russian)

Сведения об авторах

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Пашенко Геннадий Трофимович, кандидат технических наук, начальник управления САУ опытно-конструкторского бюро имени А. Люльки – филиала ПАО «ОДК-УМПО», gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Самойленко Елизавета Васильевна, студентка механического факультета МГТУ ГА, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Шестаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, ведущий инженер, Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО», Vladesha@yandex.ru.

Information about the authors

Vasily M. Samoylenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Gennady T. Paschenko, Candidate of Technical Sciences, The Head of the ACS Department of the A. Lyulka Experimental Design Bureau, Branch of PJSC "UEC-UMPO", gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Elizaveta V. Samoylenko, Student of the Mechanical Faculty, Moscow State Technical University of Civil Aviation, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Vladimir V. Shestakov, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer – Lytkarinsky Machine-Building Plant, Branch of PJSC "UEC-UMPO", Vladesha@yandex.ru.

Поступила в редакцию 05.07.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 05.07.2022
Accepted for publication 24.11.2022