

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.18.062

Высокотемпературные поглощающие покрытия для наземных тепловых испытаний элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов на стендах радиационного нагрева

В.И. Фокин, А.В. Терехин, В.С. Райлян

МГТУ им. Н.Э. Баумана

High-temperature absorbing coatings for ground thermal testing of the structural elements of the high-speed aircrafts at the radiation heating benches

V.I. Fokin, A.V. Terehin, V.S. Rajlyan

Bauman Moscow State Technical University

Нанесение на внешнюю поверхность испытуемого объекта покрытий с высокой поглощательной способностью является важной операцией методики воспроизведения тепловых режимов в процессе наземных испытаний элементов конструкций летательных аппаратов на стендах радиационного нагрева. При наземных тепловых испытаниях элементов летательных аппаратов широко применяют высокотемпературное покрытие на основе оксида хрома (Cr_2O_3). Однако низкая поглощательная способность этого покрытия в спектре излучения нитей накала кварцевых галогенных ламп существенно ограничивает возможности наземного испытательного оборудования по воспроизведению заданных для высокоскоростных летательных аппаратов тепловых режимов. Исследованы высокотемпературные покрытия для применения при наземных тепловых и теплопрочностных испытаниях на существующих испытательных стендах с предельной температурой нагрева до 1600°C . Установлено, что наиболее эффективным является покрытие из порошка MoSi_2 , скорость нагрева которого в 2 раза выше, чем у покрытия Cr_2O_3 в диапазоне температур до 800°C . Покрытие из порошка MoSi_2 подтвердило работоспособность до температуры 1700°C . Указанное покрытие можно рекомендовать (после отработки технологии нанесения на поверхность испытуемого объекта) для использования в действующих испытательных установках на основе кварцевых галогенных ламп при экспериментальной отработке и наземных испытаниях элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов.

EDN: ERCJDA

Ключевые слова: наземные испытания, радиационный нагрев, кварцевые галогенные лампы, высокотемпературное покрытие, поглощательная способность

Application of coatings with high absorptivity on the test object outer surface is an important operation in methodology of reproducing thermal conditions during ground testing of the aircraft structural elements on the radiation heating benches. The aircraft elements' ground thermal testing is widely using the high-temperature coatings based on the chromium oxide (Cr_2O_3). However, this coating low absorptivity in the emission spectrum of the quartz halogen lamp filaments significantly limits abilities of the ground-based test equipment to reproduce thermal regimes specified for the high-speed aircraft. Research was conducted on the high-temperature coatings for using in the ground-based thermal and thermal strength tests on the existing test benches with the maximum heating temperatures of up to 1600°C . It was established that the most effective coating was the MoSi_2 powder, which heating rate was twice higher than that of the Cr_2O_3 coating in the temperature range of up to 800°C . The MoSi_2 powder coating confirmed its performance up to the temperature of 1700°C . The indicated coating could be recommended (after developing technology for application on the test object surface) for introduction in the existing test systems based on the quartz halogen lamps during experimental development and ground testing of the high-speed aircraft structural elements.

EDN: ERCJDA

Keywords: ground testing, radiation heating, quartz halogen lamps, high-temperature coating, absorptivity

Непрерывное совершенствование образцов авиационной и ракетно-космической техники достигается увеличением скорости и дальности полета летательных аппаратов (ЛА), а также повышением их маневренности и точности достижения цели. При этом неизбежно усложняются задачи экспериментальной отработки и наземных испытаний элементов конструкции высокоскоростных ЛА, прежде всего, из-за необходимости воспроизведения на испытательных стендах тепловых режимов, характеризующихся более высокими температурой и скоростью нагрева.

Нанесение на внешнюю поверхность испытуемого объекта покрытий с высокой поглощательной способностью является важной операцией методики воспроизведения тепловых режимов при наземных испытаниях элементов конструкций ЛА из неметаллических материалов на стендах радиационного нагрева [1–5]. Основными функциями покрытий являются интенсификация передачи тепла от нагревателей к испытуемому объекту и выравнивание поглощательной способности поверхности для достижения равномерного распределения температурного поля.

В связи с этим к покрытиям помимо максимальной поглощательной способности в спектре излучения источника нагрева предъявляются требования по достаточной для воспроизведения заданного режима термостойкости в атмосфере, а также технологичности нанесения покрытия на поверхность испытуемого объекта.

При выборе покрытий с необходимой поглощательной способностью можно использовать степень черноты (излучательную способность), равенство которых (поглощательной и излучательной способностей) установлено законом Кирхгофа [6].

При наземных тепловых испытаниях элементов ЛА широко применяют покрытие на основе оксида хрома (Cr_2O_3) [7–9]. Согласно данным работы [10], этот материал имеет достаточно высокую интегральную излучательную способность (0,75...0,95) в зависимости от размера зерна, на которую незначительно влияет температура.

Суспензию, приготовленную из порошка Cr_2O_3 и летучей жидкости (спирта), наносят на поверхность испытуемого объекта. Однако низкая поглощательная способность Cr_2O_3 (около 0,3) в спектре излучения нитей накала кварцевых галогенных ламп (при длине волны излучения $\lambda = 0,8...3,0$ мкм) существенно ограничивает возможности наземного испытательного оборудования по воспроизведению заданных для высокоскоростных ЛА тепловых режимов.

В работе [11] исследованы термостойкие поглощающие покрытия для применения в установках радиационного нагрева. Согласно полученным результатам, при температуре более 1100°C можно использовать покрытия на основе нитрида (Si_3N_4) и карбида кремния (SiC), кремния (Si) и Cr_2O_3 . Установлено, что скорость нагрева образцов с покрытиями из порошков Si_3N_4 и SiC на 40...50 % выше, чем с покрытием

Таблица 1

Характеристики исследуемых материалов

Материал	Температура плавления, °С	Цвет	Излучательная способность		Отличительные свойства материала
			спектральная	интегральная	
Cr ₂ O ₃	2440	Зеленый	0,68 (λ = 1...5 мкм, T = 1000 °С)	0,86 (T = 850 °С)	Диэлектрик. Обладает стойкостью к окислению при высокой температуре
SiC	2730	Светло-серый	0,70...0,90 (λ = 1...2 мкм, T ≈ 900 °С)	0,90 (T = 727 °С)	Полупроводник. При контакте с воздухом на поверхности образуется пленка из диоксида кремния, обладающего низкой излучательной способностью
HfB ₂	3060	Черный, темно-серый	–	–	Электропроводный. Обладает стойкостью к окислению при высокой температуре
Si ₃ N ₄	1900	Серый	0,80 (λ = 1...2 мкм, T ≈ 950 °С)	0,90 (T = 950 °С)	Диэлектрик. При температуре T > 900 °С начинается окисление (образование пленки SiO ₂)
MoSi ₂	2030	Черный	0,90 (λ = 1...2 мкм, T = 1000 °С)	–	Электропроводный. Окисляется с образованием пленки SiO ₂ при температуре T > 900 °С

Cr₂O₃, а у образцов с покрытием Si на 60...70 % больше, чем с покрытием Cr₂O₃.

Таким образом, покрытие на основе Si показало наибольшую эффективность. Однако ввиду ограниченной значением 1400 °С температуры плавления Si это покрытие имеет недостаточную для тепловых режимов высокоскоростных ЛА термостойкость.

Цель работы — исследование и подбор высокотемпературных покрытий для проведения наземных тепловых и теплопрочностных испытаний элементов конструкций высокоскоростных ЛА на существующих испытательных стендах радиационного нагрева с предельной температурой 1600 °С (в перспективе до 2500 °С).

Дополнительно к ранее исследованным материалам покрытий на основе Si₃N₄, SiC и Cr₂O₃ [11] добавлены диборид гафния (HfB₂), имеющий повышенную температуру плавления, и дисилицид молибдена (MoSi₂), обладающий повышенной поглощательной способностью в спектре излучения ламп. Характеристики исследуемых материалов [10, 12–17] приведены в табл. 1.

На первом этапе исследования определяли интегральную излучательную способность материалов в диапазоне длины волны излучения λ = 0,8...16,0 мкм и спектральную (или моно-

хроматическую) излучательную способность при λ = 0,8...3,0 мкм.

Для определения излучательных способностей покрытия приготовленную из порошка и спирта суспензию кисточкой наносили на керамические образцы-диски (диаметром 49,5 мм и толщиной 11 мм). Внешний вид образцов после нанесения исследуемых высокотемпературных покрытий показан на рис. 1.

Для измерения излучательной способности использовали ИК-Фурье-спектрометр Nicolet iS50 с программным обеспечением Diffusive, обеспечивающим обработку данных спектроскопии диффузного рассеяния.

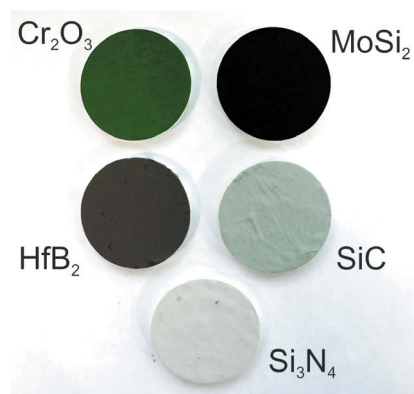


Рис. 1. Внешний вид образцов после нанесения высокотемпературных покрытий

Таблица 2

Значения интегральной и спектральной излучательных способностей исследуемых материалов

Температура, °C	Излучательная способность									
	интегральная					спектральная				
	Si ₃ N ₄	SiC	HfB ₂	MoSi ₂	Cr ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	SiC	HfB ₂	MoSi ₂	Cr ₂ O ₃
20	0,842	0,789	0,479	0,838	0,897	0,463	0,752	0,537	0,937	0,377
100	0,824	0,808	0,466	0,839	0,871	0,444	0,747	0,547	0,936	0,353
300	0,738	0,820	0,452	0,847	0,774	0,414	0,736	0,572	0,932	0,311
500	0,647	0,809	0,464	0,861	0,669	0,396	0,724	0,598	0,926	0,289
700	0,575	0,790	0,491	0,873	0,579	0,384	0,711	0,598	0,920	0,278
900	0,522	0,769	0,523	0,881	0,510	0,376	0,698	0,644	0,914	0,274
1100	0,483	0,748	0,556	0,886	0,460	0,370	0,685	0,661	0,909	0,274
1300	0,454	0,729	0,584	0,889	0,425	0,365	0,674	0,676	0,904	0,276
1500	0,433	0,713	0,609	0,889	0,400	0,362	0,665	0,688	0,900	0,280

Полученные значения интегральной и спектральной излучательных способностей исследуемых материалов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что при достаточно высокой интегральной излучательной способности оксида хрома (0,897...0,400), его спектральная излучательная способность в спектре излучения ламп значительно ниже (0,377...0,280).

Для проверки эффективности исследуемых покрытий (с точки зрения поглощения лучистого потока) на теплоизолированной медной пластине толщиной 3 мм проведены эксперименты по ее одностороннему нагреву галогенными лампами с последующей сравнительной оценкой поглощенного теплового потока.

Чтобы оценить поглощенный тепловой поток на внутренней стороне медной пластины T , °C

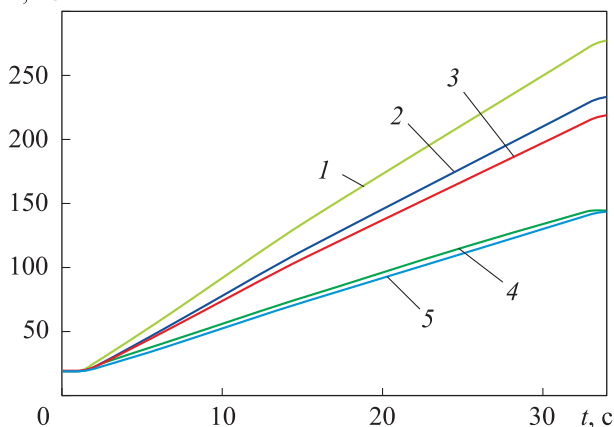


Рис. 2. Зависимости температуры T медной пластины с покрытиями MoSi₂ (1), HfB₂ (2), SiC (3), Cr₂O₃ (4) и Si₃N₄ (5) от времени t

устанавливали термоэлектрический преобразователь (термопару). Пластины с фронтальной поверхности последовательно покрывали каждым из исследуемых покрытий. Нагрев проводили при одинаковой электрической мощности нагревателя.

Результаты экспериментов в виде графических зависимостей температуры медной пластины с покрытиями MoSi₂, HfB₂, SiC, Cr₂O₃ и Si₃N₄ от времени приведены на рис. 2.

Плотность падающего на медную пластину теплового потока оценивали по формуле [1, 5]

$$q = \frac{1}{A} c \rho h \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{\max} = \frac{1}{A} q_n, \quad (1)$$

где A — коэффициент поглощения; c и ρ — теплоемкость и плотность материала пластины; h — толщина образца; $(\partial T / \partial \tau)_{\max}$ — максимальная скорость нагрева пластины (в начальный момент нагрева); q_n — плотность потока, поглощенного медной пластиной,

$$q_n = c \rho h \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{\max}.$$

Согласно выражению (1), при одинаковых условиях нагрева медной пластины соотношение между коэффициентами поглощения нанесенных покрытий и поглощенными потоками должно оставаться постоянным.

По максимальной скорости нагрева медной пластины определяли плотность поглощенного потока для каждого покрытия в соответствии с формулой (1). Расчетные значения плотности поглощенного пластиной теплового потока и

Таблица 3

Расчетные значения плотности поглощенного пластиной теплового потока и спектральной излучательной способности исследуемых покрытий при длине волны $\lambda = 0,8 \dots 3,0$ мкм и температуре $T = 100$ °C

Материал покрытия	Плотность поглощенного потока, кВт/м ²	Спектральная излучательная способность
Si ₃ N ₄	42,0	0,444
SiC	71,1	0,747
HfB ₂	74,7	0,547
MoSi ₂	91,5	0,936
Cr ₂ O ₃	42,5	0,353

спектральной излучательной способности исследуемых покрытий при длине волны $\lambda = 0,8 \dots 3,0$ мкм и температуре $T = 100$ °C приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что соотношение между плотностью поглощенного медной пластиной теплового потока и спектральной излучательной способностью покрытий с достаточной степенью точности остается неизменным. Исключение составляет покрытие из порошка HfB₂. Анализ спектральной излучательной способности этого материала указывает на ее высокие значения до длины волны $\lambda = 1,5$ мкм (более 0,75) с их последующим резким падением.

Таким образом, для более корректной оценки эффективности покрытия при нагреве галогенными лампами необходимо оценивать излу-

чательную способность покрытия в области спектра $\lambda = 0,8 \dots 1,5$ мкм.

Для оценки перспективы применения исследуемых покрытий в процессе наземных тепловых испытаний на образцах теплоизоляционной конструкционной кварцевой керамики, используемой в конструкциях головных элементов высокоскоростных ЛА, проведены экспериментальные исследования. На поверхность образцов наносили исследуемые покрытия и подвергали тепловому воздействию на установках радиационного нагрева кварцевыми галогенными лампами.

Исследования выполняли в диапазонах температур $T = 20 \dots 1000$ °C (с максимальной скоростью нагрева 50 °C/c) и $T = 600 \dots 1600$ °C (100 °C/c). При этом режимом управляли по сигналу от термопары, установленной на внешней стороне образца, покрытого Cr₂O₃. Для измерения температуры наружной поверхности образцов при нагреве до 1000 °C применяли термопары типа ТХА, при нагреве до 1600 °C — типа ТПР.

Зависимости температуры на наружной поверхности образцов от времени в процессе воспроизведения теплового режима приведены на рис. 3, а и б. Внешний вида образцов с термопарами и нанесенными покрытиями после нагрева показан на рис. 4.

Обсуждение результатов. Согласно полученным результатам (см. рис. 3, а), соотношение температуры на наружной поверхности образцов в целом соответствует данным, приведен-

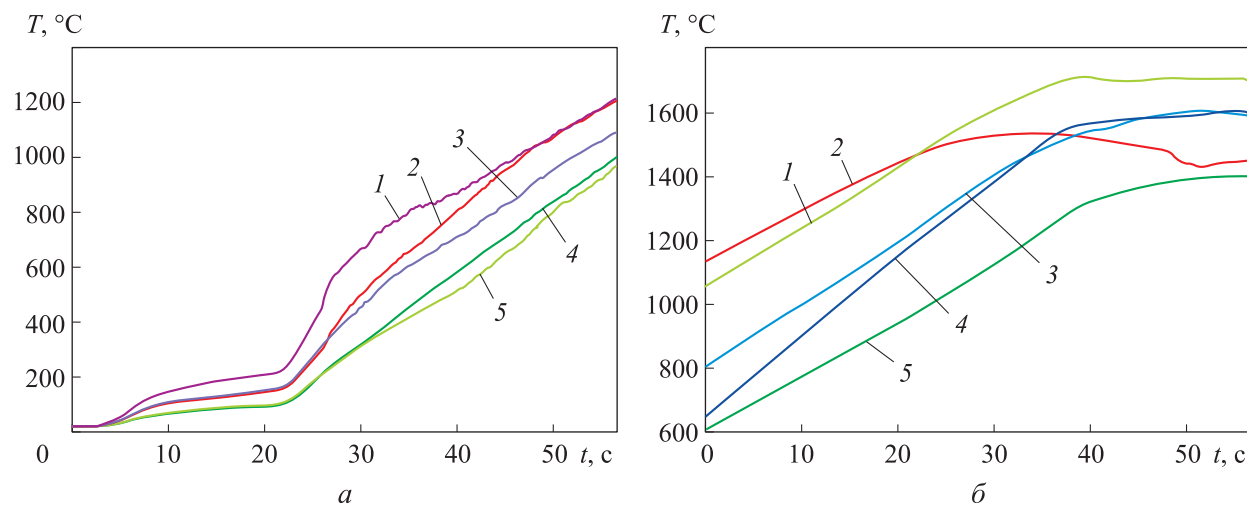


Рис. 3. Зависимости температуры на наружной поверхности керамических образцов с покрытиями MoSi₂ (1), HfB₂ (2), SiC (3), Cr₂O₃ (4) и Si₃N₄ (5) от времени t : а — при нагреве от 20 до 1000 °C; б — при нагреве от 600 до 1600 °C

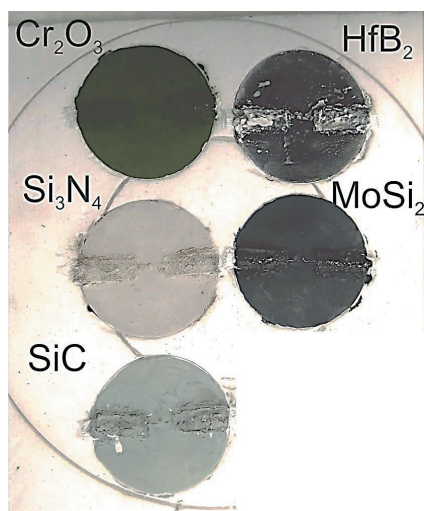


Рис. 4. Внешний вид образцов с термопарами и нанесенными покрытиями после нагрева

ным в табл. 3 (плотности поглощенного теплового потока и излучательной способности) до температуры $T = 600 \dots 800$ °С.

Таким образом, эффективность исследуемых покрытий в указанном диапазоне температуры соответствует излучательной способности покрытия. Наиболее эффективным является покрытие из порошка MoSi_2 , которое обеспечивает увеличение скорости нагрева в 2 раза по сравнению с таковой для Cr_2O_3 .

При температуре нагрева, превышающей 800 °С, наблюдается выравнивание температур образцов с покрытиями MoSi_2 , HfB_2 , SiC и Cr_2O_3 , а температура образца с покрытием Si_3N_4 становится ниже, чем с покрытием Cr_2O_3 . Как видно их рис. 3, б, у покрытия на основе HfB_2 уменьшение скорости нагрева наблюдается при достижении $T = 1450$ °С.

При температуре $T = 1600$ °С на поверхности образца с покрытием Cr_2O_3 температура на поверхности образцов с покрытиями MoSi_2 , HfB_2 , SiC и Si_3N_4 составила 1700, 1450, 1600 и 1400 °С соответственно.

Внешний осмотр образцов после испытания выявил, что цвет покрытий из MoSi_2 , SiC , Cr_2O_3 и Si_3N_4 практически не изменился. На покрытии HfB_2 появился белый налет (предположи-

тельно HfO_2). Образование этого налета, вероятно, является основной причиной уменьшения температуры при достижении $T = 1450$ °С, вызванной частичным изменением спектральной излучательной способности материала.

Установленная при температуре более 800 °С динамика изменения температуры поверхности образцов при внешнем инфракрасном нагреве обусловлена изменением параметров теплообмена. При температуре выше 800 °С значительно возрастают потери тепла излучением с поверхности образца, дополнительный вклад в теплообмен излучением от кварцевых колб ламп и отражателей нагревателя, спектр излучения которых смещен в длинноволновую область из-за меньшей температуры.

Выводы

1. Установлено, что для воспроизведения в наземных условиях тепловых режимов испытаний элементов высокоскоростных ЛА с целью интенсификации процесса теплопередачи от нагревателя целесообразно применять высокотемпературные покрытия на основе SiC , MoSi_2 и HfB_2 . Указанные покрытия обеспечивают более высокую эффективность теплопередачи от инфракрасного источника нагрева к испытываемому объекту в диапазоне температур 20...1200 °С, чем применяемое в настоящее время покрытие на основе Cr_2O_3 . Это позволяет использовать их для решения задач повышения скорости нагрева без увеличения мощности нагревателя.

2. Наибольшую эффективность показало покрытие из MoSi_2 , которое подтвердило работоспособность до температуры 1700 °С. Его можно рекомендовать (после отработки технологии нанесения на поверхность испытываемого объекта) для применения в действующих испытательных установках на основе кварцевых галогенных ламп при экспериментальной отработке и наземных испытаниях элементов конструкций высокоскоростных ЛА.

Литература

- [1] Баранов А.Н., Белозеров Л.Г., Ильин Ю.С. и др. *Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов*. Москва, Машиностроение, 1974. 344 с.
- [2] Полежаев Ю.В., Резник С.В., ред. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях*. Т. 3. Экспериментальные исследования. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 264 с.

- [3] Абрамович Б.Г., Гольдштейн В.Л. *Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытий*. Москва, Энергия, 1977. 256 с.
- [4] Падерин Л.Я., Просунцов П.В., Резник С.В. и др. Экспериментальное исследование теплопереноса в пористых полупрозрачных теплозащитных материалах. *ИФЖ*, 2005, т. 78, № 1, с. 60–66.
- [5] Елисеев В.Н., Товстоног В.А. *Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
- [6] Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. *Теплообмен излучением*. Ленинград, Энергия, 1971. 294 с.
- [7] Райлян В.С., Фокин В.И., Алексеев Д.В. Покрытия для моделирования температурных полей при наземной отработке элементов ЛА. *Авиационная промышленность*, 2009, № 3, с. 8–11.
- [8] Райлян В.С. *Способ задания тепловых режимов керамических обтекателей ракет*. Патент РФ 2451971. Заявл. 08.12.2010, опублик. 27.05.2012.
- [9] Резник С.В., Анучин С.А., Просунцов П.В. и др. К учету методической погрешности измерения температуры контактными датчиками при теплофизических исследованиях. *Новые огнеупоры*, 2009, № 3, с. 29–33.
- [10] Шейндлин А.Е., ред. *Излучательные свойства твердых материалов*. Москва, Энергия, 1974. 472 с.
- [11] Резник С.В., Забежайлов М.О., Анучин С.А. и др. Высокоэффективное поглощающее покрытие для теплофизических исследований на установках радиационного нагрева. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-377>
- [12] Самсонов Г.В., ред. *Физико-химические свойства окислов*. Москва, Металлургия, 1978. 471 с.
- [13] Самсонов Г.В. *Нитриды*. Киев, Наукова думка, 1969. 380 с.
- [14] Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. *Бориды*. Москва, Атомиздат, 1975. 375 с.
- [15] Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. *Силициды*. Москва, Металлургия, 1979. 271 с.
- [16] Самсонов Г.В., Косолапова Т.Я., Гнесин Н.Н. и др. *Карбиды и сплавы на их основе*. Киев, Наукова думка, 1976. 265 с.

References

- [1] Baranov A.N., Belozherov L.G., Ilin Yu.S. et al. *Statische ispytaniya na prochnost sverkhzvukovykh samoletov* [Static strength tests of supersonic aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 344 p. (In Russ.).
- [2] Polezhaev Yu.V., Reznik S.V., eds. *Materialy i pokrytiya v ekstremalnykh usloviyakh*. Т. 3. Экспериментальные исследования [Materials and coatings in extreme conditions. Т. 3. Experimental studies]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 264 p. (In Russ.).
- [3] Abramovich B.G., Goldshteyn V.L. *Intensifikatsiya teploobmena izlucheniem s pomoshchyu pokrytiy* [Intensification of heat transfer by radiation using coatings]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 256 p. (In Russ.).
- [4] Paderin L.Ya., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. et al. Experimental study of the heat transfer in porous semitransparent heat-shield materials. *IFZh*, 2005, vol. 78, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.). (Eng. version: *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2005 vol. 78, no. 1, pp. 60–67, doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0030-9>)
- [5] Eliseev V.N., Tovstonog V.A. *Teploobmen i teplovye ispytaniya materialov i konstruktsiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nagreve* [Heat transfer and heat testing of materials and aerospace structures with radiant heating]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 396 p. (In Russ.).
- [6] Sparrow E.M. *Radiation heat transfer*. Routledge, 1978. 380 p. (Eng. version: *Teploobmen izlucheniem*. Leningrad, Energiya Publ., 1971. 294 p. (In Russ.).)
- [7] Raylyan V.S., Fokin V.I., Alekseev D.V. Coatings for modelling temperature fields during surface tests on of aircraft elements. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2009, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).

- [8] Raylyan V.S. *Sposob zadaniya teplovykh rezhimov keramicheskikh obtekateley raket* [Method of setting thermal conditions of ceramic rocket cowlings]. Patent RU 2451971. Appl. 08.12.2010, publ. 27.05.2012. (In Russ.).
- [9] Reznik S.V., Anuchin S.A., Prosuntsov P.V. et al. To account for the methodological error of temperature measurement by contact sensors in thermophysical research. *Novye ognepory* [New Refractories], 2009, no. 3, pp. 29–33. (In Russ.).
- [10] Sheyndlin A.E., ed. *Izluchatelnye svoystva tverdykh materialov* [Radiation properties of solids]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 472 p. (In Russ.).
- [11] Reznik S.V., Zabezhaylov M.O., Anuchin S.A. et al. High effective absorbing coating for thermophysical investigations applied to radiation heating equipment. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-9-377> (in Russ.).
- [12] Samsonov G.V., ed. *Fiziko-khimicheskie svoystva okislov* [Physical-chemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 471 p. (In Russ.).
- [13] Samsonov G.V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 380 p. (In Russ.).
- [14] Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. *Boridy* [Borides]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 375 p. (In Russ.).
- [15] Samsonov G.V., Dvorina L.A., Rud B.M. *Silitsidy* [Silicides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 271 p. (In Russ.).
- [16] Samsonov G.V., Kosolapova T.Ya., Gnesin N.N. et al. *Karbidy i splavy na ikh osnove* [Carbides and carbide alloys]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 265 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 25.08.2023

Информация об авторах

ФОКИН Василий Иванович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: info@technology.ru).

ТЕРЕХИН Александр Васильевич — кандидат технических наук, начальник лаборатории 16. АО Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: info@technology.ru).

РАЙЛЯН Василий Семенович — доктор технических наук, начальник сектора 162. АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: info@technology.ru).

Information about the authors

FOKIN Vasily Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: info@technology.ru).

TEREHIN Alexander Vasilyevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Laboratory 16. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: info@technology.ru).

RAJLYAN Vasily Semenovich — Doctor of Science (Eng.), Head of Sector 162. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: info@technology.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фокин В.И., Терехин А.В., Райлян В.С. Высокотемпературные поглощающие покрытия для наземных тепловых испытаний элементов конструкций высокоскоростных летательных аппаратов на стендах радиационного нагрева. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 2, с. 87–94.

Please cite this article in English as:

Fokin V.I., Terehin A.V., Rajlyan V.S. High-temperature absorbing coatings for ground thermal testing of the structural elements of the high-speed aircrafts at the radiation heating benches. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 2, pp. 87–94.