

Научная статья

УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-174-185

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И ПОЛЫХ МИКРОСФЕР

А.С. Беспалов¹, И.Э. Салимов¹, С.Л. Лонский¹, Е.В. Куршев¹, С.А. Пономаренко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены жидкие теплоизоляционные составы на основе полимерной матрицы и газонаполненных или вакуумированных микросфер, показаны основные перспективы и области применения тонкопленочных теплоизоляционных материалов, получаемых из данных жидких составов. Исследована микроструктура и проведен рентгеноспектральный анализ типичного тонкопленочного теплоизоляционного покрытия и микросфер, входящих в его состав. Методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии исследован состав полимерной матрицы материала, а методом рентгеновской дифракции изучена структура микросфер.

Ключевые слова: тонкопленочная теплоизоляция, жидкая теплоизоляция, теплоизоляционное покрытие, микросферы, пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия, состав полимерной матрицы

Для цитирования: Беспалов А.С., Салимов И.Э., Лонский С.Л., Куршев Е.В., Пономаренко С.А. Исследование состава и структуры теплоизоляционного покрытия на основе полимерной матрицы и полых микросфер // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 174–185. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-174-185.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF A THERMAL INSULATION COATING BASED ON A POLYMER MATRIX AND HOLLOW MICROSPHERES

A.S. Bepalov¹, I.E. Salimov¹, S.L. Lonskii¹, E.V. Kurshev¹, S.A. Ponomarenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Liquid thermal insulation compositions based on a polymer matrix and the additions of gas filled or evacuated microspheres are considered, and the main prospects and scope of application of thin film thermal insulation material obtained from these liquid compositions is shown. The microstructure and X-ray spectral analysis of a typical thin-film thermal insulation coating and microspheres included in its composition were studied by pyrolytic gas chromatate-mass spectrometry, the composition of the polymer component of the material was determined, and the structure of microspheres was studied by X-ray diffraction.

Keywords: thin-film thermal insulation, liquid thermal insulation, thermal insulation coating, microspheres, pyrolytic gas chromatate-mass-spectrometry, polymer matrix composition

For citation: Bepalov A.S., Salimov I.E., Lonskii S.L., Kurshev E.V., Ponomarenko S.A. Investigation of the composition and structure of a thermal insulation coating based on a polymer matrix and hollow microspheres. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 174–185. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-174-185.

Введение

Одной из важнейших приоритетных задач энергетической программы Российской Федерации является повышение энергосбережения в строительной, машиностроительной, судостроительной и других отраслях промышленности [1]. В большинстве случаев в качестве теплоизоляционных материалов применяются относительно недорогие и выпускающиеся в промышленных масштабах легковесные материалы на основе минеральных волокон (базальтовые, стеклянные, алюмокремнеземные и др.) и органического связующего (например, на основе фенолформальдегидных смол). Применение данного класса материалов диктуется, как правило, требованием к огнестойкости, т. е. способности выдерживать воздействие пламени с температурой от 700 до 1200 °С [2–9]. Для эффективного энергосбережения толщина волокнистых теплоизоляционных материалов может составлять от нескольких миллиметров до десяти сантиметров и более в различных ситуациях. Одним из главных недостатков таких волокнистых материалов является их высокая гидрофильность, характерная для оксидных волокон, обычно сопровождающаяся изменением физико-механических характеристик материалов в процессе эксплуатации, вследствие чего необходима дополнительная обработка гидрофобными составами для снижения их влаго- и водопоглощения [10–13].

В последние десятилетия во многих странах ведутся разработки и исследования свойств тонкопленочных теплозащитных покрытий, представляющих собой компаунды на основе органических соединений (например, акриловых и других типов сополимеров) с добавлением газонаполненных или вакуумированных микросфер (керамических, стеклянных, алюмосиликатных и др.) с характерным диаметром от 10 до 100 мкм. Данные покрытия называются тонкопленочными из-за толщины их слоя на защищаемой поверхности, составляющей от 0,5 до 3 мм, а наносить их возможно, например, с помощью аппаратов безвоздушного напыления высокого давления. Такие покрытия могут применяться на наружных и внутренних поверхностях стен или покрытий зданий, трубопроводов, паропроводов, воздухопроводов и других объектов, подверженных негативному влиянию климатических факторов или температурного воздействия [14].

Жидкие теплоизолирующие составы представляют собой суспензию, в которой микросферы находятся во взвешенном состоянии в растворе полимерного связующего, состоящего, как правило, из пленкообразующей водной эмульсии акрилата, стирол-акрилата, бутилакрилата, глицидилметакрилата и др. Использование стирола придает покрытию водостойкость и повышает стойкость к кислотам. Использование бутилакрилата повышает светостойкость покрытия и замедляет процесс старения. Особенностью глицидилметакрилата является его двойная функциональность за счет метакриловой и эпоксидной групп, что дает возможность сочетать химические свойства акрилатов и эпоксидсодержащих соединений [15]. Помимо этого, данные жидкие покрытия содержат функциональные добавки – пеногасители, коалесценты, диспергаторы, ингибиторы, антисептики, биозащитные добавки и др. Технология получения жидких теплоизолирующих составов в основном представляет собой многократное длительное механическое перемешивание твердой и жидкой фракций до гомогенного состояния, однако срок годности их крайне невысок вследствие расслоения, а также неоднородности состава ввиду коагуляции микросфер и осаждения в виде осадка части микросфер, разрушенных при механическом воздействии.

Материалы и методы

Объектом исследования является образец типичного тонкопленочного теплоизоляционного покрытия.

Методами микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа проведены исследования внешней и торцевой поверхностей образца теплоизоляционного

покрытия. Для исследования торца образца производили срез торцевой поверхности. Для снятия электрических зарядов при исследовании образцов диэлектриков в сканирующем электронном микроскопе, их поверхности металлизировали в вакуумной установке магнетронного распыления [16–21]. Микроструктуру образца изучали на сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 200$ до $\times 6000$.

Макроструктуру образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия и зольного остатка после высокотемпературной термообработки образца исследовали на оптическом микроскопе при увеличениях от $\times 2,5$ до $\times 10$. Для исследования поверхности торца образца осуществляли срез торцевой поверхности, изготовленный таким образом образец продували сжатым воздухом.

Методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии анализировали образец тонкопленочного теплоизоляционного покрытия путем проведения пиролиза образца в инертной атмосфере гелия при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и разделения выделяющихся соединений на капиллярной колонке для газовой хроматографии. С использованием библиотеки масс-спектров осуществляли идентификацию соединений на пирограмме путем поиска соединений-аналогов с наиболее похожими масс-спектрами и со структурами, наиболее близко соответствующими предполагаемой структуре продуктов пиролиза полимерной матрицы образца [22–26].

Содержание дисперсных наполнителей в образце определяли взвешиванием зольного остатка после высокотемпературной обработки образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия в окислительной атмосфере при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рентгенофазовый анализ образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия и зольного остатка после обжига при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводили на рентгеновском дифрактометре в монокроматическом $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано при комнатной температуре в диапазоне брэгговских углов $2\theta = 2\text{--}80$ градусов с шагом $0,05$ градуса при экспозиции 2 с . Расшифровка дифрактограмм проведена с применением специализированной программы и структурной базы данных.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Образец тонкопленочного теплоизоляционного покрытия органолептически является пластичным, упругим материалом. На микрофотографиях оптической микроскопии (рис. 1) видно, что материал представляет собой трехслойную композицию со средним значением толщины $1,6 \pm 0,1$ мм. Все слои – это пористый материал с дискретными включениями сферической и сложной формы.

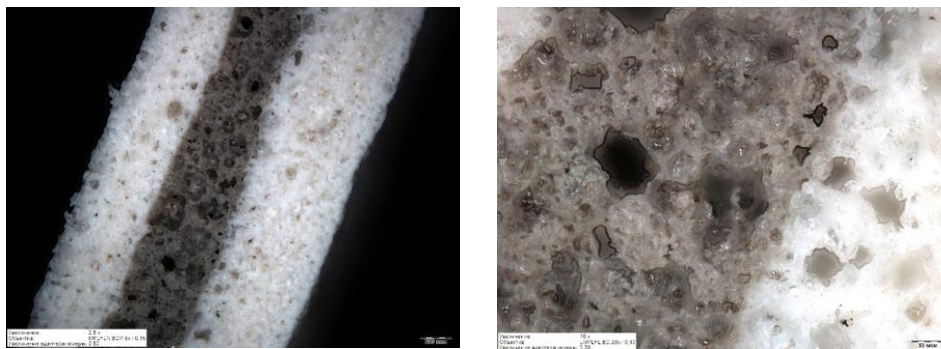


Рис. 1. Микрофотографии (оптическая микроскопия) образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

Результат анализа образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии представлен на пи-рограмме (рис. 2).

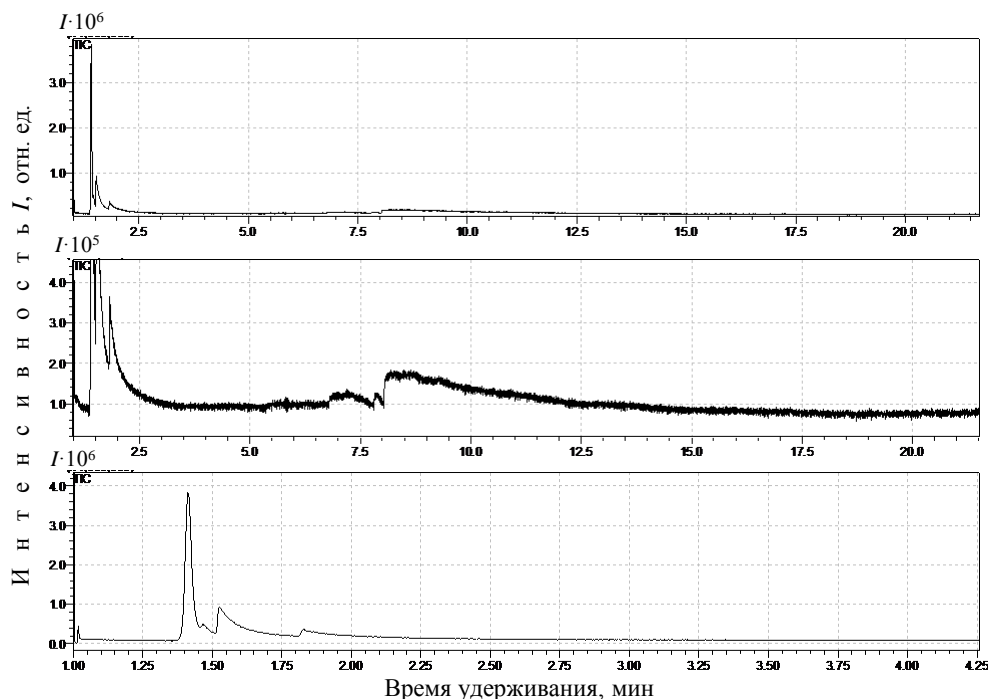


Рис. 2. Пирограмма образца массы белого цвета, полученная методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии, приведенная в различных масштабах

Видно, что на пирограмме присутствуют несколько пиков, предположительно относящихся к угарному газу (CO , время удерживания $t_R = 1,41$ мин), углекислому газу (CO_2 , $t_R = 1,41$ мин, наиболее интенсивный пик), этилену (C_2H_4 , $t_R = 1,42$ мин), пропилену (C_3H_6 , $t_R = 1,47$ мин), бутилену (C_4H_8 , $t_R = 1,53$ мин), воде (H_2O , $t_R = 1,83$ мин), толуолу (C_7H_8 , $t_R = 6,8-7,6$ мин) и стиролу (C_8H_{10} , $t_R = 8,1-13$ мин).

Сопоставление интенсивности пиков этилена (оценивали по интенсивности полос поглощения при $m/z = 26/27$, где m – масса; z – заряд), пропилена и бутилена показывает, что при пиролизе образца преимущественно выделяются бутилен (больше всего) и этилен. При внимательном рассмотрении на пирограмме можно также заметить присутствие следовых количеств бутанола ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$, $t_R = 8,5-9,0$ мин) и бутилакрилата ($\text{C}_2\text{H}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$, $t_R = 13,2-14,0$ мин).

Исходя из структур, выделяющихся при пиролизе соединений, можно предположить, что полимерная матрица образца представляет собой сополимер бутадиена и стирола (менее вероятно) или, с учетом присутствия в составе пиролизата следовых количеств бутанола и бутилакрилата, сополимер стирола и бутилакрилата (более вероятно). Белый цвет исследуемого образца и присутствие мелкодисперсных частиц серо-черного цвета в остатке образца после проведения пиролиза, в сочетании с присутствием в составе пиролизата воды и углекислого газа, позволяет также предположить присутствие в составе образца наполнителей, выделяющих эти соединения при разложении, – например, гидроксида алюминия и/или карбоната кальция.

Для оценки возможного присутствия неотвержденных (не полностью отвержденных) компонентов также дополнительно проводили анализ образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия методом гель-проникающей хроматографии. На рис. 3 показана хроматограмма экстракта образца (растворяется не полностью),

в качестве подвижной фазы использовали диоксан. Видно, что на хроматограмме присутствует полимерная фракция, характеризующаяся также заметным (относительно малоинтенсивным) поглощением в ультрафиолетовой области. Частичная растворимость образца (в сочетании с высокой долей нерастворимой фракции и ее желеобразным характером) предположительно свидетельствует о заметной степени его сшивки.

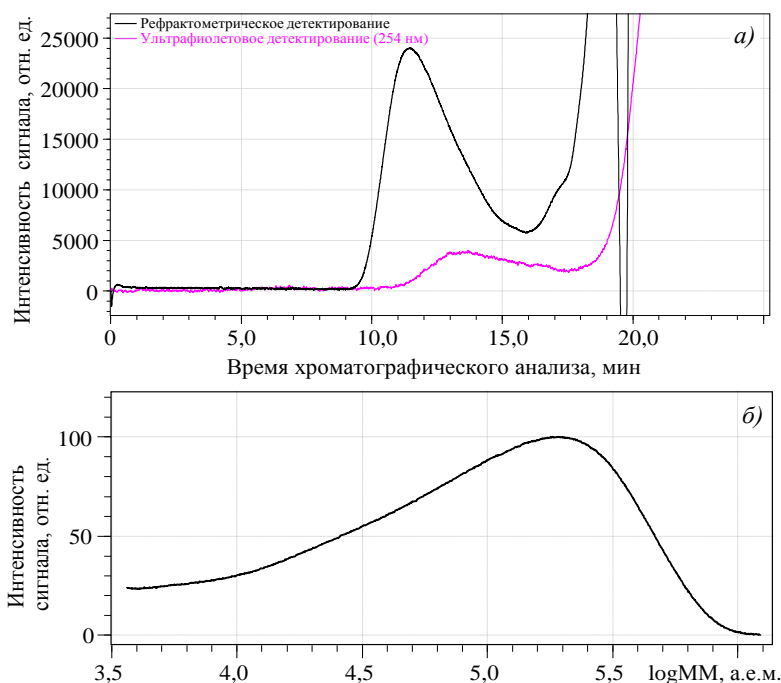


Рис. 3. Хроматограмма образца экстракта покрытия (а), полученная методом гель-проникающей хроматографии (при рефрактометрическом и ультрафиолетовом детектировании), и рассчитанное по результатам анализа (б) молекулярно-массовое распределение экстрагируемой полимерной основы образца при рефрактометрическом детектировании (калибровку системы проводили по полистирольным стандартам молекулярной массы (ММ))

Таким образом, по результатам исследования химического состава образца методами пиролизической газовой хромато-масс-спектрометрии и гель-проникающей хроматографии можно предположить, что полимерная матрица образца является сополимером стирола и бутилакрилата, а сам образец (также предположительно) содержит наполнитель (например, гидроксид алюминия и/или карбонат кальция) и характеризуется не полностью сшитым характером полимерной матрицы.

Результаты микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа тонкопленочного теплоизоляционного покрытия приведены на рис. 4–7.

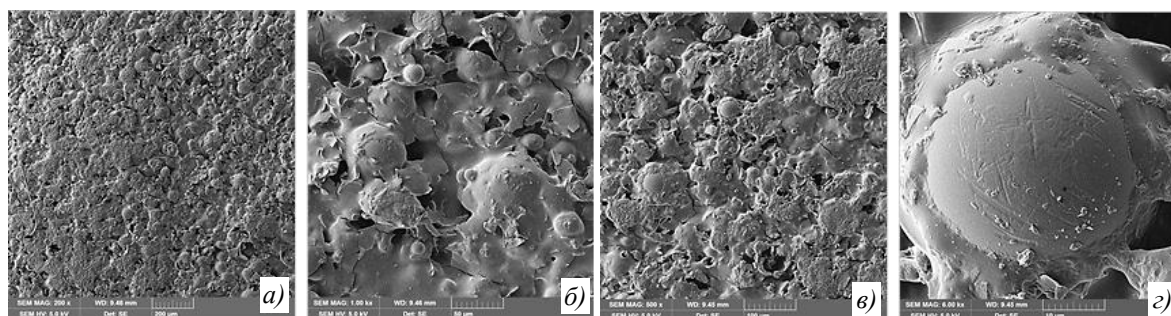


Рис. 4. Микроструктура (а – $\times 200$; б – $\times 500$; в – $\times 1000$; г – $\times 6000$) внешней поверхности образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

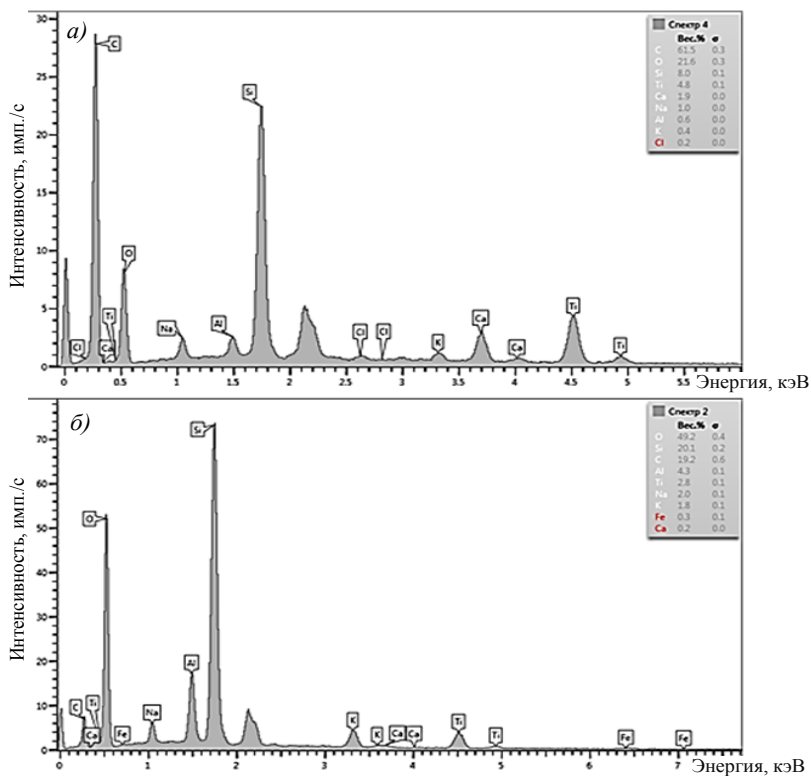


Рис. 5. Энергодисперсионные спектры (а – общий; б – микросферы) поверхности образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

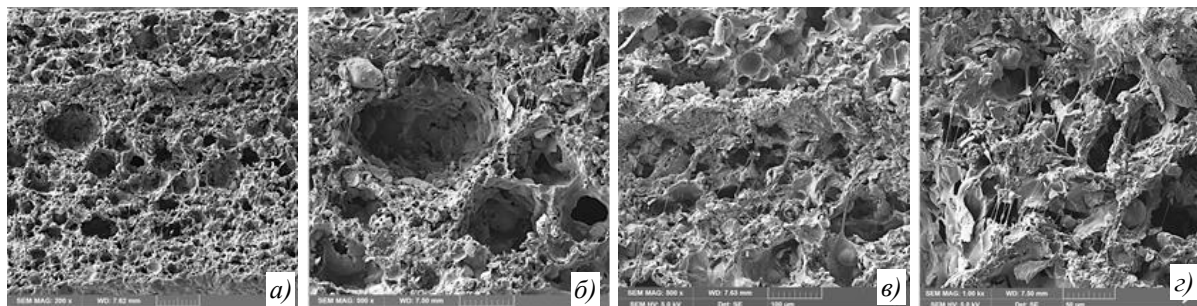


Рис. 6. Микроструктура (а – $\times 200$; б, в – $\times 500$; г – $\times 1000$) торцевой поверхности образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

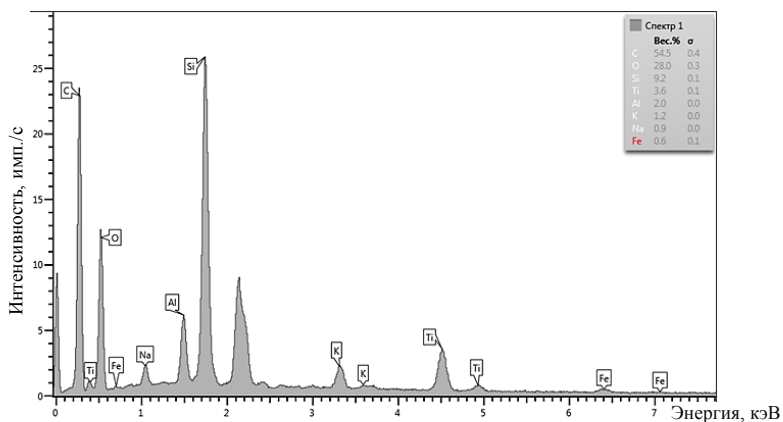


Рис. 7. Энергодисперсионные спектры торцевой поверхности образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

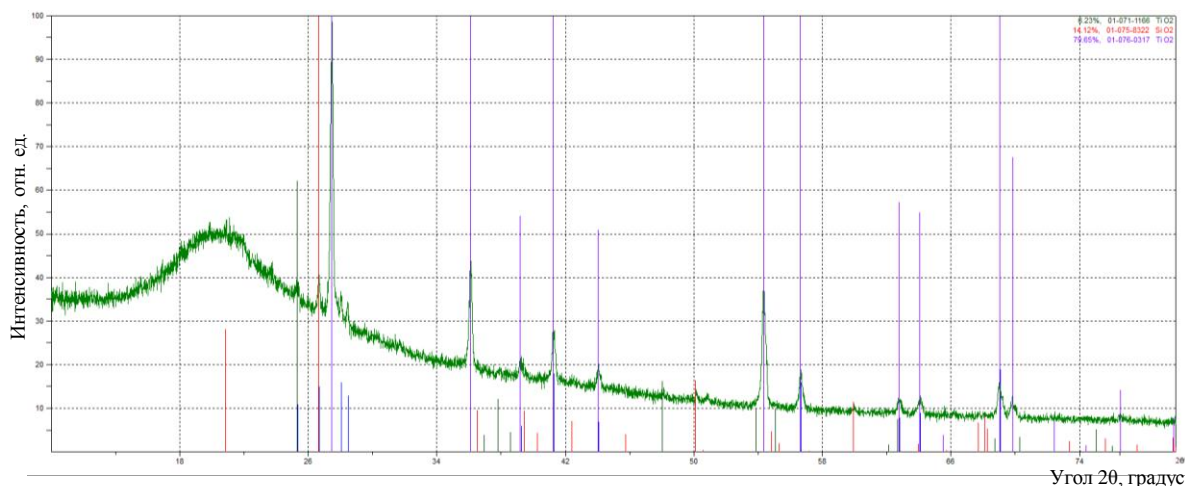


Рис. 9. Дифрактограмма образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

На дифрактограмме зольного остатка (наполнителя), полученного после отжига при 800 °С в окислительной среде образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия (рис. 10), также заметна область гало в диапазоне углов 17–30 градусов, характерная для аморфного состояния силикатного стекла, но при этом доля кристаллов оксида кремния (кварца) увеличилась, что свидетельствует о низкой температуре кристаллизации стекла. На дифрактограмме также присутствуют пики, соответствующие оксиду титана в фазе рутила с примесью фазы анатаза.

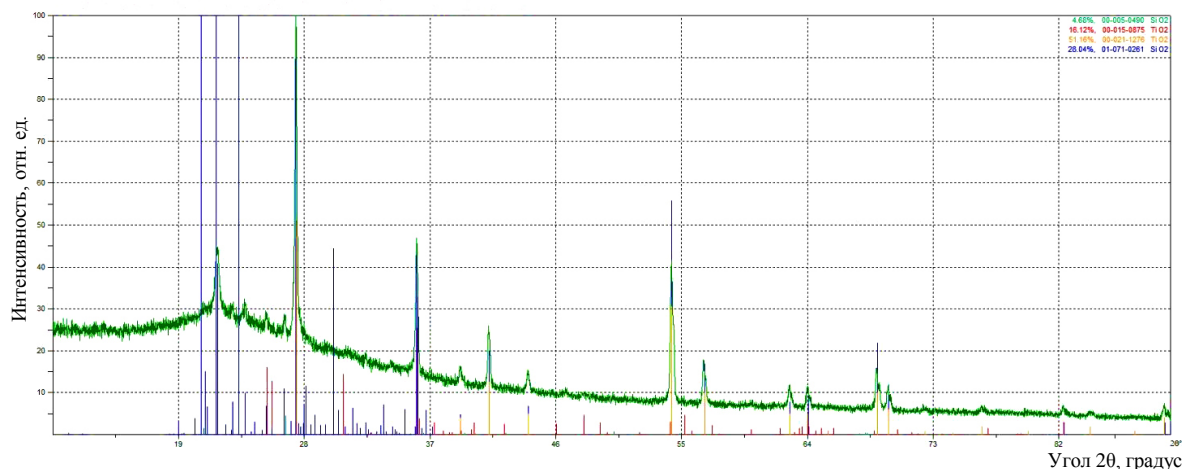


Рис. 10. Дифрактограмма отожженного при 800 °С образца тонкопленочного теплоизоляционного покрытия

Заключения

По результатам проведенного комплекса исследований можно сделать вывод, что типичные тонкопленочные теплоизоляционные покрытия – это слоистые пористые (размер пор от 10 до 200 мкм) структуры на основе сополимеров типа стирола и бутилакрилата, наполненных стеклосферами с характерным размером от 10 до 50 мкм и различными добавками для обеспечения необходимых функциональных свойств и цвета, с содержанием наполнителя $\sim(60\pm 5)$ % (по массе). Полученные результаты коррелируют с данными анализа научно-технических литературных источников и подтверждают возможность применения таких покрытий в качестве теплоизоляции. Однако

следует отметить, что значительный вклад в снижение теплопроводности материала на основе полимерной матрицы вносит его пористость наряду с газонаполненными или вакуумированными стеклосферами.

Список источников

1. Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Золотых С.В. Эффективная теплозащитная система с использованием теплоизоляционного раствора пониженной плотности // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16. № 3 (67). С. 324–333.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столянков Ю.В., Румянцева Т.В. Пенополиимиды // Труды ВИАМ. 2015. № 4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
4. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
5. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). С. 51–60. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
6. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 119–126. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
7. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Пористая керамика для фильтрации расплавов металлов горячих газов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 54–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2025.) DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
8. Истомин А.В., Кольшев С.Г. Переработка отходов производства высокотемпературного теплозащитного материала // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 97–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-97-104.
9. Оснос С.П. Применение материалов на основе базальтовых волокон в авиакосмической отрасли // Композитный мир. 2015. № 4 (61). С. 72–79.
10. Беспалов А.С., Салимов И.Э., Юдин А.В. Придание высоких гидрофобных свойств высокопористому керамическому материалу низкоконцентрированными растворами фторпарафина в среде сверхкритического диоксида углерода // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 39–48. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
11. Lermontov S.A., Sipyagina N.A., Malkova A.N., Buznik V.M., Bepalov A.S., Grashchenkov D.V., Baranchikov A.E. Hierarchical porous composite ceramic material modified by hydrophobic methyltrimethoxysilane-based aerogel // Journal of porous materials. 2021. Vol. 28. No. 4. P. 1237–1244. DOI: 10.1007/s10934-021-01075-3.
12. Kondrashov E.K., Nefedov N.I., Vereninova N.P., Kushch P.P., Kichigina G.A., Kiryukhin D.P., Buznik V.M. Modification of fluorocopolymer coatings by telomers to improve their hydrophobicity // Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 212–218.
13. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 3. С. 7–12.
14. Веневитин А.А., Асминин В.Ф. Повышение функциональных свойств теплоизолирующих покрытий на основе полых микросфер // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 5. С. 171–178.

15. Жданов Н.Н., Гарипов Р.М., Левин А.С. Влияние функционализированных мономеров на свойства акрилстирольной дисперсии и теплозащитного покрытия на ее основе // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 23. С. 65–67.
16. Куршев Е.В., Лонский С.Л., Деев И.С. Применение метода сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа для исследования неметаллических композиционных материалов // Мат. VIII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат»: в 4 ч. М.: ВИАМ, 2016. Ч. 2. С. 1–13.
17. Деев И.С., Кобец Л.П. Структурообразование в наполненных термореактивных полимерах // Коллоидный журнал. 1999. Т. 61. № 5. С. 650–660.
18. Bousfield V. Surface Preparation and Microscopy of Materials. John Wiley & Sons Ltd, 1992. 342 p.
19. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ. 2014. № 7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
20. Trathnigg V. Size-exclusion chromatography of polymers // Encyclopedia of Analytical Chemistry / ed. R.A. Meyers. Chichester: Wiley, 2000. P. 8008–8034.
21. Grundy P.J., Jones G.A. Electron Microscopy in the Study of Materials. Edward Arnold Publishers Ltd, 1976. 194 p.
22. Пономаренко С.А., Шимкин А.А. Хроматографические методы анализа: возможности применения в авиационной промышленности (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. № 83 (4). С. 5–13.
23. Applied Pyrolysis Handbook. 2-nd ed. / ed. T.P. Wampler. CRC Press, 2006. 304 p.
24. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии: учеб. пособие М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 493 с.
25. Жданов Н.Н. Разработка теплозащитных покрытий на основе акрилстирольных сополимеров и полых стеклянных микросфер: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 123 с.
26. Логинова Н.А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 133 с.

References

1. Zagorodnyuk L.Kh., Sumskey D.A., Zolotykh S.V. Effective thermal protection system using a low-density thermal insulation solution. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2019, vol. 16, no. 3 (67), pp. 324–333.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N., Bejder E.Ya., Petrova G.N., Stolyankov Yu.V., Romyanceva T.V. Foamed polyimides. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
4. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
5. Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R. Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), pp. 51–60. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

6. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 119–126. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
7. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Porous ceramic for filtration of metal melts and hot gases (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp. 54–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2025.) DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
8. Istomin A.V., Kolyshchev S.G. Processing of wastes high-temperature heat-protective material. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 97–104. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2025.). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-97-104.
9. Osnos S.P. Application of materials based on basalt fibers in the aerospace industry. *Kompozitnyy mir*, 2015, no. 4 (61), pp. 72–79.
10. Bespalov A.S., Salimov I.E., Yudin A.V. Imparting highly hydrophobic properties to a high-porous ceramic material with low-concentration solutions of fluoroparaffin in a supercritical carbon dioxide environment. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 39–48. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
11. Lermontov S.A., Sipyagina N.A., Malkova A.N., Buznik V.M., Bespalov A.S., Grashchenkov D.V., Baranchikov A.E. Hierarchical porous composite ceramic material modified by hydrophobic methyltrimethoxysilane-based aerogel. *Journal of porous materials*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 1237–1244. DOI: 10.1007/s10934-021-01075-3.
12. Kondrashov E.K., Nefedov N.I., Vereninova N.P., Kushch P.P., Kichigina G.A., Kiryukhin D.P., Buznik V.M. Modification of fluorocopolymer coatings by telomers to improve their hydrophobicity. *Polymer Science. Series D*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 212–218.
13. Buznik V.M. The state of domestic fluoropolymer chemistry and possible development prospects. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. 52, no. 3, pp. 7–12.
14. Venevitin A.A., Asminin V.F. Improving the functional properties of heat-insulating coatings based on hollow microspheres. *Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice*, 2013, no. 5, pp. 171–178.
15. Zhdanov N.N., Garipov R.M., Levin A.S. The influence of functionalized monomers on the properties of acrylstyrene dispersion and heat-protective coating based on it. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 23, pp. 65–67.
16. Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Deev I.S. Application of scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis to study non-metallic composite materials. *Proc. of the VIII All-Rus. Conf. on Testing and Research of Material Properties «TestMat»*: in 4 parts. Moscow: VIAM, 2016, part 2, pp. 1–13.
17. Deev I.S., Kobets L.P. Structure formation in filled thermosetting polymers. *Kolloidnyy zhurnal*, 1999, vol. 61, no. 5, pp. 650–660.
18. Bousfield B. *Surface Preparation and Microscopy of Materials*. John Wiley & Sons Ltd, 1992, 342 p.
19. Deev I.S., Kablov E.N., Kobets L.P., Chursova L.V. Research of the scanning electron microscopy method deformation of microphase structure of polymeric matrix at mechanical loading. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
20. Trathnigg B. Size-exclusion chromatography of polymers. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Ed. R.A. Meyers. Chichester: Wiley, 2000, pp. 8008–8034.
21. Grundy P.J., Jones G.A. *Electron Microscopy in the Study of Materials*. Edward Arnold Publishers Ltd, 1976, 194 p.
22. Ponomarenko S.A., Shimkin A.A. Chromatographic methods of analysis: application possibilities in the aviation industry (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, no. 83 (4), pp. 5–13.
23. *Applied Pyrolysis Handbook*. 2nd ed. Ed. T.P. Wampler. CRC Press, 2006, 304 p.

24. Lebedev A.T. *Mass Spectrometry in Organic Chemistry: A Textbook*. Moscow: Binom. Knowledge Laboratory, 2003, 493 p.
25. Zhdanov N.N. *Development of Heat-Protective Coatings Based on Acrylic-Styrene Copolymers and Hollow Glass Microspheres*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Kazan, 2017, 123 p.
26. Loginova N.A. *Determination of the Efficiency of Thin-Film Thermal Insulation Coatings as Applied to Heating Systems*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2010, 133 p.

Информация об авторах

Беспалов Александр Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Салимов Илья Эркинович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пономаренко Сергей Александрович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander S., Bepalov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya E. Salimov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny V. Kurshev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Ponomarenko, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.07.2025.
The article was submitted 24.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 01.07.2025.